

УДК 004.93'1; 004.932; 528.85/87(15)

Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина

РАЗНОСТНЫЕ ГИСТОГРАММЫ В ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ ОБЪЕКТОВ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Рассматриваются вопросы создания технологии построения системы автоматической обработки и анализа изменений объектов спутниковой съемки на основе совместного использования разновременных изображений и их разностных гистограмм. Демонстрируется возможность яркостной селекции пространственных областей изменений при одновременном устранении шумовых выбросов соседних яркостных интервалов. На тех же принципах предлагается решение задачи пространственно-спектральной декомпозиции областей изменений, полученных селективно-яркостным способом для каждого канала.

Введение

Разработка принципов моделирования гистограмм изображений наземных объектов спутниковой съемки [1, 2], изучение особенностей ситуационного преобразования их структуры под влиянием изменений внешнего облика объектов позволили проследить, как эти изменения отражаются в существенных характеристиках графического представления гистограмм [3, 4]. К характеристикам отнесены число мод распределения, их амплитуды, протяженности и площади яркостных группировок пикселей вокруг мод. После вынужденного отказа от вероятностного описания состояний объектов, находящихся в штатном состоянии, была показана допустимость и возможность их детерминированных интерпретаций. Вместе с числом мод гистограмм к детерминированным отнесены уникальные структурно-ранговые признаки амплитуд тех же мод и параметры яркостных группировок, сопутствующих модам и состоящих из элементов пространственного разрешения (пикселей) компонент объектов [5]. На полученной основе появилась возможность решения задач обнаружения и анализа особенностей изменений внешнего облика объекта. При этом одновременно удалось отказаться от интерактивного подхода, предложить алгоритмы автоматических вычислений введенных характеристик.

В процессе экспериментальной проверки соответствующей технологии было обнаружено, что остаточные яркостные различия разновременных изображений, а следовательно, и соответствующие различия гистограмм, снижают достоверность выполняемых оценок изменений отражающих свойств компонент интересующих объектов. Это заставило обратить внимание на допустимость использования тех же гистограмм сравниваемой пары изображений для построения более простого, чем это имеет место при первичной обработке изображений, автоматически осуществляемого сведения диапазонов их яркости. В результате обоснована технология яркостного сведения гистограмм, реализованная программно и проверенная на реальных спутниковых изображениях [6].

В свою очередь, решение последней из задач и данные предшествующего моделирования гистограмм [3, 4] показали, что применяемая в этих случаях разность гистограмм может оказаться полезной и в задачах анализа обнаруживаемых изменений внешнего облика объектов.

1. Яркостные интервалы разностных гистограмм в обнаружении и анализе особенностей изменений внешнего облика объектов

Преобразования внешнего облика объектов лежат в основе изменений отражающих свойств их отдельных компонент и групп. В любом из случаев трансформации изображения объекта общее число пикселей, составляющих его площадь, остается неизменным по сравнению с эталонным представлением штатного состояния, т. е. все изменения гистограмм изображений сопровождаются только перераспределением по яркостям числа пикселей за счет заме-

щения штатных компонент площади поверхности новой компонентой или новыми компонентами произошедших изменений.

Разности разновременных гистограмм (разностные гистограммы) представляют особую характеристику изменений объекта. Ее удобнее и проще использовать в проводимых оценках вместо рассмотренного [3, 4] привлечения детерминированных и ранговых признаков структуры каждой из гистограмм.

Известно [6], что разностная гистограмма разновременных изображений объекта спутниковой съемки может быть представлена в виде разнополярных дискретных значений:

$$\Delta H(L) = \begin{cases} \Delta H^+(L) = H(L) - H_{\check{y}}(L), \text{ а́ñè } H(L) - H_{\check{y}}(L) > 0; \\ \Delta H^-(L) = H(L) - H_{\check{y}}(L), \text{ а́ñè } H(L) - H_{\check{y}}(L) < 0, \end{cases}$$

где $H_{\check{y}}(L)$ – гистограмма изображения предшествующей съемки (эталон состояния объекта); $H(L)$ – гистограмма изображения очередной, более поздней по времени съемки.

Сам факт обнаружения разнополярных разностей равносильно решению задачи обнаружения изменений, произошедших на объекте за время между съемками. Конечно, при этом необходимо принимать во внимание, что шумы изображения искажают точное равенство. Тогда приходится подтверждать факт обнаружения, проверяя, превышают ли указанные суммы любой из полярностей некоторый порог в виде некоторого числа пикселей.

В силу образования законами распределения яркостей отдельных компонент объекта [3] положительные и отрицательные разности при отражении произошедших изменений группируются по яркостям в сосредоточенные области на интервалах, где эти изменения произошли (рис. 1). Каждому i -му группированию соответствует свой яркостный интервал. При этом, как следует из порядка вычитания гистограмм, интервалы яркостей, соответствующие отрицательным группировкам значений $\Delta H^-(L)$, определяют распределенные по яркостям величины уменьшения площадей компонент объекта, имевших место до изменений внешнего облика объекта:

$$S_1^- = \delta_{ID} \cdot \sum_{L=L_1^- \min}^{L_1^- \max} |\Delta H^-(L)|; \quad S_2^- = \delta_{ID} \cdot \sum_{L=L_2^- \min}^{L_2^- \max} |\Delta H^-(L)|; \quad S_3^- = \delta_{ID} \cdot \sum_{L=L_3^- \min}^{L_3^- \max} |\Delta H^-(L)|, \quad \dots,$$

где $L_{i \min}^- \div L_{i \max}^-$ – i -й интервал яркостей отрицательных разностей гистограмм; δ_{IP} – пространственная разрешающая способность спутниковой съемки.

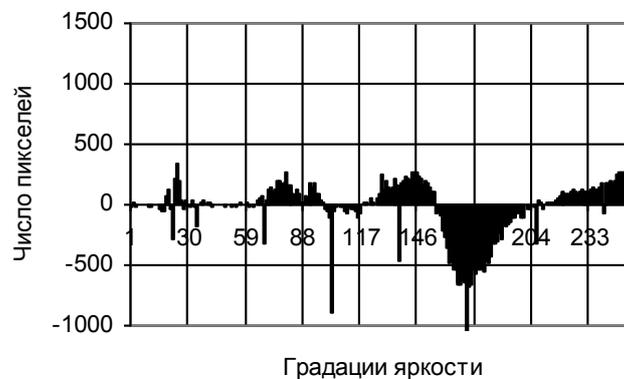


Рис. 1. Разностная гистограмма реальных разновременных изображений объекта спутниковой съемки

Интервалы яркостей, соответствующие положительным группировкам значений $\Delta H^+(L)$, обнаруживают, что распределенные по яркостям площади компонент выросли по сравнению с теми, которые наблюдались до изменений внешнего облика объекта. Размеры таких увеличений в отличие от наблюдаемых для отрицательных группирований, площади которых определяются аналогично, характеризуют произошедшие изменения:

$$S_1^+ = \delta_{fD} \cdot \sum_{L=L_{1\min}^+}^{L_{1\max}^+} \Delta H^+(L); S_2^+ = \delta_{fD} \cdot \sum_{L=L_{2\min}^+}^{L_{2\max}^+} \Delta H^+(L); S_3^+ = \delta_{fD} \cdot \sum_{L=L_{3\min}^+}^{L_{3\max}^+} \Delta H^+(L), \dots,$$

где $L_{g\min}^+ \div L_{g\max}^+$ – g-й интервал яркостей положительных разностей гистограмм.

В то же время суммы положительных и отрицательных значений разностной гистограммы в диапазоне регистрируемых яркостей равны между собой:

$$\sum_{L=0}^{255} \Delta H^+(L) = \sum_{L=0}^{255} |\Delta H^-(L)|.$$

Поэтому и для площадей разнонаправленных изменений характерно равенство

$$\sum_i S_i^+ = \sum_i S_i^-.$$

Таким образом, интервалы группирования площадей по яркостям можно рассматривать как характеристику изменений, произошедших на объектах и отражающихся на их внешнем облике. Знание таких интервалов при анализе особенностей изменений позволяет определять истинные площади последних. При этом сумма площадей отрицательных разностей

$S_{\Sigma}^- = \sum_i S_i^-$ является общей площадью компонент объекта, подвергшихся изменению. Каждое

положительное группирование с площадью S_g^+ , требующее отдельного рассмотрения, представляет собой характеристику компоненты, заместившей (наряду с остальными положительными группированиями) равную площадь одной или нескольких компонент объекта, подвергшихся изменению. Эта компонента и является одной из компонент рассматриваемых изменений.

В свою очередь, все рассмотренные яркостные интервалы в силу очевидной связи их значений с коэффициентами отражения соответствующих компонент обеспечивают в процессе анализа возможность поставить в соответствие каждой площади изменений диапазон коэффициентов ее отражения:

$$S_1^+ \rightarrow \rho_{1\min}^+ \div \rho_{1\max}^+, S_2^+ \rightarrow \rho_{2\min}^+ \div \rho_{2\max}^+, S_3^+ \rightarrow \rho_{3\min}^+ \div \rho_{3\max}^+, \dots;$$

$$S_1^- \rightarrow \rho_{1\min}^- \div \rho_{1\max}^-, S_2^- \rightarrow \rho_{2\min}^- \div \rho_{2\max}^-, S_3^- \rightarrow \rho_{3\min}^- \div \rho_{3\max}^-, \dots.$$

Каждому коэффициенту отражения соответствует физически однородный материал. Указанное соответствие дает возможность выяснить, что же вызвало изменение внешнего облика объекта.

Непосредственные решения о видах материалов компонент изменений, возможные в процессе дальнейшего анализа, основываются на хорошо известных методах теории распознавания, несмотря на все известные недостатки и трудности их реализации применительно к изображениям дистанционного зондирования Земли.

Легко обнаружить, что все элементы вычислительного процесса последовательного получения информации для анализа особенностей изменений: гистограммы разновременных изображений, разностная гистограмма, интервалы яркостей изменений объектов, распределения пикселей в их пределах, соответствующие площади и отражающие свойства – достаточно просты. Интерактивных действий для достижения конечного результата не требуется.

Несмотря на имеющую здесь место простоту получения рассматриваемых данных об изменениях, их классификация может оказаться неполной. Если анализ выполняется всего лишь в одном спектральном диапазоне, то наличие не единственного значения, а целого диапазона коэффициентов отражения на каждом яркостном интервале будет приводить к обнаружению большого разброса отражающих свойств одного материала или к предположению о присутствии смеси ряда материалов, казалось бы, с близкими физико-химическими свойствами. Однако данное заключение возможно, если не учитывать, что отдельные отрезки каждого из таких интервалов могут одновременно характеризоваться отличающимися яркостями других спектральных диапазонов. Это обуславливает целесообразность более детальной классификации.

2. Селективный переход к пространственному распределению изменений внешнего облика объекта

Вполне очевидно, что многоспектральная спутниковая съемка могла бы способствовать устранению возникающей неоднозначности. Физически разным изменениям объектов не могут быть свойственны одинаковые или одинаково распределенные векторы коэффициентов отражения. Однако если отличающихся спектральных диапазонов спутниковой съемки объекта несколько и в каждом из них (аналогично рассмотренному на рис. 1) будет обнаружено некоторое число интервалов группирований, то проводимый яркостной анализ не дает ответ на вопрос, какие группирования изменений одного из них соответствуют отрезкам другого.

Все группирования изменений в каждом диапазоне располагаются на шкале яркостей только в последовательности, характерной для их яркостей. При этом пространственное положение каждого из группирований неизвестно, т. е. они не следуют в каком-либо строгом порядке.

Выходом из создавшегося положения может быть только переход к пространственному анализу изменений. Носителем соответствующей информации являются изображения. Оказывается, объединение достоинств рассмотренного анализа информационных возможностей разностных гистограмм с пространственным анализом, осуществляемым с привлечением изображений, обеспечивает получение новых преимуществ, не достижимых без указанного объединения. В результате удается снизить потери информации о пространственном положении происходящих изменений внешнего облика объекта.

Используя знания, полученные по отдельным интервалам изменений в автоматическом (программно-реализованном) режиме, тоже автоматически можно оперировать непосредственно и с изображениями. Прежде всего должны быть найдены пространственные области эталонного изображения объекта $L_g(x, y, t_g)$, подвергаемые изменениям. Яркости этих областей в каждом спектральном диапазоне определяют уже рассмотренные интервалы группирований разностных гистограмм. Затем необходимо найти пространственное расположение (координаты) соответствующих изменений. Как подтверждает дальнейшее изложение, наиболее целесообразным для решения этой задачи представляется преобразование изображения объекта путем его селективной пространственно-яркостной бинаризации. Суть селекции состоит здесь в выделении только тех пикселей, яркости которых принадлежат g -му интервалу положительных разностей:

$$B_{\dot{Y}_g}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } L_{\dot{Y}}(x, y, t_{\dot{Y}}) \in (L_{g \min} \div L_{g \max}); \\ 0 & \text{if } L_{\dot{Y}}(x, y, t_{\dot{Y}}) \notin (L_{g \min} \div L_{g \max}). \end{cases} \quad (1)$$

В результате единичные пиксели ($B_{\Delta g}(x, y) = 1$) этого интервала, положение которых в пространстве изображения объекта определяется двумя координатами (x, y) , составляют двухмерное множество элементов эталонного изображения ($M_{\Delta g}$), соответствующее области пространства штатных компонент объекта, в которой возникли изменения.

На том же яркостном интервале подвергается селективной пространственно-яркостной бинаризации текущее изображение $L(x, y, t)$:

$$B_{Tg}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{и } \delta\epsilon \quad L(x, y, t) \in (L_{g \min} \div L_{g \max}); \\ 0 & \text{и } \delta\epsilon \quad L(x, y, t) \in (L_{g \min} \div L_{g \max}). \end{cases} \quad (2)$$

Текущее изображение в рассматриваемом интервале яркостей разностной гистограммы представляет не только те площади, на которых произошли изменения внешнего облика объекта, но и другие, которые в этом интервале яркостей не изменились, т. е. соответствуют штатным. Поэтому часть изображения, выделяемая (2) по яркостям аналогично множеству $B_{Tg}(x, y) = 1$, в отличие от предыдущего формирования образует в пространстве изображения объекта множество яркостных элементов M_{Tg} , содержащее в своем составе и множество $M_{\Delta g}$, т. е. $M_{\Delta g} \subset M_{Tg}$.

Следовательно, разность множеств (1) и (2) представляет собой множество, элементы которого составляют площадь рассматриваемых изменений¹:

$$M_g^+ := \left\{ \left(\begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right) \middle| \left(\begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right) \in M_{Tg} \wedge \left(\begin{matrix} x \\ y \end{matrix} \right) \notin M_{\Delta g} \right\}. \quad (3)$$

Тем не менее, в отличие от случая, рассмотренного раньше, где интервалу $L_{g \min}^+ \div L_{g \max}^+$ можно было бы поставить в соответствие площадь S_g^+ и набор коэффициентов отражения в диапазоне $\rho_{g \min}^+ \div \rho_{g \max}^+$, введенное множество M_g^+ не только образовано элементами упомянутой площади (пикселя), но и определяется теперь координатами в пространстве объекта. Тем самым как бы завершается процесс получения информации для анализа изменений в рассматриваемом g -м интервале яркостей.

Необходимо обратить внимание на то, что множества M_{Tg} и $M_{\Delta g}$ наряду с элементами изменений, порожденными яркостями интересующего g -го интервала, содержат элементы, которые своим происхождением обязаны шумам регистрации, передачи и приема спутниковых изображений. Это может влиять на процесс обнаружения изменений, приводя к ложным тревогам и пропускам, а поэтому требует, прежде всего, соответствующей оценки.

В обоих случаях бинаризации (см. (1), (2)) участвующие изображения можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} L_{\Delta}(x, y, t_{\Delta}) &= L_{\Delta \text{инф}}(x, y, t_{\Delta}) + L_{\Delta \text{ш}}(x, y, t_{\Delta}); \\ L(x, y, t) &= L_{\text{инф}}(x, y, t) + L_{\text{ш}}(x, y, t), \end{aligned} \quad (4)$$

¹Теоретико-множественное описание, используемое здесь и далее, достаточно компактно поясняет смысл производимых операций. В то же время рассмотренную разность можно было бы получить как разность изображений: $B_g^+ := B_{Tg}(x, y) - B_{\Delta g}(x, y)$, но с некоторой корректировкой правил.

где $L_{\text{инф}}(x, y, t)$ и $L_{\text{эинф}}(x, y, t_{\text{э}})$ – информационные части текущего и эталонного изображений одного и того же объекта; $L_{\text{ш}}(x, y, t)$ и $L_{\text{эш}}(x, y, t_{\text{э}})$ – случайно и независимо распределенные по одному и другому изображениям шумовые составляющие, возникшие в моменты съемок t и $t_{\text{э}}$.

При этом очевидно, что для каждого положительного шумового выброса $L_{\text{ш}}(x_i, y_i, t)$ или $L_{\text{эш}}(x_j, y_j, t_{\text{э}})$ в результате совпадения с ним по координатам информационного пикселя $L_{\text{инф}}(x_i, y_i, t)$ или $L_{\text{эинф}}(x_j, y_j, t_{\text{э}})$ яркость пикселя изображения $L(x_i, y_i, t)$ или $L_{\text{э}}(x_j, y_j, t_{\text{э}})$ возрастает, что заставляет такой суммарный сигнал переместиться по шкале яркостей в положительном направлении вплоть до перехода в другие яркостные интервалы (по сравнению с рассматриваемым). Если же предполагать возможность существования отрицательных значений яркости шумовых выбросов, то перемещение информационных пикселей, алгебраически суммируемых с шумом (4), должно осуществляться в противоположном направлении по шкале яркостей с аналогичными последствиями.

Характерно, что, перемещаясь по шкале яркостей, искаженные шумами пиксели по-прежнему сохраняют неизменным свое положение (координаты) в пространстве.

Таким образом, в каждом из образованных множеств (M_{Tg} и $M_{\text{э}g}$) g -го рассматриваемого яркостного интервала наряду с «законно» принадлежащими им информационными элементами (даже искаженными шумами) присутствуют те, которые обязаны суперпозиции элементов яркости изображений с шумами, образовавшейся в соседних яркостных интервалах.

Важно обратить внимание на то, что указанное порождение шумовых выбросов в M_{Tg} и $M_{\text{э}g}$ множествах происходит независимо, так как соответствующие им изображения являются разновременными по съемке (t и $t_{\text{э}}$). Отсюда элементы шумовых выбросов множества $M_{\text{э}g}$ не имеют совпадающих с ними по координатам шумовых выбросов в множестве M_{Tg} и на разность множеств (3) влияния не оказывают, т. е. множеству изменений M_g^+ должны быть свойственны только шумы, характерные рассматриваемому яркостному интервалу M_{Tg} текущего изображения.

Наряду с эффектом вычисления разности (3), важным для понимания воздействия шумов является и то, что все рассмотрение здесь осуществляется в отдельно взятом g -м яркостном интервале изменений. Следовательно, шумовые выбросы других яркостей, не входящих в анализируемый интервал яркостей, отсутствуют в бинаризованном изображении. Физически они могут иметь близлежащие координаты, т. е. находиться рядом в пространстве, но не принадлежать этому интервалу. Такие выбросы невидимы, так как блокируются селективной бинаризацией (2) g -го интервала. Рассматриваемая технология в этом существенно отличается от традиционного подхода [7], который рассчитан на анализ изменений путем сравнения разновременных изображений во всем диапазоне яркостей (0–255), открытом для любых взаимных помех. Отличительной чертой селективно-яркостной технологии является снижение последствий влияния яркостных шумов как результат предложенного перехода от разностной гистограммы к пространственному анализу изменений.

Дополнительные преимущества данная технология приобретает еще и благодаря целенаправленному привлечению к обработке интервалов отрицательного группирования изменений ($L_{i\text{min}}^- \div L_{i\text{max}}^-$), соответствующих уменьшению площадей компонент штатного состояния объекта, которое возникает вследствие их замещения измененными по отражающим свойствам компонентами. Достижение такой цели требует и здесь перехода от этих интервалов к пространственному представлению. В отличие от предшествующего случая бинаризованное изображение всей пространственной области штатного состояния, подвергшейся изменениям, определяется как

$$B_{\dot{y}}^{-}(x, y) = \begin{cases} 1 & \forall i \quad L_{\dot{y}}(x, y, t_{\dot{y}}) \in (L_{i \min} \div L_{i \max}); \\ 0 & \forall i \quad L_{\dot{y}}(x, y, t_{\dot{y}}) \notin (L_{i \min} \div L_{i \max}). \end{cases} \quad (5)$$

В частности, для приведенного примера разностной гистограммы (см. рис. 1) характерны всего два интервала отрицательных группирований ($i = 1, 2$):

$$L_{1 \min}^{-} \div L_{1 \max}^{-} = 98 \div 118 \quad \text{и} \quad L_{2 \min}^{-} \div L_{2 \max}^{-} = 154 - 211.$$

Получаемые селективной бинаризацией (5) значения $B_{\dot{y}}^{-}(x, y) = 1$ образуют особое двумерное множество элементов части эталонного изображения поверхности объекта M_{Σ}^{-} . Занимаемая этим множеством площадь равна сумме замещаемых в результате изменений площадей компонент объекта, находившегося в штатном состоянии. В свою очередь, в силу рассмотренного в разд. 1 равенства площадей это множество должно быть равно множеству всех изменений:

$$M_{\Sigma}^{-} = \sum_g M_g^{+}. \quad (6)$$

Элементы полученного множества M_{Σ}^{-} , имеющие шумовое происхождение, и такие же элементы каждого из множеств яркостных изменений M_g^{+} , оставшиеся в их составе после вычитания (3) и порожденные другими яркостными интервалами, взаимно независимы по месту возникновения в силу формирования изображений $L(x, y, t)$ и $L_{\dot{y}}(x, y, t_{\dot{y}})$ в процессе разновременного экспонирования. Отсюда пересечение множества M_g^{+} с множеством M_{Σ}^{-} приводит к тому, что шумовые элементы первого из них не войдут в состав результата, за исключением маловероятных случаев равенства их координат. По тем же причинам в пересечении множеств отсутствуют такого же рода шумовые элементы второго множества (M_{Σ}^{-}).

Таким образом, заключительным этапом рассматриваемого анализа, построенного на использовании яркостных интервалов разностной гистограммы, должен быть этап окончательной очистки изображения изменений от шумовых яркостных выбросов. Он включает формирование множеств пересечения для каждого g -го интервала текущих изменений:

$$M_g := M_g^{+} \cap M_{\Sigma}^{-}. \quad (7)$$

Множества изменений M_g , получаемые в соответствии с такой технологией обработки, представляют собой изображения сегментированных областей изменений интервала яркостей (коэффициентов отражения) с известными координатами каждого элемента в пространстве объекта. В составе этих областей отсутствуют шумы, вызывающие ложные тревоги обнаружения изменений. Кроме того, в силу бинаризации такие области отличаются четкостью границ рассматриваемых изменений, так как в их пределах яркостные характеристики пикселей изображения исключены из рассмотрения.

В качестве примера на рис. 2 показаны эталонное и текущее изображения объекта в одном из спектральных диапазонов спутниковой съемки на первом интервале изменений разностной гистограммы, полученной для этих изображений (см. рис. 1). Согласно рис. 1 разностная гистограмма этих изображений позволяет считать интервал яркостей $L_{1 \min}^{+} \div L_{1 \max}^{+} = 22 - 33$ первым интервалом яркостных изменений ($g = 1$), произошедших за время между съемками. Последовательно выполненные операции (1)–(3), (5) и (7), результаты которых показаны на рис. 3, демонстрируют селективно-яркостное определение области изменений (5) и эффект ее шумочистки (7).



Рис. 2. Изображения размером 128 898 пикселей:
a) эталонное (съемка 21.07.1999); *б)* текущее (съемка 05.06.2000)

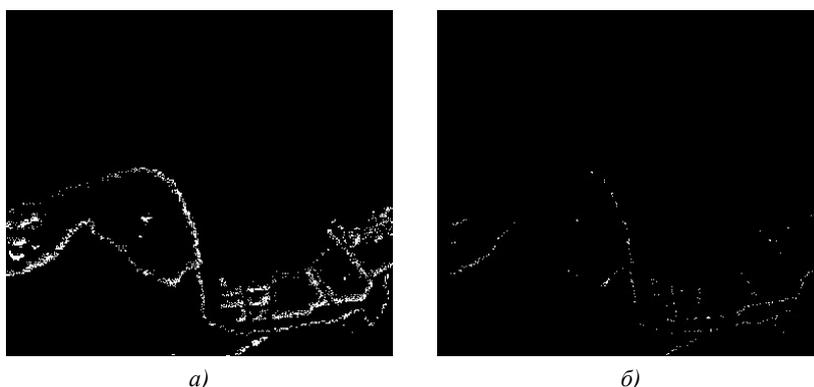


Рис. 3. Результаты формирования и преобразования изображений изменений
 в интервале яркостей $L_{1\min}^+ \div L_{1\max}^+ = 22 - 33$: *a)* изображение M_1^+ ; *б)* изображение M_1

Обнаруживаемые шумовые выбросы других яркостных интервалов (рис. 3, *a*) удаляются в процессе окончательной шумоочистки множества изменений (рис. 3, *б*).

В то же время, рассматривая четвертый яркостный интервал изменений внешнего облика отображаемого объекта $L_{4\min}^+ \div L_{4\max}^+ = 212 - 255$, на котором, судя уже по площади группирования (см. рис. 1), изменения максимальны, получаем соответствующие изображения (рис. 4).

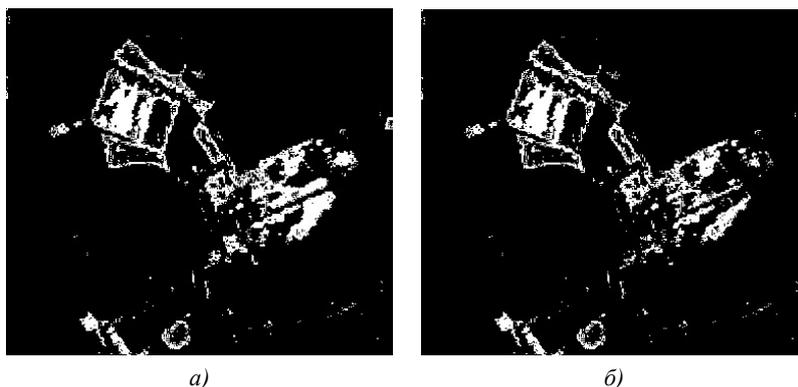


Рис. 4. Результаты формирования и преобразования изображений изменений
 в интервале яркостей $L_{4\min}^+ \div L_{4\max}^+ = 212 - 255$: *a)* изображение M_4^+ ; *б)* изображение M_4

Если на рис. 3 особенно заметны формирование изображения изменений, соответствующее множеству M_1^+ , и результат его шумоочистки M_1 благодаря незначительности изменений в рассматриваемом интервале яркостей, то рис. 4 демонстрирует те же особенности, но при обнаружении значительно большей по площади области изменений.

Рассмотренная технология обработки, итогом которой является выделение очищенного от шумов множества изменений, представляемого соответствующими изображениями, должна распространяться на все спектральные диапазоны спутниковой регистрации. Здесь также должны иметь место аналогичные этапы, связанные с определением гистограмм разновременных изображений, получением разностной гистограммы, определением интервалов изменений и переходом от них к соответствующим множествам (изображениям) этих изменений.

Такую обработку вполне можно осуществить автоматически. Однако сами по себе получаемые при этом результаты еще недостаточны для детализации и классификации изменений, поскольку количество яркостных интервалов изменений в общем случае неодинаково в каждом спектральном диапазоне, а один интервал какого-либо из диапазонов при внимательном рассмотрении может распадаться на некоторое число составляющих его подынтервалов, соответствующих изменениям такого же числа интервалов другого спектрального диапазона. Элементы одного множества могут принадлежать разным классам.

Отсюда следует необходимость построения специальной технологии выделения много-спектральных областей изменений внешнего облика объекта съемки.

3. Селективная пространственно-спектральная декомпозиция областей изменений объекта спутниковой съемки

Построение соответствующей технологии наиболее целесообразно представить для случая регистрации изображений объекта спутниковой съемки в трех основных цветовых диапазонах (RGB). Тогда исходными данными для представления методов обработки информации, дополняющих селективно-яркостный подход, должны быть:

– множества (изображения) изменений в каждом из свойственных им интервалов яркостей во всех спектральных диапазонах, полученные по рассмотренной выше технологии (см. разд. 2):

$$\begin{aligned} &M_1^R, M_2^R, M_3^R, \dots, M_{NR}^R; \\ &M_1^G, M_2^G, M_3^G, \dots, M_{NG}^G; \\ &M_1^B, M_2^B, M_3^B, \dots, M_{NB}^B; \end{aligned} \quad (8)$$

– интервалы яркостей изменений в каждом из спектральных диапазонов

$$\begin{aligned} &(L_{1\min}^{+R} \div L_{1\max}^{+R}), (L_{2\min}^{+R} \div L_{2\max}^{+R}), (L_{3\min}^{+R} \div L_{3\max}^{+R}), \dots, (L_{NR\min}^{+R} \div L_{NR\max}^{+R}); \\ &(L_{1\min}^{+G} \div L_{1\max}^{+G}), (L_{2\min}^{+G} \div L_{2\max}^{+G}), (L_{3\min}^{+G} \div L_{3\max}^{+G}), \dots, (L_{NG\min}^{+G} \div L_{NG\max}^{+G}); \\ &(L_{1\min}^{+B} \div L_{1\max}^{+B}), (L_{2\min}^{+B} \div L_{2\max}^{+B}), (L_{3\min}^{+B} \div L_{3\max}^{+B}), \dots, (L_{NB\min}^{+B} \div L_{NB\max}^{+B}). \end{aligned} \quad (9)$$

Так как решаемая задача касается поиска взаимосвязи спектральных диапазонов при обнаружении областей изменений, сочетающих компоненты отдельных из них, каждое из приведенных множеств и их интервалы яркостей следует считать множествами и интервалами нулевого порядка объединений. Число этих множеств и интервалов нулевого порядка в каждом спектральном диапазоне равно NR, NG, NB .

Реализация анализа и сопутствующей обработки должна начинаться с совместного изучения двух диапазонов, в нашем случае, в частности, это R и G . Алгоритм, отвечающий этим задачам, должен предполагать в качестве первого этапа обработки построение пересечений исходного множества первого интервала изменений в диапазоне R (M_1^R) со всеми аналогичными множествами диапазона G (M_i^G). Вполне очевидно, что указанные пересечения представляют собой подобласти компонент изменений в пространстве объекта, содержащие одновременно обе спектральные составляющие.

В результате этой операции образуются следующие пересечения первого порядка объединения:

$$M_{11}^{RG} := M_1^R \cap M_1^G; \quad M_{12}^{RG} := M_1^R \cap M_2^G; \quad \dots; \quad M_{1NG}^{RG} := M_1^R \cap M_{NG}^G. \quad (10)$$

Общее число множеств декомпозиции (изображений подобластей изменений), полученных в данных пересечениях, т. е. относящихся к двум спектральным диапазонам, равно NG^2 . При этом часть множества M_1^R может отражать изменения, не содержащие компоненты спектрального диапазона G . Определение этой части состоит в формировании множества (изображения)

$$M_{10}^{RG} := M_1^R \setminus \sum_{i=1}^{NG} M_{1i}^{RG}. \quad (11)$$

Каждое из множеств полученного ряда первого порядка объединений (пересечений R и G множеств изменений) участвует в аналогичном образовании множеств пересечений второго порядка (множеств RG и B), осуществляемом с множествами M_i^B очередного спектрального диапазона (B).

Если в этом процессе исключить получаемые пустые множества, то для классификации изменений остаются в общем случае множества только семи спектральных составов: RGB , RG , RB , GB , R , G , B , на которые разделяется множество изменений любого яркостного интервала изменений диапазона R , принятое за исходное для декомпозиции. Причем в каждом из семи составов может находиться несколько подобластей, характеризуемых разными интервалами яркостей спектральных составляющих.

Следовательно, представляя собой законченный цикл хорошо программируемого разделения множеств (изображений) областей изменений на составляющие их множества (изображения) подобластей, рассматриваемая технология должна завершаться определением яркостных интервалов этих подобластей декомпозиции. В итоге каждой из них следует поставить в соответствие группировки яркостей всех спектральных диапазонов (некоторые из них могут быть пустыми). Средние значения яркостей этих областей образуют вектор изменений объекта для данного пространственного их положения.

Вид каждого из полученных изображений подобластей изменений любого интервала селективируемых яркостей обеспечивает достаточно простое решение такой задачи путем его сопоставления с видом текущего изображения объекта. Цель такого сопоставления – формирование выборок яркостей для подобластей каждой спектральной комбинации, компоненты которых для каждого i -го пикселя определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \text{– для изображений } RGB(x, y) \quad \left\{ \begin{array}{l} L_i^R = L^R(x_i, y_i, t) \quad \text{äëÿ} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in RGB(x, y), \\ L_i^G = L^G(x_i, y_i, t) \quad \text{äëÿ} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in RGB(x, y), \\ L_i^B = L^B(x_i, y_i, t) \quad \text{äëÿ} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in RGB(x, y); \end{array} \right. \\
 & \text{– для изображений } RG(x, y) \quad \left\{ \begin{array}{l} L_i^R = L^R(x_i, y_i, t) \quad \text{äëÿ} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in RG(x, y), \\ L_i^G = L^G(x_i, y_i, t) \quad \text{äëÿ} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in RG(x, y); \end{array} \right. \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \text{– для изображений } B(x, y) \quad L_i^R = L^R(x_i, y_i, t) \quad \text{äëÿ} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \in B(x, y).
 \end{aligned} \quad (12)$$

²Для простоты изложения можно не обращать внимания на то, что отдельные из этих пересечений представляют пустые множества или нулевые изображения изменений в сопоставляемых яркостных интервалах каждого диапазона.

Начало и конец интервалов интенсивностей спектральных составляющих определяются как минимальное и максимальное значения выборок каждой области изменений, а соответствующие им средние значения – как компоненты векторов интенсивностей цветовых диапазонов. Например, для размера выборки (N_{RGB}) комбинированной области RGB интервалы формируются следующим образом:

$$\bar{X}^{RGB} = \left\| \frac{1}{N_{RGB}} \sum_{i=1}^{N_{RGB}} L_i^R \quad \frac{1}{N_{RGB}} \sum_{i=1}^{N_{RGB}} L_i^G \quad \frac{1}{N_{RGB}} \sum_{i=1}^{N_{RGB}} L_i^B \right\|^T.$$

Заключение

В статье рассмотрены вопросы, касающиеся направления автоматизации обнаружения и оценок характера изменений внешнего облика наземных объектов спутниковой съемки. На основе совместного использования разновременных изображений и их разностных гистограмм решены следующие задачи:

- обнаружения факта изменений, произошедших на объекте за время между съемками;
- определения интервалов яркостных изменений объектов с оценкой их площадей и отражающих свойств;
- реализации предлагаемых принципов селективно-яркостного перехода к пространственному распределению изменений внешнего облика объекта, обеспечивающему защиту решений осуществляемого анализа от влияния яркостных шумов;
- введения пространственно-спектральной декомпозиции многоспектральных областей изменений объекта спутниковой съемки на подобласти, в соответствие которым ставятся группировки яркостей каждого спектрального диапазона и векторы отражающих свойств.

Комплекс приведенных задач определяет законченный цикл хорошо программируемого пространственно-яркостного разделения изменений, не содержит непреодолимых моментов для его автоматического выполнения и не требует интерактивных действий для достижения конечного результата.

Список литературы

1. Estimation of Forest Stand Characteristics Using Spectral Histograms Derived from an IKONOS Satellite Image / J. Peuhkurinen [et al.] // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – № 74 (11). – 2008. – P. 1335–1341.
2. Kawano, K. Multi-dimensional histogram method using multi-spectral images / K. Kawano, J. Kudoh // IEEE International. – 2004. – Vol. 4, Issue. – P. 2528–2529.
3. Белозерский, Л.А. Моделирование и анализ информативности распределений яркости локальных объектов спутникового мониторинга / Л.А. Белозерский // Искусственный интеллект. – 2007. – № 4. – С. 239–252.
4. Белозерский, Л.А. Моделирование гистограмм изображения дистанционного спутникового зондирования для анализа состояний объектов / Л.А. Белозерский // Информатика. – 2008. – № 2. – С. 45–53.
5. Belozerskyu, L.A. Histograms of Satellite Images and Condition of Objects / L.A. Belozerskyu, L.V. Areshkina // Neural Networks and Artificial Intelligence (ICNNAI'2008) : Proc. of Fifth International Conf., 27–30 May, 2008, Minsk. – Minsk : Propilei, 2008. – P. 193–197.
6. Белозерский, Л.А. Способ автоматизации сведения яркостей разновременных спутниковых изображений геодезически определенных участков земной поверхности / Л.А. Белозерский, Л.В. Орешкина // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 254–265.

7. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вуд ; пер. с англ. под ред. П.А.Чочиа. – М. : Техносфера, 2006. – 1072 с.

Поступила 15.12.08

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: blzrsk@newman.bas-net.by,
ola@newman.bas-net.by*

L.A. Belozerskyy, L.V. Areshkina

**DIFFERENCE HISTOGRAMS FOR DETECTING
OBJECT CHANGES IN REMOTE SENSING IMAGES
ACQUIRED AT DIFFERENT TIME POINTS**

The problem of developing image analysis technology for detecting object changes in remote sensing images taken at different times is considered. The approach reported in the paper is based on intensity difference histograms. A noise-tolerant procedure of detecting spatial objects that underwent certain intensity changes is demonstrated. It is also shown that the problem of spatio-spectral decomposition of image regions can be solved based on the same approach being applied to every spectral band of an image.