

УДК 528.854/87(15)

Л. А. Белозерский

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск  
220012, Беларусь, г. Минск, ул. Сурганова, 6, *blzrsk@newman.bas-net.by*

## ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННО-ЯРКОСТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ РАЗНОВРЕМЕННОЙ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Статья посвящается рассмотрению комплекса взаимосвязанных методов, составляющих технологию пространственно-яркостного автоматического обнаружения изменений внешнего облика объектов по данным разновременной спутниковой съемки. Материал статьи построен на последовательном описании условий их реализации от обнаружения компонент потенциальных изменений, формирования их многоспектральных массивов, повышения их достоверности, дихотомического разделения изменений по их контрасту, формирования моноспектральных комплексов до спектральной декомпозиции и разностной NDVI-классификации. Рассматриваются ограничения, намечаются очередные задачи и способы повышения результативности применения.

**Ключевые слова:** технология пространственно-яркостного автоматического обнаружения, спутниковое дистанционное зондирование, анализ изображений, космическая съемка.

L. A. Belozersky

United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus, Minsk  
22012, Belarus, Minsk, Surganova st., 6

## AUTOMATIC SPATIAL AND BRIGHTNESS DETECTION OF CHANGES OF LAND OBJECTS BY SPACE SHOOTING OCCURRING AT DIFFERENT TIMES TECHNOLOGY

This article is devoted to the complex of the interconnected methods making the technology of automatic spatial and brightness detection of changes of objects according to satellite shooting occurring at different times. Material of the article is based on the consecutive description of their realization conditions from detection a component of potential changes, formation of their multispectral arrays, increase of their reliability, dichotomizing division of changes according to their contrast, formation of monospectral complexes, to the spectral decomposition and differential NDVI classification. In this material various restrictions are considered, immediate tasks and ways of increase of productivity of application of technology are defined.

**Key words:** technology of spatial-brightness automatic detection, satellite remote sensing, image analysis, space photography.

## Введение

Обнаружение изменений по данным спутникового дистанционного зондирования Земли так или иначе связано с анализом изображений разновременной космической съемки, а следовательно, с применением разностных методов [1]. Какой из них считать наиболее приемлемым, особенно при ориентации на автоматическое решение соответствующей задачи, чаще всего зависит от преимуществ, отдаваемых исполнителем тому или иному из них по признаку его известности или привычности.

В течение нескольких десятилетий развития дистанционного зондирования Земли создано большое число методов обнаружения изменений. В последние годы состав их, судя по достаточно свежим публикациям [2-6], не пополняется, в то время как давно известно [7], что ни один из них не является оптимальным и применимым ко всем случаям.

Наиболее востребованным во многих разработках считается физически очевидный метод прямого обнаружения изменений по разновременным изображениям одного наземного участка (*Image differencing*), называемый в соответствии с русскоязычной терминологией методом «разности изображений». При этом все попытки его развития и совершенствования [2], [5], [6] не устраняют свойственных ему недостатков [7]:

- трудности в выборе порогов для идентификации измененной области;
- недостаточность детализации изменений;
- критичность в выборе спектрального диапазона («полос частот») для решения задачи обнаружения;
- интерактивное участие оператора в решении состава соответствующих задач.

К сожалению, альтернативный ему селективно-яркостный подход автоматического обнаружения изменений, основы которого заложены в [1], [8], [9], пока не нашел широкого распространения, очевидно, в силу ограниченного числа публикаций. В основе его лежало использование разности гистограмм сравниваемых изображений и переходы к пространственно-множественным представлениям возникших изменений. Уже на начальном уровне своего существования этот метод показал себя как более результативный и обеспечивающий достижения преследуемой цели – автоматического обнаружения. Дальнейшие его исследования позволили избежать отдельных методических несовершенств, связанных, например, с применением сглаживания разности гистограмм и определением интервалов изменений [1]. В результате удалось как отойти от ограничений непосредственной разности изображений, так и прийти к технологии, лишенной ряда предшествующих недостатков.

## 1 Детализированное пространственное описание изображений

Каким бы методом не решалась задача обнаружения изменений наземных объектов по данным разновременной спутниковой съемки, ее информационной основой являются изображения участка земной поверхности, содержащей эти объекты. Выполненные в ряде спектральных диапазонов, они обычно представляются как полутонные изображения, состоящие из оттенков серого цвета, имеющих непрерывное, плавное, скачкообразное изменение или участки постоянства.

Вполне очевидно, что минимально необходимым материалом для интересующего обнаружения является пара полутоновых изображений  $L_1(x, y)$ ,  $L_2(x, y)$  разновременной съемки контролируемого участка земной поверхности. В растровом представлении – это пара  $L_1(n_x, n_y)$ ,  $L_2(n_x, n_y)$ . Зрительно информационная часть каждого из них представляет собой **пятнисто-яркостную структуру** (рис. 1).

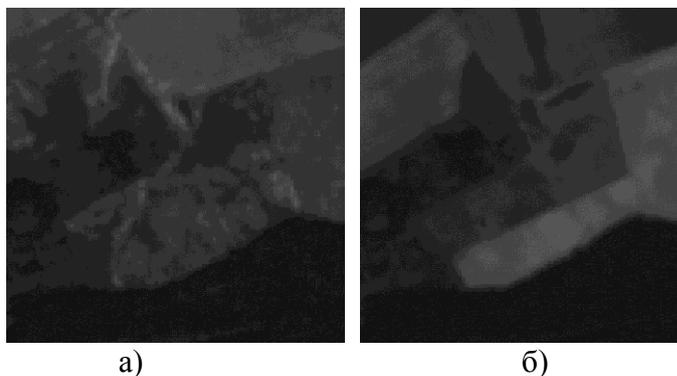


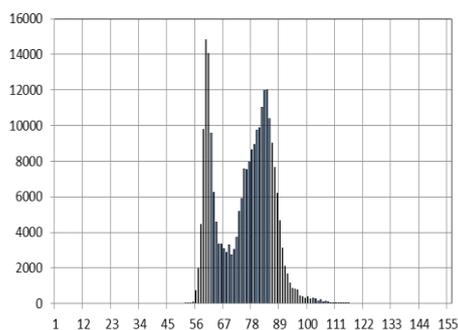
Рисунок 1 – Полутоновые изображения разновременной съемки (а – август, б – сентябрь) участка земной поверхности размером  $1050 \times 1050 \text{ м}^2$

Наблюдаемые здесь внутренние отличия структур каждого из пары разновременных изображений одного и того же участка вызваны произошедшими изменениями за время между их съемками:

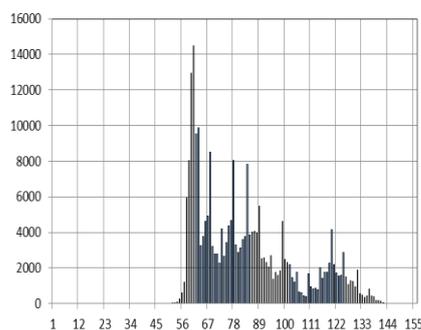
- отражающих свойств антропологических и природных объектов или их частей;
- упомянутых выше искажений, носящих случайный характер.

Интересующие отличия, в свою очередь, имеют природные или антропологические причины появления и отражаются в неравенстве площадей и яркостей отдельных пятен, образующих изображения.

Обобщающим математическим представлением рассматриваемых структур одного и второго изображений являются гистограммы  $H_1(L)$ ,  $H_2(L)$  (рис. 2), представляющие результат перехода от пространственно-яркостных распределений к яркостным.



а) Гистограмма изображения рисунка 1а



б) Гистограмма изображения рисунка 1б

Рисунок 2 – Гистограммы изображений рис. 1

Гистограмма  $H(L_i)$ , описывая распределение пикселей отображаемой поверхности по яркостям, и является **яркостным представлением** изображения. Отдельно взятый  $i$ -й столбец гистограммы содержит все пиксели ( $n_{\Sigma i}$ ) характеризуемого изображения:

$$H(L_i) = n_{\Sigma i}. \quad (1)$$

Этой яркостной характеристике в составе изображения соответствует пятно или некоторая пространственная совокупность пятен, пятнышек и точек, имеющих вполне определенные координаты составляющих их пикселей. Визуализация такого соответствия наиболее просто достигается в результате преобразования, состоящего в удалении из состава  $L_1(x, y)$  пикселей исходного изображения, яркость которых отлична от  $L_i$ :

$$L_i(n_x, n_y) = \begin{cases} L_i & \text{при } L_1(n_x, n_y) = L_i; \\ 0 & \text{при } L_1(n_x, n_y) \neq L_i. \end{cases} \quad (2)$$

В то же время, если отображаемая яркость в таком преобразовании задана заранее, то удобной для пространственных представлений рассматриваемой совокупности пикселей может быть бинаризация  $L_i(x, y)$ :

$$B_i(n_x, n_y) = \begin{cases} 1 & \text{при } L_1(n_x, n_y) = L_i; \\ 0 & \text{при } L_1(n_x, n_y) \neq L_i. \end{cases} \quad (3)$$

Рис. 3 демонстрирует результат такой бинаризации изображения яркости отдельно взятого значения гистограммы.



Рисунок 3 – Бинаризация одного значения гистограммы изображения

При этом в силу того, что каждому пикселю дискретного представления изображения соответствует участок земной поверхности, общее число их на яркости  $L_i$  пропорционально площади  $S_i$ . Аналогичные рис. 3 бинарные представления могут быть выполнены для всех яркостей гистограммы (всех пикселей каждой яркости). А так как каждое значение гистограммы соответствует пятну или пятнышкам, или точкам определенной яркости, то сумма всех пикселей в диапазоне регистрации ( $i = \overline{0, 255}$ ), как и сумма площадей всех пятен, пятнышек, точек, равна площади участка съемки (в пикселях):

$$\sum_{i=0}^{255} H(L_i) = \sum_{i=0}^{255} n_{\Sigma i} = \sum_{i=0}^{255} S_i = S_y.$$

Таким образом, раздельная бинаризация совокупности пикселей каждой ( $i$ -й) яркости гистограммы полутонового изображения представляет собой **детализированное пространственное описание** изображения.

## 2 Пространственно-яркостное описание наземных изменений участка съемки

Вполне очевидно, что минимально необходимым материалом для обнаружения наземных изменений является пара полутоновых растровых изображений  $L_1(n_x, n_y)$ ,  $L_2(n_x, n_y)$  разновременной съемки контролируемого участка земной поверхности. Физически информационная часть каждого из них представляет собой пятнисто-яркостную структуру (рис. 1).

Изображение более поздней текущей съемки  $L_2(n_x, n_y)$  по сравнению с предшествующей ей  $L_1(n_x, n_y)$  может содержать изменения на отдельных яркостях. В соответствии с этим пиксели гистограммы  $H_2(L)$  на каждой отдельно взятой яркости  $L$  могут относиться к трем категориям:

- пиксели, оставшиеся неизменными за время между съемками;
- пиксели, появившиеся за это же время (пиксели изменений);
- пиксели, исчезнувшие за прошедшее время (пиксели изменений).

Отсутствие на некоторой яркости пикселей второй категории должно соответствовать ситуации, когда изменения за время между съемками не возникли.

Как технология, процесс пространственно-яркостного обнаружения изменений наземных объектов состоит в оценке всех объективно возникших изменений, в число которых входят, как достоверные метаморфозы внешнего облика наземных объектов за время между съемками, так и регистрационные и естественные динамические изменения, носящие шумовой характер. Кроме того, в таком комплексе присутствуют искажения, вызываемые:

- ограниченной точностью геометрического и яркостного сведения (нормирования) разновременных изображений;
- всеми видами обработки этих изображений, предшествующей непосредственному выделению изменений.

Особенностью реализации рассматриваемой технологии является ограничение размеров сопоставляемых изображений. Применение разбиения изображения современной спутниковой съемки, имеющего большие пространственные размеры, во-первых, обеспечивает для частей его уменьшение числа:

- помеховых изменений;
- объектов изменений (детализация), нередко имеющих множественный характер для всего изображения и их территориальное разнесение в его пределах.

Во-вторых, как показали исследования [1], [10], любые разностные методы обнаружения изменений повышают свою эффективность с уменьшением площади анализируемого фрагмента.

Рассматриваемое разбиение немаловажно для организации периодической съемки некоторой территории, охватываемой одним снимком (мониторинг). Здесь, принимая во внимание возможность разной степени охвата этой территории от пролета к пролету спутника, всегда возникает желание использования любой из таких съемок. Это заставляет заранее интерактивно назначать область мониторинга (ОМ), а затем автоматически обнаруживать любые дискретно заданные части ее в каждом пролете для получения по ним необходимой информации.

Дискретная аппроксимация ОМ, состоящая в представлении ее множеством равных по размерам примыкающих и топографически привязанных к земной поверхности малых фрагментов [10], [11], избавляет от необходимости участия оператора в процессе автоматического фрагментарного поиска частей в составе изображения очередной съемки.

Таким образом, любой фрагмент изображения конкретной яркости, входящий в состав детализированного пространственного описания изображения текущей съемки, всегда имеет соответствующий ему фрагмент, заданный изображением предшествующей (опорной) съемки. Это и составляет основу для описания изменений в реализации разностных методов для определения изменений.

Чем меньше фрагменты, тем точнее аппроксимация и полнее автоматическое обнаружение области мониторинга или ее части в очередной съемке, а, следовательно, тем в большей степени удовлетворяются упомянутые выше условия для обнаружения полного состава изменений.

При этом пространственно-яркостное распределение как одного из них, так и другого представляет совокупность конкретных значений яркости. Каждому такому значению принадлежит своя площадь среди множества других, составляющих упомянутое распределение. Суммы этих площадей равны площадям земной поверхности, охваченным фрагментом изображения.

Описание процесса сопоставления площадей приводит к необходимости введения понятия компоненты изменений, определяемой как площадь изменений на заданной яркости.

Исходной точкой определения каждой компоненты изменений конкретной яркости является построение двух гистограмм  $H_1(L)$ ,  $H_2(L)$  фрагментов разновременных изображений  $L_1(x, y)$ ,  $L_2(x, y)$ . Первая из них – опорная, вторая – текущая. Как одна, так и другая представляют в компактной форме описания изображений одного и того же участка местности, подверженного изменениям. И то и другое изображения для исключения грубых ошибок ложного обнаружения, как и в любых других методах оценки интересующих изменений, должны иметь равные размеры, быть сведены друг с другом по яркостям и контрасту, а также по передаче геометрических пропорций отображаемого участка земной поверхности (геометрически скорректированы).

В итоге каждая из гистограмм позволяет найти пространственные распределения пикселей (элементарных участков отображаемой поверхности) по яркостям. Сумма этих участков (пикселей столбцов любой из гистограмм) пропорциональна площади сопоставляемых изображений местности. Каждый столбец гистограмм на общей яркости  $L_w$  для одного и другого фрагментов содержит число пикселей, пропорциональное площади отображаемого наземного участка на этой яркости:  $H_1(L_w)$ ,  $H_2(L_w)$  до и после изменений. Последовательное сравнение таких участков лежит в основе определения компонент изменений, а исходным для этого является столбец с минимальной яркостью гистограммы  $H_1(L_{\min})$  независимо от того, соответствует ли ему значимый столбец гистограммы  $H_2(L_{\min})$  или он отсутствует, то есть  $H_2(L_{\min}) = 0$ .

Для перехода к характеристикам изменений при сопоставлении площадей, отображаемых столбцами гистограмм на задаваемых яркостях  $L_w$ , достаточно восполь-

зоваться автоматически реализуемой бинаризацией соответствующих этим яркостям изображений фрагментов  $L_1(n_x, n_y)$ ,  $L_2(n_x, n_y)$ :

$$B_w^{(1)}(n_x, n_y) = \begin{cases} 1 & \text{при } L_1(n_x, n_y) \in L_w; \\ 0 & \text{при } L_1(n_x, n_y) \notin L_w; \end{cases}$$

$$B_w^{(2)}(n_x, n_y) = \begin{cases} 1 & \text{при } L_2(n_x, n_y) \in L_w; \\ 0 & \text{при } L_2(n_x, n_y) \notin L_w. \end{cases} \quad (4)$$

Получаемые бинарные изображения представляют собой не что иное, как описания пространственных положений площадей  $H_1(L_w)$ ,  $H_2(L_w)$  (пикселей) этой яркости до и после возможных изменений. Каждый их отдельно взятый единичный пиксель имеет соответствующий ему по координатам пиксель заданной яркости в составе исходного топографически привязанного изображения, то есть характеризуется конкретным положением. Одновременно эти изображения могут рассматриваться как множества.

При отсутствии отображаемых изменений за время между съемками на совпадающих местах (равные координаты) пространственно расположенными окажутся элементы (пиксели) равной яркости одного и другого множеств (1). В общем случае (наличие изменений), часть элементов по отношению к предшествующей съемке будет совпадающей, часть – полностью новой (вновь возникшей), а часть вообще может показаться исчезнувшей.

Логически очевидными действиями по обнаружению этих частей является применение к полученным изображениям-множествам операций пересечения и вычитания.

В частности, вторая операция определяет множество, отражающее интересные отличия, возникшие за время между съемками:

$$\Delta B_w(n_x, n_y) := B_w^{(2)}(n_x, n_y) / B_w^{(1)}(n_x, n_y). \quad (5)$$

Таким образом, определяемое здесь бинарное изображение-множество одной компоненты изменений на заданной яркости оказывается характеристикой несовпадений разновременных съемок. Все множество таких компонент, порожаемое всеми яркостями сопоставляемых гистограмм в диапазоне регистрации, представляет массив соответствующих бинарных изображений-множеств изменений объектов наземной съемки.

Внешнее представление об изображениях-множествах фрагмента на каждой яркости, как составляющих массива **MB**, может создать рис. 4.

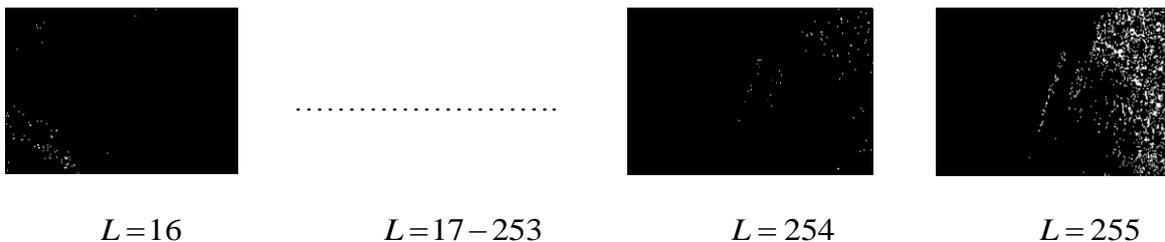


Рисунок 4 – Массив бинарных изображений-множеств потенциальных изменений

Следует сразу обратить внимание на то, что рисунок носит условный характер, так как реально целый ряд такого рода изображений имеет незначительное число пикселей компонент изменений (а может вообще их не содержать), что в допустимых масштабах рисунка статьи невозможно отобразить для зрительного восприятия.

Дополнением полученного пространственно-яркостного описания в виде массива изображений-множеств компонент изменений может служить массив легко определяемых сумм числа их пикселей  $MSB$ , пропорциональных площадям каждой из компонент:

$$S_w := \sum \Delta B_w(n_x, n_y) \cdot$$

В отличие от изображений компонент пространственных изменений массив площадей  $MSB$  легко представляется в виде, напоминающем гистограмму яркостей изображения (рис. 5).

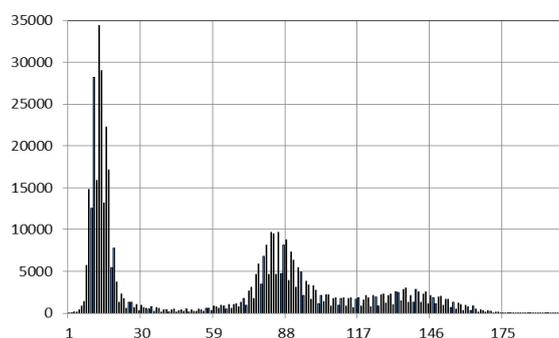


Рисунок 5 – Типичный вид массива площадей изображений-множеств компонент потенциальных изменений

В интересах полноты представлений следовало обратить внимание на то, что рассмотренная характеристика компоненты (2) и их массив на соответствующих им яркостях описывают только возрастание площадей возникших изменений. Поэтому, казалось бы, в качестве второй обязательной характеристики нужно было бы применить противоположную ей – разность множеств, выполненную в обратном порядке выражению. Это описывало бы «исчезновение» пространственно распределенной площади при изменениях на соответствующей яркости, но не более того.

На самом деле легко обнаружить, что необходимость в дополнительном описании отсутствует. Здесь, прежде всего, следует принять во внимание, что исчезновение части площади объекта съемки невозможно. Кроме того, достаточно легко найти и объяснение обсуждаемому «пропаданию». Рассматриваемая часть площади действительно характеризует изменения. Однако они произошли на яркости или яркостях, отличающихся от оцениваемой  $L_w$ . Поэтому полученный выше массив компонент изменений  $MB$  на других яркостях относительно анализируемой позволяет обнаружить ту часть интересующей компоненты, которая ошибочно могла быть отнесена к пропаданию. Причем теперь для соответствующего участка земной поверхности вместо уменьшения она будет характеризоваться возрастанием, приобретением площади. Рассматривать это явление можно, исходя из принципа сохранения площади объекта съемки при изменениях: *любому пропаданию площади с определенной яркостью соответствует приобретение ею или ее частями другой или других яркостей.*

В целом, характеризуя метод пространственно-яркостного описания потенциальных изменений, легко принять во внимание возможность автоматически реализуемого детального описания их для любого фрагмента съемки. Если же учесть, что каждая

космическая съемка Земли осуществляется одновременно в ряде спектральных диапазонов, то аналогично приведенному порядку расчетов, располагая парами изображения фрагментов (опорное, текущее), возможно автоматически в основных спектральных диапазонах (**R**, **G**, **B**) определить массивы компонент изменений каждого из них **MBR**, **MBG**, **MBB**. Такое описание составит пока отдельную, но более полную характеристику произошедших изменений.

### 3 Метод повышения достоверности обнаруживаемых изменений

Нельзя не обратить еще раз внимание на то, что полученная рассмотренным образом характеристика может относиться к изменениям, считающимся только потенциально относимыми к наземным объектам. В общем случае она наряду с отображением действительных изменений включает и те, которые связаны с упомянутыми выше ошибками.

В целях удаления недостоверных элементов-пикселей изображений-множеств из состава любой компоненты существует возможность автоматического пиксельного их анализа, обеспечивающего получение такого дополнительного параметра описания изменений, как относительная яркость. В основе этого определения лежат известная яркость  $L_w$  изменений (текущего изображения фрагмента) и совпадающая координатная привязка элементов-пикселей изображения-множества  $\Delta B_w(n_x, n_y)$  и опорного изображения фрагмента, а значит и соответствующая этим координатам яркость  $L_1(n_x, n_y)$ .

Располагая привязкой  $i$ -го элемента-пикселя  $n_{xi}, n_{yi}$  в составе соответствующего изображения-множества компоненты изменений с яркостью  $L_w$ , легко определить яркость его в составе изображения предшествующей съемки этого фрагмента и отсюда – интересующую относительную яркость:

$$\Delta L(n_{xi}, n_{yi}) := L_w - L_1(n_{xi}, n_{yi}). \quad (6)$$

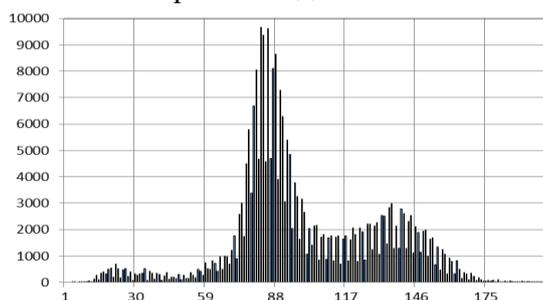
Таким образом, может быть автоматически установлен контраст пикселей всех компонент спектрально отличающихся массивов **MBR**, **MBG**, **MBB**.

Обращаясь к зрительному анализу изменений, как критерию истинности, можно понять, что даже при чрезвычайной тщательности его проведения ряд изменений обнаружить не удастся. Те или иные части изображения наблюдаемы зрительно с определенной пороговой яркости. Для автоматического обнаружения такая яркость ограничивается всеми видами мешающих воздействий. Поэтому, вводя порог достоверности  $\Delta L_{\text{д}}$ , обеспечивающий, например, минимум ложных тревог в обнаружении изменений, легко автоматически исключить из состава изображения-множества недостоверные элементы, не отдавая, однако, предпочтения отдельным незначительным по контрасту.

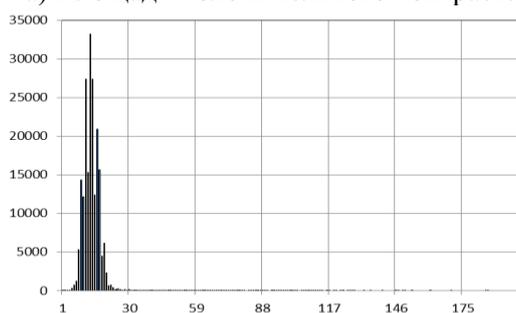
Принимая такую обработку как необходимый этап обнаружения изменений, реализация выполняемого процесса по отношению ко всем компонентам односпектральных массивов **MBR**, **MBG**, **MBB** позволяет преобразовать их из массивов потенциальных в массивы достоверных изменений.

## 4 Метод дихотомического деления массивов компонент изменений

Процесс последовательного анализа контраста компонент изменений в составе каждого из их односпектральных описаний с целью повышения достоверности предоставляет возможность параллельного решения задачи первого этапа классификации. Анализ контрастности, выполненный согласно (3), обеспечивает дихотомическое покомпонентное разделение каждого из полученных массивов **MBR**, **MBG**, **MBV** на два составляющих массива, отличающихся по знаку контраста. Происходит преобразование всех их в группу из шести массивов изображений-множеств. Основное их свойство – характеристика двух классов в пространстве анализируемых фрагментов. Легко понять, что изменения каждого из них не пересекаются в парах разного знака контраста, то есть имеют различное пространственное положение элементов. В соответствии со знаками относительной яркости они являются массивами положительного **MPBR**, **MPBG**, **MPBV** и отрицательного контраста изменений **MNBR**, **MNBG**, **MNBV**. Соответствующие им компоненты –  $\Delta PB_w^{(k)}(n_x, n_y)$ ,  $\Delta NB_w^{(k)}(n_x, n_y)$  вместо введенных выражением (3), а площади положительного **MPSBR**, **MPSBG**, **MPSBV** и отрицательного контрастов изменений **MNSBR**, **MNSBG**, **MNSBV** могут быть приведены в качестве зрительно воспринимаемых характеристик. На рис. 6 приведены массивы площадей компонент положительного и отрицательного контраста для изменений рис. 5 в одном из спектральных диапазонов.



а) Площади положительного контраста



б) Площади отрицательного контраста

Рисунок 6 – Пример разделения массива компонент односпектральных изменений

Можно заметить, что дихотомия здесь имеет физический смысл. Изменения с увеличением и уменьшением яркости объекта не могут иметь одну природу. Это разделение проявляет сходство с применяемым в [1], [2] формированием изображений возрастания и убывания относительной яркости для достаточно распространенного метода разности изображений, упоминаемого во введении к статье.

## 5 Метод определения порога достоверности изменений

Предлагаемое использование порога достоверности  $\Delta L_{\text{п}}$  как составляющей рассматриваемой технологии пространственно-яркостного обнаружения изменений, казалось бы, снижает ее желаемую ценность, ведет к приобретению одного из тех недостатков, которые характерны для многих известных методов обнаружения изменений. В то же время ситуация от рассматриваемых, например в [7], теперь существенно отличается по ряду причин. Прежде всего, это ограничение размеров сопоставляемых изображений стандартизованными фрагментами аппроксимации некоторой области мониторинга. Отсюда и создаются условия автоматического сопоставления большого числа фрагментов и оценки порога путем применения повторной космической съемки интересующей территории с минимально возможным временным разрешением. Обеспечивая высокую вероятность отсутствия наземных изменений за время между съемками, рассмотренный выше процесс обработки фрагментов приводит к тому, что все получаемые оценки контраста изменений допустимо относить к шумам регистрации и ошибкам подготовительной обработки изображений.

Одновременно определение относительных яркостей компонент изменений согласно (3) обуславливает получение достаточно больших объемов статистических данных о контрасте каждого пикселя-элемента всех компонент указанных массивов. Так, для фрагмента изображений размером  $1000 \times 1000 \text{ м}^2$  при пространственной разрешающей способности съемки 1 м этот объем окажется равным 1000000 респондентов. То есть, уже по одному фрагменту области мониторинга, отвлекаясь пока от репрезентативности, открывается возможность статистической оценки порога, например, по критерию Неймана-Пирсона [12]. Если же учесть при этом разнообразие ландшафтов даже в пределах одного фрагмента, а обработку вести по множеству их, описывающему изменения области мониторинга в целом (объем выборки, превышающий в десятки раз приведенное выше значение), то уже трудно отказаться от того, чтобы считать используемую выборку репрезентативной. Не стоит при этом даже упоминать о возможности дополнительных настроечных разновременных съемок такого же рода и перспективах корректировки порога по мере необходимости.

Не вызывает сомнений, что рассмотренный подход в определении порога может найти применение и для совершенствования уже привычных методов. Однако, нельзя упускать из виду тот факт, что пространственно-яркостное обнаружение изменений обладает целым рядом дополнительных возможностей, отражающих их преимущества.

## 6 Метод спектральной декомпозиции комплексов изменений

Формирование шести массивов изображений-множеств изменений позволяет отказаться от рассмотрения отдельных компонент и образовать попарно шесть комплексов-множеств изменений положительного и отрицательного контраста:

$$CPK(n_x, n_y) := \bigcup \Delta PB_w^{(k)}(n_x, n_y); \quad (7)$$

$$CNK(x, y) := \bigcup \Delta NB_w^{(k)}(x, y),$$

где  $K$  – в составе обозначений комплексов и  $k$  – в индексах разностных изображений-множеств присутствуют как признаки принадлежности вводимых характеристик спектральному диапазону съемки ( $k=1$  для  $R$ -диапазона,  $k=2$  для  $G$ -диапазона,  $k=3$  для  $B$ -диапазона);

$\Delta PB_w^{(k)}(n_x, n_y)$ ,  $\Delta NB_w^{(k)}(n_x, n_y)$  – соответствуют выражению (3), но сопровождаются отнесением к множествам положительного ( $P$ ) и отрицательного ( $N$ ) контрастов и спектральному диапазону.

Полученное объединение контрастов (4) в виде 6-и комплексов  $CP1(n_x, n_y)$ ,  $CN1(n_x, n_y)$ ,  $CP2(n_x, n_y)$ ,  $CN2(n_x, n_y)$ ,  $CP3(n_x, n_y)$ ,  $CN3(n_x, n_y)$  характеризует спектрально, но отдельно все изменения каждого анализируемого фрагмента разновременных съемок.

В то же время физически очевидно, что любое наземное изменение объекта отличается свойственными ему не отдельно взятыми спектральными составляющими (4) отражением света. В общем случае очевидна возможность частичного или полного пространственного совпадения отличающихся односпектральных описаний. Выполненное формирование комплексов отдельных компонент изменений и их пространственное представление позволяют перейти к совместному спектральному описанию изменений, выполнив декомпозицию изображений-множеств комплексов (4), основанную:

- на координатном пространственном совпадении любого из односпектральных комплексов в целом или отдельной его части с одинаковым по расположению другим односпектральным комплексом или его частью того же контраста (то есть образование двухспектральных сегментов изменений);
- на таком же пространственном совпадении любого из вновь образованных двухспектральных сегментов или их отдельных частей с односпектральными сегментами отличающихся спектральных диапазонов совпадающего контраста (выделение трехспектральных сегментов изменений);
- на полном несовпадении одинаковых по спектральному составу комплексов, но разных по знаку контраста;
- на совпадении одно- и двухспектральных комплексов, разных по знаку контраста;
- на возможности алгоритмически простого определения площадей возникающих пространственных совпадений;
- на реализации проверки рассматриваемого пространственного совпадения образованием пересечений изображений-множеств комплексов изменений:

$$DPRG := CP^{(2)} \cap CP^{(3)}; \quad DPRGB := DPRG \cap CP^{(4)};$$

$$DPRB := CP^{(2)} \cap CP^{(4)}; \quad DPNRG := CP^{(2)} \cap CN^{(3)} \quad \text{и т.д.}$$

Здесь обозначения комплексов, дополненные литерой  $D$ , соответствуют выполненной декомпозиции. При этом односпектральные сегменты декомпозиции образуются как остаточные части односпектральных комплексов, не имевшие взаимных пересечений.

С рассмотренных позиций можно показать, что, выполняя пересечения односпектральных комплексов-множеств, в общем случае образуется до 26 сегментов (6-односпектральных, 12-двухспектральных, и 8-трехспектральных), каждый из которых уже готов представлять собой обнаруженный объект наземных изменений рассматриваемого фрагмента.

Конечно, в силу той же физической разнообразности изменений естественно, что в процессе спектральной декомпозиции возникают и пустые множества. Индикатором их являются определяемые площади сегментов. Исключение таких множеств из последующего рассмотрения не представляет трудностей. В целом же спектральная декомпозиция комплексов изменений – это второй этап классификации обнаруженных изменений, обеспечивающий обнаружение объектов, отличающихся не только по контрасту, но и по спектральному описанию.

## 7 Метод разновременной NDVI-классификации многоспектральных объектов изменений

Выполненное спектральное выделение классов, сначала – контрастно отличных, затем – непустых многоспектральных сегментов изменений открывает возможность дальнейшей декомпозиции их с применением классификации отдельных спектральных образований. Соответствующий метод может строиться на принципах разновременного вегетационного сравнения. Возможность для него открывает включение в состав многоспектральных спутниковых съемок ближнего инфракрасного диапазона (**IR**). При известных координатах каждого пикселя в спектрально законченных описаниях сегментов изменений не возникает проблем в получении опорного и текущего фрагментов **IR**-диапазона, совпадающих по пространственному положению с основными спектральными диапазонами (**R**, **G**, **B**) и их комбинациями. В основу метода могут быть положены особенности нормализованного разностного вегетационного индекса (**NDVI**) в отражении состояний растительности и в постоянстве его значений для объектов, не связанных с ее развитием. Приводимые во многочисленных источниках данные по **NDVI** могут быть положены в основу классификации одномоментной съемки и охватывают согласно [13] следующие классифицируемые состояния:

- густая растительность ( $NDVI=0, 7$ );
- разряженная растительность ( $NDVI=0, 5$ );
- открытая почва ( $NDVI=0,025$ );
- облака ( $NDVI=0$ );
- снег, лед ( $NDVI= - 0, 05$ );
- вода ( $NDVI= - 0, 25$ );
- искусственные материалы (бетон, асфальт) ( $NDVI= - 0, 5$ ).

При этом каждое из этих состояний характеризуется постоянным, а, возможно, и среднестатистическим значением **NDVI**. Уже отсюда очевидно, что присутствие одного из признаков (например, вода) для объекта фрагмента опорной съемки и появление другого признака (например, почва) для того же объекта на изображении фрагмента текущей съемки создает представление о произошедших в его облике изменениях.

Если же обратить внимание не на детерминированность рассмотренных показателей, а физически имеющие место переходные процессы изменений вегетационных состояний, то удастся назначить интервалы **NDVI** для целого ряда типичных изменений в пределах установленных признаков. Причем каждая пара таких интервалов для разновременных опорной и текущей съемок должна соответствовать одному из следующих классов разновременно обнаруживаемых изменений:

- прогресс вегетации;
- регресс вегетации;
- срыв вегетации (обнажение грунта).

Тогда, производя пиксельный анализ **NDVI** образованных спектральных сегментов изменений на принадлежность интервалам опорной и текущей съемок, удастся выполнить их декомпозицию с разделением на классы объектов, физически отличающиеся друг от друга. Причем, выполняемому анализу для объектов растительности должны подвергаться трехспектральные и двухспектральные сегменты, содержащие одновременно две составляющие: зеленую (**G**) и красную (**R**).

В частности, на рис. 7 приведена пара сопоставляемых фрагментов и ее классифицированные изображения-множества **RGB**-объектов положительного и отрицательного контраста.

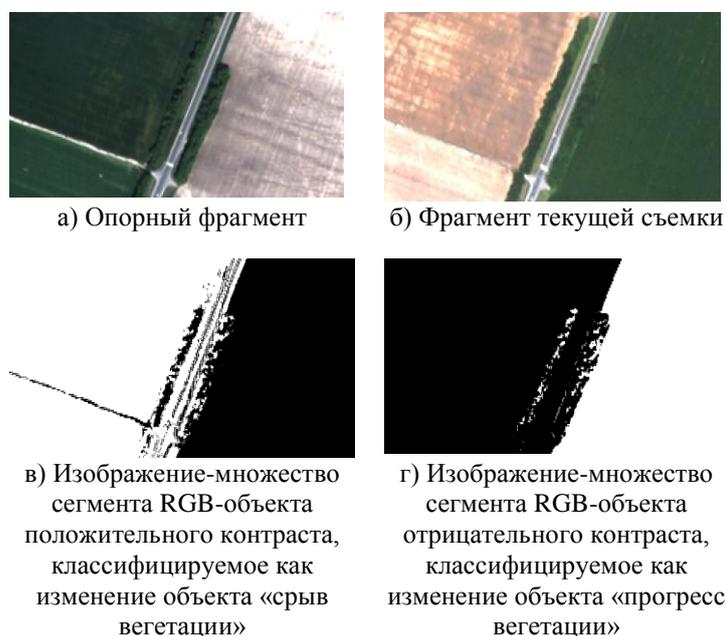


Рисунок 7 – Пример декомпозиции с одновременной *NDVI*-классификацией

Для декомпозиции, основанной фактически на одновременной *NDVI*-классификации объектов водных пространств (участок высыхания, затопления) либо антропогенных объектов (появление, исчезновение), должны использоваться сегменты, содержащие обязательно красную спектральную составляющую, но не имеющие зеленой, то есть односпектральные **R**- и **RB**-сегменты.

В силу рассмотренных особенностей **GB**-, **G**-, и **B**-сегменты спектральной декомпозиции окажутся сегментами изменений, которые не могут быть подвергнуты одновременной *NDVI*-классификации. Для них открыты возможности поиска других способов на пути дальнейшего совершенствования изложенной технологии.

В частности, достаточно очевидно, что некоторые из сегментов такого спектрального состава могут соответствовать как вполне самостоятельным образованиям-изменениям, так и принадлежащим уже классифицированным трехспектральным объектам. Примером тому является присутствие грунта среди разреженной вегетирующей растительности в виде отдельной отражающей солнечный свет составляющей. Поэтому исключение одного из двух возможных здесь альтернативных решений (относятся к участкам вегетационных изменений или не относятся) является оценка принадлежности **GB**-, **G**-, и **B**-сегментов классифицированным **RGB**- или **RG**-объектам.

Препятствием для таких оценок в соответствии с принципами декомпозиции является непересекаемость всех образованных многоспектральных сегментов изменений (в том числе **GB**, **G**, и **B** с **RGB** и **RG**). Отсюда решением по его преодолению может быть использование предварительной морфологической обработки изображений-множеств изменений, к которым ищется принадлежность упомянутых выше сегментов спектральных объединений. Осуществима она путем заполнения промежутков в пиксельной структуре изображений-множеств **RGB**- или **RG**-объектов для обеспечения интересующей выше территориальной принадлежности к ним **GB**-, **G**-, и **B**-сегментов.

С этой целью может быть применена дилатация [], для реализации которой размеры структурирующего элемента достаточно просто ввести по оценке максимальных взаимных расстояний между элементами соответствующих изображений-множеств рассмотренной принадлежности.

## Заключение

Представленное пространственно-яркостное обнаружение изменений имеет все признаки технологии, объединяя методы:

- пространственно-яркостного описания изменений наземных объектов;
- повышения достоверности обнаруживаемых изменений;
- дихотомического деления массивов изменений;
- определения порога достоверности изменений;
- спектральной декомпозиции комплексов изменений;
- разновременной *NDVI*- декомпозиции с классификацией.

Наряду с ними в состав рассмотренной технологии следовало бы включать:

- методы пиксельного устранения геометрических отличий в передаче пропорций земной поверхности изображениями разновременной спутниковой съемки;
- метод автоматического выравнивания контраста и яркостей изображений.

Без предшествующей их реализации невозможно решать задачи изложенной технологии. В то же время эти методы давно и широко используются. Причем им уделялось и уделяется достаточное внимание в журнальных статьях и монографиях. Они оказываются и реализуемыми в автоматическом режиме, как, например [14], в сведении яркостей. В то же время, их следовало считать относящимися к обработке изображений, предшествующей обнаружению изменений. Это и позволило, не касаясь их, сосредоточить внимание статьи непосредственно на реализации предлагаемого пространственно-яркостного обнаружения изменений.

Что касается автоматической реализации взаимосвязанных составляющих рассмотренной технологии в целом, то согласно логической и алгоритмической определенности соответствующих описаний, она не представляет трудностей. Одновременно легко убедиться в том, что проведенные решения устраняют зависимость, характерную традиционно применяемым методам обнаружения изменений, от трудностей выбора порога, детализации изменений, критичности к выбору спектрального диапазона, интерактивных действий оператора и др.

В то же время отмеченные в статье ограничения третьего этапа декомпозиции с классификацией изменений объектов наземной съемки, не содержащих красной спектральной составляющей, заставляют считать ее частичной. Причем, не только в связи с неполным охватом *NDVI*-классификацией объектов всех спектральных составов, но и с отсутствием тематической привязки в обнаружении изменений. Поэтому разновременная *NDVI*-классификация не представляется конечным этапом классификации вообще. Так, (классифицированный срыв вегетации для такого объекта, как поле сельскохозяйственных растений, может означать завершение уборки урожая между съемками, а может быть и следствием гибели растений, например, от вредителей, града и т.п. В лесном массиве такое же решение (срыв вегетации) несет информацию, как о произошедшем или происходящем пожаре, так и о незаконных вырубках или уничтожении части леса вредителями. Отсюда рассмотренная классификация многоспектральных сегментов, расширяющая возможности технологии обнаружения изменений, может считаться начальной, рассчитанной на ее тематическое продолжение.

## Список литературы

1. Белозерский Л. А. Разностные представления в обнаружении изменений внешнего облика наземных объектов разновременной космической съемки оптического диапазона: монография; под ред. Чл.-корр. НАН Украины А. И. Шевченко [Текст] / Л. А. Белозерский [и др.]. – Донецк : «Наука и образование», 2013. – 436 с.
2. Change analyst. [Текст] / Charles G. O'Hara, Anil Cheriyaad, Suyoung Seo, Veeraraghavan Vijayaraj. – Патент США № 8160296 B2, публикация 17.04.2012.
3. Токарева О. С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие [Текст] / О. С. Токарева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 140 с.
4. Ilsever M. Two-Dimensional Change Detection Methods. Remote Sensing Applications [Текст] / M. Ilsever, C. Ünsalan // Springer Briefs in Computer Science. – 2012 – P. 72.
5. Сагалович В. Н. Обнаружение изменений на земной поверхности по разновременным мульти-спектральным изображениям [Текст] / В. Н. Сагалович, Э. Я. Фальков, Т. И. Царева // «Исследования Земли из космоса». – 2008. – № 5. – С. 37–41.
6. Серов А. В. Методика мониторинга первичных экосистем Севера на основе данных дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] / А. В. Серов // Проект ПРООН/ГЭФ 00059042 г. Сыктывкар, 2010 г. – Режим доступа: [http://www.tmap.su/assets/material/articles/Medodika\\_monitoringa.pdf](http://www.tmap.su/assets/material/articles/Medodika_monitoringa.pdf).
7. Lu D. Change detection techniques [Текст] / D. Lu, P. Mausel, E. Brondizio, E. Moran // Int. J. Remote Sensing. – 2004. – Vol. 25, No. 12. – 2365–2407 p.
8. Белозерский, Л. А. Способ автоматического разностно-гистограммного обнаружения и визуализации изменений наземного объекта посредством разностных гистограмм [Текст] / Л. А. Белозерский, Л. В. Орешкина. – Патент на изобретение РБ № 21570 от 15.10.2014 г.
9. Belozerskii L. A. Estimation of the Informative Content of Histograms of Satellite Images in the Recognition of Changes in Local Objects [Текст] / L. A. Belozerskii, L. V. Oreshkina // Pattern Recognition and Image Analysis. – Vol. 20, No 1. – 2010. – S. 65–72.
10. Орешкина Л. В. Алгоритмы обработки изображений в задачах постоянного спутникового мониторинга объектов земной поверхности [Текст] / Орешкина, Л. В. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2014.
11. Орешкина Л. В. Автоматизация построения области детального контроля в информационных системах поддержки мониторинга Земли [Текст] / Л. В. Орешкина, Л. А. Белозерский, Н. И. Мурашко // Наука и технологии в промышленности. – 2015. – № 4. – С. 38–42.
12. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления [Текст] / В. С. Пугачев. – Москва : ГИФМЛ, 1960. – 883 с.
13. Дубинин М. NDVI-теория и практика. Теоретические основы использования индекса NDVI / М. Дубинин. – GIS-LAB. Последнее обновление: 2014-06-08 19:07 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.
14. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений Перевод с английского под ред. П. А. Чочиа [Текст] / Гонсалес Р. – Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2006. – 1072 с.
15. Белозерский Л. А. Способ сведения яркостей изображений объектов разновременной космической съемки [Текст] / Л. А. Белозерский, Л. В. Орешкина. – Патент РБ №16703 от 20.07.2012 г.
16. Belozersky L. A. Automatic Control and Correction of Automatically Placed Points Position for Geometric Matching of Satellite Survey Images Taken at Different Times [Текст] / L. A. Belozerskii // Проблемы искусственного интеллекта. – 2017. – № 1 (4). – С. 3–15.

## References

1. Belozerskiy, L. A. *Raznostnyye predstavleniya v obnaruzhenii izmeneniy vneshnego oblika nazemnykh ob"yektov raznovremennoy kosmicheskoy s"yemki opticheskogo diap*
2. *azona*: monografiya; pod red. Chl.-korr. NAN Ukrainy A. I. Shevchenko [Difference representations in the detection of changes in the external appearance of ground objects of multi-temporal space survey of the optical range], Donetsk, «Наука i obrazovaniye», 2013, 436 s.
2. Charles G. O'Hara, Anil Cheriyaad, Suyoung Seo, Veeraraghavan Vijayaraj. *Change analyst*. Patent SSHA № 8160296 B2, publikatsiya 17.04.2012.
3. Tokareva, O. S. *Obrabotka i interpretatsiya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli: uchebnoye posobiye* [Processing and interpretation of Earth remote sensing data: textbook], Toms, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010, 140 s.
4. Ilsever M., Ünsalan C. Two-Dimensional Change Detection Methods. Remote Sensing Applications. *Springer Briefs in Computer Science*, 2012, P. 72.

5. Sagalovich V. N., Fal'kov E. Ya., Tsareva T. I. Obnaruzheniye izmeneniy na zemnoy poverkhnosti po raznovremennym mul'ti-spektral'nym izobrazheniyam [Detection of changes on the earth's surface by multi-temporal multi-spectral images]. *«Issledovaniye Zemli iz kosmosa»* ["Research of the Earth from space"], 2008, No. 5, pp. 37–41.
6. Serov, A. V. Metodika monitoringa pervichnykh ekosistem Severa na osnove dannykh dantsionnogo zondirovaniya Zemli [Methods of monitoring primary ecosystems of the North based on data of remote sensing of the Earth]. *Proyekt PROON/GEF 00059042 g. Syktyvkar, 2010 g*, Rezhim dostupa: [http://www.tmap.su/assets/material/articles/Medodika\\_monitoringa.pdf](http://www.tmap.su/assets/material/articles/Medodika_monitoringa.pdf).
7. Lu D., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques. *Int. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, No. 12, pp.2365–2407
8. Belozerskiy, L. A., Oreshkina V. Sposob avtomaticheskogo raznostno-gistogrammnogo obnaruzheniya i vizualizatsii izmeneniy nazemnogo ob'yekta posredstvom raznostnykh gistogramm [Method of automatic differential-histogram detection and visualization of changes in a ground object by means of differential histograms]. *Patent na izobreteniyе RB № 21570 ot 15.10.2014 g* [Patent for invention of the Republic of Belarus No. 21570 dated 15.10.2014].
9. Belozerskiy L. A. Oreshkina L. V. Estimation of the Informative Content of Histograms of Satellite Images in the Recognition of Changes in Local Objects. *Pattern Recognition and Image Analysis*, Vol. 20, No 1, 2010, pp. 65–72.
10. Oreshkina, L. V. *Algoritmy obrabotki izobrazheniy v zadachakh postoyannogo sputnikovogo monitoringa ob'yektov zemnoy poverkhnosti* [Image processing algorithms in the tasks of continuous satellite monitoring of objects on the earth's surface], Minsk, OIPI NAN Belarusi, 2014.
11. Oreshkina L. V., Belozerskiy L. A., Murashko N. I. Avtomatizatsiya postroyeniya oblasti detal'nogo kontrolya v informatsionnykh sistemakh podderzhki monitoringa Zemli [Automation of the construction of the area of detailed control in information systems to support monitoring of the Earth]. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and technology in industry], 2015, No 4, pp. 38–42.
12. Pugachev V. S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i yeye primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of random functions and its application to problems of automatic control], Moskva, GIFML, 1960, 883 s.
13. Dubinin, M. *NDVI-teoriya i praktika. Teoreticheskiye osnovy ispol'zovaniya indeksa NDVI* [NDVI-theory and practice. Theoretical foundations of using the NDVI index] GIS-LAB. Posledneye obnovleniye: 2014-06-08 19:07 [Elektronnyy resurs], Rezhim dostupa : <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.
14. Gonsales R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* Perevod s angliyskogo pod red. P. A. Chochia [Digital Image Processing, Moskva,: TEKHNOFERA, 2006, 1072 s.
15. Belozerskiy, L. A., Oreshkina L. V. *Sposob svedeniya yarkostey izobrazheniy ob'yektov raznovremennoy kosmicheskoy s'yemki* [A method of reducing the brightness of images of objects of different time space survey], Patent RB No. 16703 ot 20.07.2012 g.
16. Belozerskiy L. A. Automatic Control and Correction of Automatically Placed Points Position for Geometric Matching of Satellite Survey Images Taken at Different Times. *Problemy iskusstvennogo intellekta* [Problems of artificial intelligence], 2017, No. 1 (4), pp. 3–15.

## RESUME

*L. A. Belozerskiy*

### *Automatic Spatial and Brightness Detection of Changes of Land Objects by Space Shooting Occurring at Different Times Technology*

During several decades of development of remote sensing of the Earth, a large number of methods for detecting changes have been developed. In recent years, their composition has not been replenished, but none of them is optimal and applicable to all cases.

The presented spatial-brightness detection of changes has all the features of technology, combining methods: spatial-brightness description of changes in ground objects; increasing the reliability of detected changes; dichotomous division of arrays of changes; determining the threshold for the reliability of changes; spectral decomposition of complexes of changes; multi-temporal NDVI-decomposition with classification; methods of pixel elimination of geometric differences in the transmission of proportions of the earth's surface by images of multi-temporal satellite imagery; a method for automatically aligning the contrast and brightness of images.

Without their previous implementation, it is impossible to solve the problems of the described technology. At the same time, these methods have been widely used for a long time. Moreover, they have been and are given sufficient attention in journal articles and monographs. They also turn out to be realized in automatic mode, in the reduction of brightness. At the same time, they were to be considered as related to image processing preceding change detection. This made it possible, without touching them, to focus the article's attention directly on the implementation of the proposed spatial-brightness detection of changes.

The limitations of the third stage of decomposition noted in the article with the classification of changes in ground survey objects that do not contain the red spectral component, makes us consider it partial. Not only in connection with the incomplete coverage of the NDVI classification of objects of all spectral compositions, but also with the lack of thematic reference in the detection of changes.

## РЕЗЮМЕ

*Л. А. Белозерский*

*Технология автоматического пространственно-яркостного обнаружения изменений наземных объектов разновременной спутниковой съемки*

В течение нескольких десятилетий развития дистанционного зондирования Земли создано большое число методов обнаружения изменений. В последние годы состав их не пополняется, но ни один из них не является оптимальным и применимым ко всем случаям.

Представленное пространственно-яркостное обнаружение изменений имеет все признаки технологии, объединяя методы: пространственно-яркостного описания изменений наземных объектов; повышения достоверности обнаруживаемых изменений; дихотомического деления массивов изменений; определения порога достоверности изменений; спектральной декомпозиции комплексов изменений; разновременной NDVI-декомпозиции с классификацией; методы пиксельного устранения геометрических отличий в передаче пропорций земной поверхности изображениями разновременной спутниковой съемки; метод автоматического выравнивания контраста и яркостей изображений.

Без предшествующей их реализации невозможно решать задачи изложенной технологии. В то же время эти методы давно и широко используются. Причем им уделялось и уделяется достаточное внимание в журнальных статьях и монографиях. Они оказываются и реализуемыми в автоматическом режиме, в сведении яркостей. В то же время, их следовало считать относящимися к обработке изображений, предшествующей, обнаружению изменений. Это и позволило, не касаясь их, сосредоточить внимание статьи непосредственно на реализации предлагаемого пространственно-яркостного обнаружения изменений.

Отмеченные в статье ограничения третьего этапа декомпозиции с классификацией изменений объектов наземной съемки, не содержащих красной спектральной составляющей, заставляет считать ее частичной. Не только в связи неполным охватом NDVI-классификацией объектов всех спектральных составов, но и с отсутствием тематической привязки в обнаружении изменений.

Статья поступила в редакцию 08.04.2021.