

## Обнаружение слаборазличимых антропогенных изменений растительного покрова по мультиспектральным разновременным изображениям

С. М. Борзов\*, С. Б. Узилов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

\*Контактный e-mail: borzov@iae.nsk.su

Работа посвящена исследованию и развитию попиксельного метода обнаружения на изображения слаборазличимых изменений, вызванных антропогенным воздействием. Метод заключается в нормализации изображений на основе поблочного согласования гистограмм, а также построении картосхемы изменений на основе анализа так называемых диаграмм рассеяния, отображающих распределение яркости пикселей каждого бина гистограммы в разновременных изображениях. Показано, что наиболее существенными факторами, приводящими к ложным обнаружениям при поиске слаборазличимых изменений, являются локальные атмосферные искажения, вызванные наличием дымки или мелких облаков, а также естественные изменения состояния лиственной растительности, связанные с погодными условиями. Для повышения эффективности поиска предложен алгоритм анализа результатов попарных сравнений изображений при обработке временных рядов данных.

*Ключевые слова:* обработка спутниковых изображений, обнаружение изменений, выборочная рубка леса.

### Введение

Полезность лесной экосистемы для человека не ограничивается древесиной, она также оказывает огромное влияние на окружающую среду и имеет существенное социальное значение. Однако ситуация с охраной лесов в России очень тревожная. По оценкам Федерального агентства лесного хозяйства, в России незаконно вырубается не менее 19 млн кубометров древесины в год. По мнению большинства независимых экспертов, реальная цифра значительно выше. Причем наиболее интенсивно вырубается легкодоступные, наиболее близкие к населенным пунктам (и поэтому наиболее ценные) лесные массивы. Чтобы изменить ситуацию, необходимо в первую очередь создать систему оперативного обнаружения таких рубок. В качестве основного источника информации о состоянии и динамике лесов следует рассматривать дистанционные, и в особенности спутниковые, наблюдения. Использование данных таких наблюдений обеспечивает не достижимые другими средствами мониторинга достоверность и оперативность.

Показано, что с учетом имеющихся спектральных каналов, пространственного разрешения, площади покрытия и частоты пролета спутника над одной и той же территорией для мониторинга лесных массивов наиболее подходят изображения со спутника SPOT [1] (каналы: зеленый (G) — 0.50–0.59, красный (R) — 0.61–0.68, ближний инфракрасный (NIR) — 0.79–0.89, коротковолновый инфракрасный (SWIR) — 1.58–1.75, ширина полосы съемки 60 км). При этом для оценки количества и состояния растительности традиционно используются вегетационные индексы [2]. Однако при выявлении характерных для густонаселенных территорий выборочных рубок такой подход оказывается недостаточно эффективным. Специфика проведения выборочных рубок связана с тем, что растительность убирается не полностью [3]. Это могут быть как санкционированные рубки ухода, при которых убираются нежелательные деревья и создаются благоприятные условия для роста лучших пород, так и незаконная рубка лучшего леса с целью его реализации. Зачастую выборочная вырубка деловой древесины не приводит к уменьшению значения вегетационного индекса. Это связано с тем, что после спиливания старой сосны на ее месте открывается более молодой подлесок или травяной покров и в результате значение вегетационного индекса для данного участка нередко даже увеличивается. С другой стороны, уменьшение вегетационного индекса может быть вызвано изменением погодных условий. Причем в условиях сложного рельефа такие изменения вполне могут носить локальный характер. По этой причине основным показателем проведения таких рубок является увеличение составляющей излучения, обусловленной отражением от открытых почв и участков вскрытого грунта. Соответственно наиболее информативными являются красный (R) и коротковолновый инфракрасный (SWIR) каналы спутника SPOT.

К сожалению, получить реальные подтвержденные данные о рубках (их точное положение и сроки проведения) на контролируемой территории за необходимый период времени в настоящее время невозможно. Поэтому в работе задача предлагаемого алгоритма формулируется не как достоверное обнаружение рубок, а как автоматизация процесса обнаружения участков, требующих обследования на местности. Соответственно, результаты поиска с применением разработанных программно-алгоритмических средств сравниваются с картосхемой изменений, сформированной оператором при визуальном анализе изображений, а не с реальной, подтвержденной исследованиями на местности картой рубок.

## **1. Попарное сравнение разновременных изображений для обнаружения слаборазличимых изменений**

При попарном сравнении разновременных изображений контролируемой территории для обнаружения слаборазличимых изменений на поверхности предлагается применять попиксельный разностный метод, использующий нормализацию изображений на основе поблочного согласования гистограмм [4] и оценку согласованности изменения во времени одинаковых по яркости пикселей изображения [5].

Алгоритм обработки состоит из следующих этапов [6]:

- геометрическое согласование разновременных изображений;
- поблочное гистограммное согласование поканальных яркостей разновременных изображений;

- построение картосхемы изменений на основе поблочного формирования и анализа диаграмм изменения яркости.

На первом этапе с использованием средств ГИС выполняются пространственное совмещение разновременных спутниковых изображений и их преобразование в одну из стандартных картографических проекций. Далее осуществляется попарное линейное согласование динамического диапазона яркости разновременных изображений. С этой целью изображения разбиваются на блоки определенного размера и в каждом из блоков рассчитывается среднее значение  $\mu$  и среднеквадратическое отклонение яркости  $\sigma$ . Размер блока определяется исходя из размеров характерных площадей изменений. Затем для каждого изображения путем билинейной интерполяции полученных значений для блоков формируются массивы  $\mu(x, y)$  и  $\sigma(x, y)$ , где  $x, y$  — координаты пикселей изображений. Динамические диапазоны яркости двух сравниваемых изображений  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$  согласовываются с применением преобразования

$$\tilde{I}_2(x, y) = \frac{\sigma_1(x, y)}{\sigma_2(x, y)} [I_2(x, y) - \mu_2(x, y)] + \mu_1(x, y),$$

где  $\tilde{I}_2(x, y)$  — преобразованное по динамическому диапазону изображение  $I_2(x, y)$ . Данная процедура позволяет устранить имеющиеся отличия изображений, вызванные изменением условий освещения и параметров регистрирующей аппаратуры.

Формирование картосхемы изменений осуществляется также поблочно на основе сравнения соответствующих фрагментов изображений  $I_1(x, y)$  и  $\tilde{I}_2(x, y)$ . С этой целью строятся и анализируются двумерные диаграммы изменения яркости  $P(i, j)$ , отображающие количество пикселей  $n$ , которые в изображении  $I_1(x, y)$  имеют яркость  $i$ , а в  $\tilde{I}_2(x, y)$  — яркость  $j$ . Каждое сечение  $i$  такой диаграммы представляет собой распределение яркости отсчетов в  $\tilde{I}_2(x, y)$ , имеющих яркость  $i$  в  $I_1(x, y)$ . Перпендикулярное же сечение  $j$  представляет собой распределение яркости отсчетов в  $I_1(x, y)$ , имеющих яркость  $j$  в  $\tilde{I}_2(x, y)$ . Для каждого уровня яркости  $i$  изображения  $I_1(x, y)$  по сформированной диаграмме изменения яркости  $P(i, j)$  выполняется следующая процедура.

- В  $\tilde{I}_2(x, y)$  рассчитывается распределение яркости пикселей, имеющих яркость  $i$  в  $I_1(x, y)$  (гистограмма прямого разброса).
- По этой гистограмме находится наиболее часто встречающаяся яркость и в  $I_1(x, y)$  рассчитывается распределение яркости пикселей, имеющих данную яркость в  $\tilde{I}_2(x, y)$  (гистограмма обратного разброса).
- По гистограмме обратного разброса определяется ширина полуспада в сторону увеличения яркости для почвенных каналов.
- По гистограмме прямого разброса выделяются пиксели, отклонившиеся от максимума более чем на удвоенную ширину полуспада гистограммы обратного разброса.

На рис. 1 приведен пример обработки фрагментов изображений от 25.06.11 и 19.07.12, поясняющий изложенный алгоритм.

В случае отсутствия изменений на наблюдаемом участке поверхности Земли все пиксели одинаковой яркости первого изображения имеют близкую яркость и во втором и диаграмма изменения яркости имеет вид линии. Если произошедшие изменения связаны с естественными причинами, такими как различное количество осадков, разные температурные режимы и т. п., однотипные пиксели фрагмента (по всей вероятности относящиеся к одному и тому же виду поверхности) также ведут себя однообразно. Это приводит к некоторой деформации диаграммы изменения яркости. При наличии

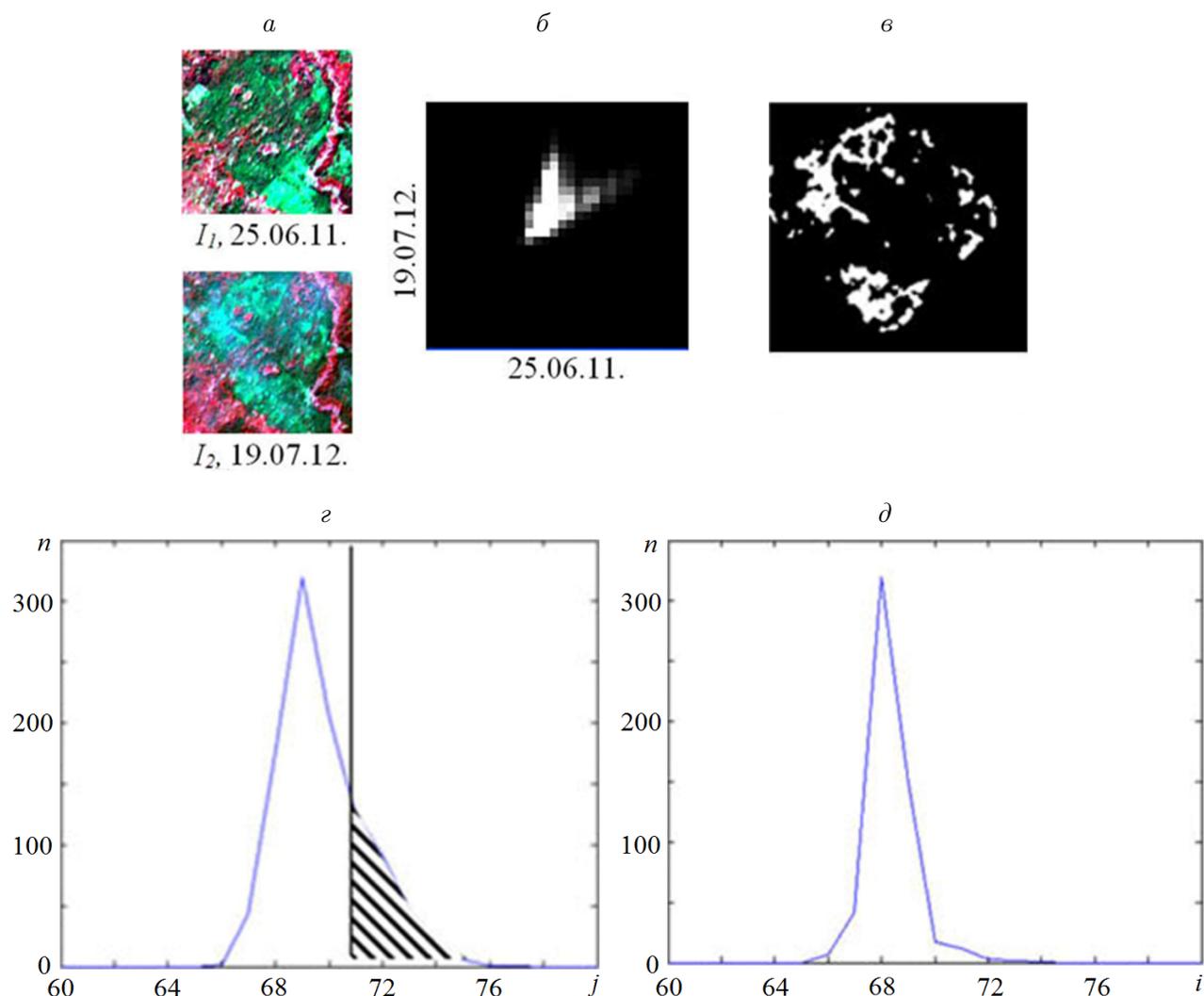


Рис. 1. Выделение изменений на основе формирования и анализа диаграмм изменения яркости:  $a$  — исходные фрагменты;  $б$  — сформированная диаграмма изменения яркости;  $в$  — результирующая картосхема изменений для данной территории;  $г$  и  $д$  — вертикальное и горизонтальное сечения диаграммы (прямой и обратный разброс яркости)

локальных воздействий, таких как рубки, в тестируемом фрагменте разброс яркости отсчетов, имеющих близкое значение в опорном фрагменте, увеличивается. На диаграмме изменения яркости это проявляется в виде шлейфа, направленного вверх от основной линии (рис. 1, б), т. е. приводит к ее уширению в данном направлении. Ширина же гистограммы обратного разброса (горизонтальное сечение диаграммы) определяется аппаратными погрешностями системы регистрации, а также естественными суточными и сезонными изменениями и может быть использована в качестве величины допустимого отклонения. Все отсчеты, отклонившиеся от основной линии в вертикальном направлении более чем на ее ширину в горизонтальном (заштрихованная зона на рис. 1, в), следует отнести к изменившимся.

В результате обработки разновременных изображений с применением изложенных процедур происходит выделение пикселей с нетипичным изменением поканальной яркости (рис. 1, д). При этом удастся избежать характерных недостатков разностных методов, связанных с необходимостью экспериментального подбора пороговых значений [7].

## 2. Постобработка совокупности картосхем изменений, сформированных при попарном сравнении разновременных изображений

Практика применения изложенного выше подхода показала, что в отдельных случаях он приводит к высокому уровню ошибок обнаружения. Пример результатов поиска изменений в сложных условиях по паре изображений приведен на рис. 2.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма выполнено сравнение результатов поиска с маской, сформированной оператором на основе визуального анализа данных. Для указанной пары изображений ошибка первого рода (пропуски) составила 9 %, ошибка второго рода (ложные обнаружения) — 6.5 %.

Ложные обнаружения связаны в первую очередь с наличием на изображениях мелких облаков и атмосферных искажений в виде неоднородной дымки. На втором изображении мелкие облака даже при визуальном анализе очень легко принять за вырубку. Чтобы убедиться, что это именно облака, следует обратить внимание на наличие тени соответствующего размера в определенном направлении от объекта. Однако в неко-

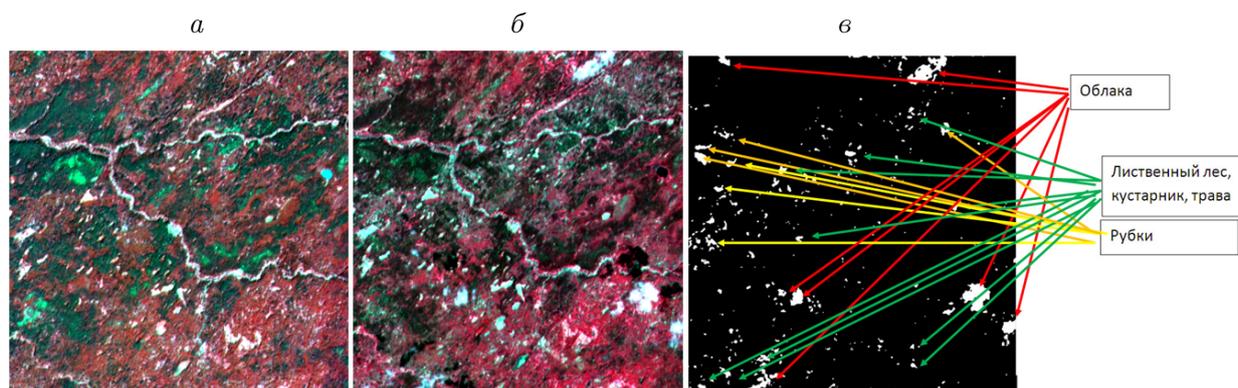


Рис. 2. Пример обнаружения изменений в сложных условиях: *а* — опорное изображение (от 27.07.08), *б* — тестируемое (от 25.05.09), *в* — сформированная картосхема изменений

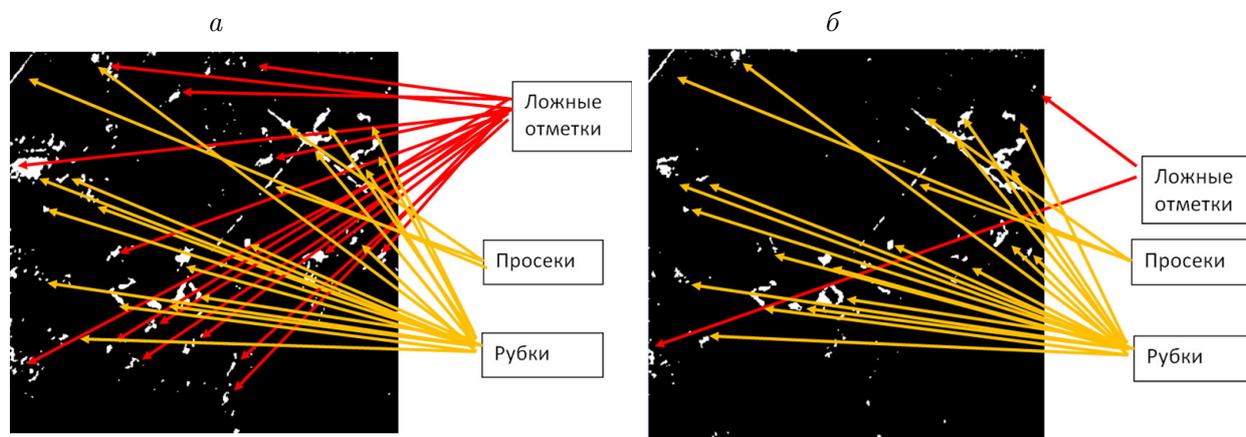


Рис. 3. Обнаруженные изменения: *а* — на тестируемом изображении от 19.07.12 относительно опорного от 22.05.08, *б* — после постобработки совокупности картосхем, сформированных в результате попарных сравнений изображений

торых случаях даже оператору правильное решение принять не просто. С целью его проверки необходимо прибегать дополнительно к анализу близких по датам снимков.

Другим источником ошибок являются сезонные изменения лиственной растительности. Так, в данном случае на тестируемом (майском) изображении наблюдается несколько участков, которые выглядят как рубки, однако на деле это растительность, которая к этому времени года (и в конкретных условиях) еще не полностью покрылась листвой. В этом можно убедиться по более поздним изображениям, например июньским или июльским этого же года, а также майским следующего. В первом случае наблюдается восстановление растительного покрова, а во втором — вновь проявляются участки открытой почвы.

Кроме того, следует обращать внимание на то, что хотя по своим спектральным характеристикам зоны изображения, содержащие пространственно неоднородную дымку и не полностью распустившуюся или угнетенную лиственную растительность, близки к зонам рубок, они существенно отличаются от них по динамическим характеристикам. Для рубок характерны резкие изменения с постепенным уменьшением контраста.

Подобный тщательный анализ совокупности разновременных изображений позволяет оператору при наличии необходимого опыта с высокой достоверностью определить участки, на которых были проведены выборочные рубки. Однако этот процесс очень трудоемок, требует значительного напряжения внимания и затрат времени.

С целью автоматизации указанного процесса предложен алгоритм постобработки совокупности картосхем изменений, сформированных при попарном сравнении разновременных изображений. Для обнаружения изменений используются все имеющиеся изображения контролируемой территории. Изображения, полученные за достаточно короткий промежуток времени в начале периода наблюдений, используются в качестве опорных, в конце данного периода — в качестве тестируемых, остальные имеющиеся изображения за период наблюдений будем называть промежуточными. Каждое из опорных изображений сравнивается с каждым из тестируемых и промежуточных. Промежуточные изображения сравниваются попарно между собой и с тестируемыми. При этом решение при попарном сравнении имеет три оценки: “да”, “нет”, “возможно”. Пиксели, в гистограмме прямого разброса отклонившиеся от максимума более чем на полуторную ширину полуспада гистограммы обратного разброса, маркируются в картосхеме изменений “возможно”, на утроенную — “да”.

Если между каким-то опорным и тестируемым изображениями для определенной связной группы пикселей принято решение “да”, а остальные тестируемые (более поздние) дают “да” либо “возможно” — скорее всего данная зона содержит рубку. Для уточнения решения анализируются результаты попарного сравнения опорных и промежуточных, промежуточных и тестируемых изображений. Если в каких-то из этих сочетаний для данной зоны принимается решение “да”, рубка подтверждается и по дате снимков устанавливается дата ее проведения. Таким образом, промежуточные изображения используются для проверки, резкие ли были изменения и когда они стали наблюдаться впервые, тестируемые — сохранились ли они после появления.

На рис. 3 приведен результат обнаружения изменений при сравнении двух изображений и при обработке совокупности картосхем, полученных при попарном сравнении серии разновременных изображений. Применение предложенного алгоритма уточнения картосхем изменений позволило существенно повысить эффективность поиска. Ошибка первого рода (пропуски) составила 20 %, ошибка второго рода (ложные обнаружения) уменьшилась до 0.08 %. При этом следует отметить, что пропуски связаны в первую

очередь с некоторой неточностью определения положения границ рубок. Факт же наличия рубки устанавливается достаточно однозначно. Так, количество ложных отметок сократилось до нескольких единиц, а доля верно обнаруженных рубок увеличилась более чем в два раза.

## Заключение

Предложен автоматизированный метод анализа совокупности разновременных изображений, позволяющий с высокой достоверностью определять участки, требующие наземных обследований для установления факта проведения несанкционированных выборочных рубок. Алгоритм обнаружения включает попарное сравнение имеющихся за нужный период изображений и постобработку совокупности сформированных картосхем изменений для уточнения принятых решений.

При попарном сравнении изображений используется метод, основанный на формировании картосхем изменений за счет поблочного (с билинейной интерполяцией) согласования яркости разновременных изображений и выделения аномальных пикселей на основе анализа диаграммы изменения яркости. При этом решение имеет три оценки: “да”, “нет”, “возможно”. Пиксели, в гистограмме прямого разброса отклонившиеся от максимума более чем на полуторную ширину полуспада гистограммы обратного разброса, маркируются в картосхеме изменений оценкой “возможно”, на утроенную — “да”. На этапе постобработки совокупности картосхем изменений, сформированных при попарном сравнении разновременных изображений, проверяется, резкие ли были произошедшие изменения и сохранились ли они в последующих снимках.

На примере обработки изображений спутника SPOT продемонстрировано, что предложенные процедуры постобработки позволяют более чем вдвое увеличить долю верных отметок в результирующей картосхеме изменений.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-07-12202-офи\_м).

## Список литературы / References

- [1] **Шимов С.В., Никитина Ю.В.** Технология мониторинга вырубок леса с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения // Геоматика. 2011. № 3. С. 47–52.  
**Shimov, S.V., Nikitina, Yu.V.** Technology of monitoring of deforestation with use of space pictures of the high spatial resolution // Geomatics. 2011. No. 3. P. 47–52. (In Russ.)
- [2] **Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W.** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // Proc. of 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Greenbelt, 1973. NASA SP-351 I: P. 309–317.
- [3] **Парамонов Е.Г., Маленко А.А.** Основы лесоводства и лесопаркового хозяйства: учеб. пособие. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2007. 170 с.  
**Paramonov, E.G., Malenko, A.A.** Basics and forest-park management: Ucheb. posobie. Barnaul: AGAU, 2007. 170 p. (In Russ.)
- [4] **Townshend, J., Justice, C., Gurney, C., McManus, J.** The impact of misregistration on change detection // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1992. Vol. 30. P. 1054–1060.

- [5] Bromiley, P., Thacker, N., Courtney, P. Non-parametric image subtraction using grey level scattergrams // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20, No. 9-10. P. 609–617.
- [6] Борзов С.М., Потатуркин О.И. Обнаружение выборочных рубок леса по данным дистанционных измерений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 87–93.  
Borzov, S.M., Potaturkin, O.I. Detection of shelterwood cutting areas on multispectral high spatial resolution satellite imagery // Issledovanie Zemli iz Kosmosa. 2014. No. 4. P. 87–93. (In Russ.)
- [7] Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. статей под ред. Е.А. Лупяна и О.Ю. Лавровой. Т. II. М.: GRANP polygraph, 2005. С. 217–227.  
Bartalev, S.A., Kuryatnikova, T.S., Stibig, H.Yu. Methods for the analysis of time series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga // Sovremennyye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa: Sbornik statey pod redaktsiey E.A. Lupyana i O.Yu. Lavrovoj. Т. II. Moscow: GRANP polygraph, 2005. P. 217–227. (In Russ.)

*Поступила в редакцию 16 ноября 2015 г.,  
с доработки — 10 декабря 2015 г.*

### Detection of faint anthropogenic changes in vegetation covers by multitemporal satellite images

BORZOV, SERGEY M.\*, UZILOV, SERGEY B.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

\*Corresponding author: Borzov, Sergey M., e-mail: borzov@iae.nsk.su

**Purpose:** Development and testing of an automatic method for detection of shelterwood cutting areas on medium resolution multispectral satellite imagery.

**Methodology.** The proposed algorithm involves pairwise comparisons of images available for the desired period of time along with the post-processing of changes in the generated map-charts collection for correction of the accepted decisions. Pairwise comparison of images uses a method based on the detection of changes due to block-based (with bilinear interpolation) matching of the brightness of multi-temporal images and allocation of anomaly pixels based on the analysis for the diagrams of the brightness change. Additionally, the decision has three levels: yes, no, and maybe. The pixels in the direct spread histogram are deviated from the maximum, which is greater than one-and-a-half width of the half-decay of histogram of the reverse spread. They are marked in map-charts of changes as “maybe”, trebled ones are marked as “yes” and others are marked as “no”. At the stage of post-processing of collection of map-charts changes, generated by pairwise comparison of multi-temporal images, we determine the sharpness of changes and whether these changes were kept in the subsequent pictures.

**Findings.** The method was demonstrated on the example of detection of shelterwood cutting areas based on multi-temporal images of satellite SPOT 4. If there are no such areas on a site of observation, all pixels with identical brightness of the basic image

have similar brightness on the test image. Upon appearance of shelterwood cutting areas, brightness of channels R and SWIR increases in the corresponding sites so the spread of pixels brightness grows. The width of reverse spread (from the tested image to basic) is determined by hardware errors in registration system, as well as natural changes, and is used as value of tolerance. This allows for the automatization of image processing, eliminating the necessity for experimental selection of threshold values.

**Conclusions.** The estimation of efficiency of the proposed method is made by comparison of detection results with a mask generated on the basis of the visual analysis of images. The example of processing images of satellite SPOT indicates that the use of the proposed post-processing procedures doubles the percentage of correct marks in the resulting map-chart of changes.

*Keywords:* satellite imagery processing, change detection, shelterwood cutting.

**Acknowledgements.** This research was partly supported by RFBR (grant No. 13-07-12202).

*Received 16 November 2015*

*Received in revised form 10 December 2015*