

## Обнаружение рубок отдельных деревьев по теням на основе снимков прибора «Геотон» спутника «Ресурс-П»

А. И. Алексанин, В. Ким, М. А. Морозов, Е. В. Фомин

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН  
Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

Рассматривается проблема автоматического нахождения рубок отдельных деревьев по изображениям прибора «Геотон» (пространственное разрешение 0,7 м) спутников «Ресурс-П». Вырубка отдельных деревьев в лесу со сплошной кроной сопровождается появлением области тени в месте вырубки. Вырубленные деревья открывают доступ к солнцу для других деревьев, что резко повышает их яркость на изображениях. Такая закономерность изменения яркости в сплошной кроне деревьев используется для определения мест рубок. С помощью процедуры совмещения изображений с пиксельной точностью можно проанализировать аномалии яркости на последовательности снимков, сравнивая их друг с другом. На паре изображений выделяется много аномалий. Сравнение с предшествующими аномалиями оставляет лишь вновь появившиеся, которых относительно немного, и сочетание аномалий повышенной и пониженной яркостей позволяет уверенно выделить места рубок. Рассматривается алгоритм обнаружения рубок отдельных деревьев и разобрана его работа на примере распознавания незаконных рубок при мониторинге лесной зоны, проводившегося по заданию Администрации Приморского края. Разбираются вопросы влияния на результат изменчивости угла съёмки местности и неточностей совмещения изображений. Оцениваются размеры рубок, которые можно уверенно идентифицировать.

**Ключевые слова:** «Ресурс-П», «Геотон», выборочные рубки деревьев, анализ теней деревьев

Одобрена к печати: 05.08.2019  
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-174-182

Контроль рубок леса является актуальной проблемой лесного хозяйства России. Использование данных спутникового дистанционного зондирования позволяет организовать регулярный мониторинг лесов на огромных площадях. Разработаны методологии мониторинга и создано значительное количество методов детектирования изменчивости растительного покрова (Барталев и др., 2016; Miettinen et al., 2014). Развиваются методы автоматического обнаружения рубок. Последние являются перспективными для автоматизации мониторинга, но не универсальными, так как изменчивость растительного покрова зависит от многих природных факторов, определяющих особенности формирования изображений.

Наиболее распространённый подход к детектированию рубок по снимкам летнего сезона основан на предварительной классификации растительности, осуществляющейся по мульти-спектральным данным видимого диапазона, в том числе с привлечением микроволновых измерений (Wijaya, 2005). Такой подход позволяет даже выделять вырубку отдельных деревьев, размер кроны которых не превышает размера пикселя. В то же время при наличии смеси разных классов деревьев, обуславливающей формирование регистрируемого спутником излучения, возможно ложное детектирование рубок или их пропуск. Поскольку не всегда удаётся провести чёткую сегментацию леса по породам деревьев, то используются подходы, основанные на определении изменчивости яркости отдельных спектральных каналов или изображений параметров леса (в первую очередь вегетационного индекса). Для выделения изменений используются пороговые методы, параметры которых подбираются экспериментально (Барталев и др., 2005) либо адаптивно (Борзов, Потатуркин, 2014). Тем не менее отмечается, что не всегда изменение вегетационного индекса способствует обнаружению рубок и «показателем проведения таких рубок является увеличение компоненты излучения от открытых почв, а также появление участков вскрытого грунта» (Борзов, Потатуркин, 2014).

В Приморском крае преобладают смешанные леса, в которых как вкрапления присутствуют деревья ценных пород (ясень, кедр, дуб и т. п.). Поскольку стоимость древесины у этих пород высокая, то наблюдаются незаконные вырубki отдельных деревьев. Спутник обычно ведёт съёмку под некоторым углом, поэтому излучение от почвы непосредственно не регистрируется. Вырубка отдельных деревьев в лесу со сплошной кроной сопровождается появлением области тени в месте вырубки. Часто одновременно вырубленные деревья открывают доступ к солнцу для других деревьев, что резко повышает их яркость на снимках. Если иметь два совмещённых с пиксельной точностью и спектрально выровненных изображения, снятых фактически при одном и том же положении солнца на небосклоне, то анализ близких областей с появившейся увеличенной и уменьшенной яркостью должен позволить найти вырубку либо упавшие деревья. В работе рассматривается задача обнаружения рубок отдельных деревьев по изменчивости яркостных характеристик в местах рубок. Линейный размер кроны отдельного дерева небольшой — несколько метров. Идеально совместить изображения, снятые под разными углами, не удастся. Поэтому будет генерироваться значительное количество областей изменчивости яркости, не соответствующих рубкам. И основной проблемой является создание алгоритма фильтрации ложно выделяемых объектов.

### Используемые данные и алгоритмы их обработки

Исходными данными были панхроматические и мультиспектральные снимки прибора «Геотон-Л1» уровня обработки 1А. Использовались панхроматические изображения лесных участков Красноармейского района Приморского края, полученные радиометром «Геотон» спутника «Ресурс-П» № 1 за 14.09.2015, 25.08.2015, 10.08.2015 с углами съёмки, лежащими в диапазоне от нуля до  $30^\circ$  от надира. Обозначим их как изображения с номерами 1, 2 и 3. Изображение за 25.08.2015, использованное в качестве эталона, проходило обработку до уровня 2В — ортотрансформирование в картографическую проекцию по реперным точкам с подключением цифрового рельефа местности. В качестве цифровой модели рельефа использовалась общедоступная модель SRTM v.4, имеющая пространственное разрешение около 30 м. Остальные изображения проходили процедуру совмещения с изображением-эталонem. Для этого использовался созданный недавно алгоритм совмещения изображений (Алексанин и др., 2018, 2019). Точность совмещения, оцениваемая алгоритмом в каждой точке изображения, лежала в пределах 1 пикселя (0,7 м).

Съёмки велись в рамках эксперимента по контролю незаконной рубки леса, проводившегося Администрацией Приморского края. На выбранном участке леса представителями Фонда дикой природы был зафиксирован факт незаконной вырубки четырёх деревьев вблизи грунтовой дороги.

Для автоматического определения мест рубок разрабатывался алгоритм анализа теней, появляющихся в кроне леса. Выделение теней на изображениях — одна из актуальных задач. Её решению посвящено достаточно много работ (Das, Aery, 2013; Shahtahmassebi et al., 2013). Существующие алгоритмы выделения теней разнообразны, и, согласно работе (Shahtahmassebi et al., 2013), их можно разделить на два класса: пороговые методы и методы, использующие модель снятой сцены. Применяются как универсальные методы обработки изображений, так и спектральные, учитывающие оптические особенности формирования теней. Последние позволяют строить изображения в форме отношений яркостей различных спектральных каналов или более сложных функций, а потом использовать их как слой для классификации объектов на снимке. Алгоритмы носят эмпирический характер, и результат их применения зависит от оптических свойств объекта наблюдения.

Алгоритмы мониторинга не только рубок, но и произвольных объектов по изменчивости их теней авторам неизвестны. В данной работе представлен алгоритм, который разрабатывался по запросу Администрации Приморского края для мониторинга незаконных рубок в режиме реального времени (когда незаконно спиленное дерево ещё можно найти на складах). Съёмки велись регулярно одним и тем же спутником в одно и то же время дня

с небольшим интервалом времени между изображениями (до двух недель). То есть за время между съёмками изменчивость теней была незначительной. Особенностью задачи является то, что теней очень много и они небольшого размера. Поэтому нужно совмещать изображения пологов фактически с пиксельной точностью. Съёмка под разными углами меняет геометрию и размер теней. Изменчивость атмосферы не позволяет устанавливать единые пороги по их выделению.

Пусть имеется последовательность изображений местности, упорядоченная по времени. Для вновь поступившего изображения требуется определить появление рубок деревьев. Обработка изображений осуществлялась следующим алгоритмом:

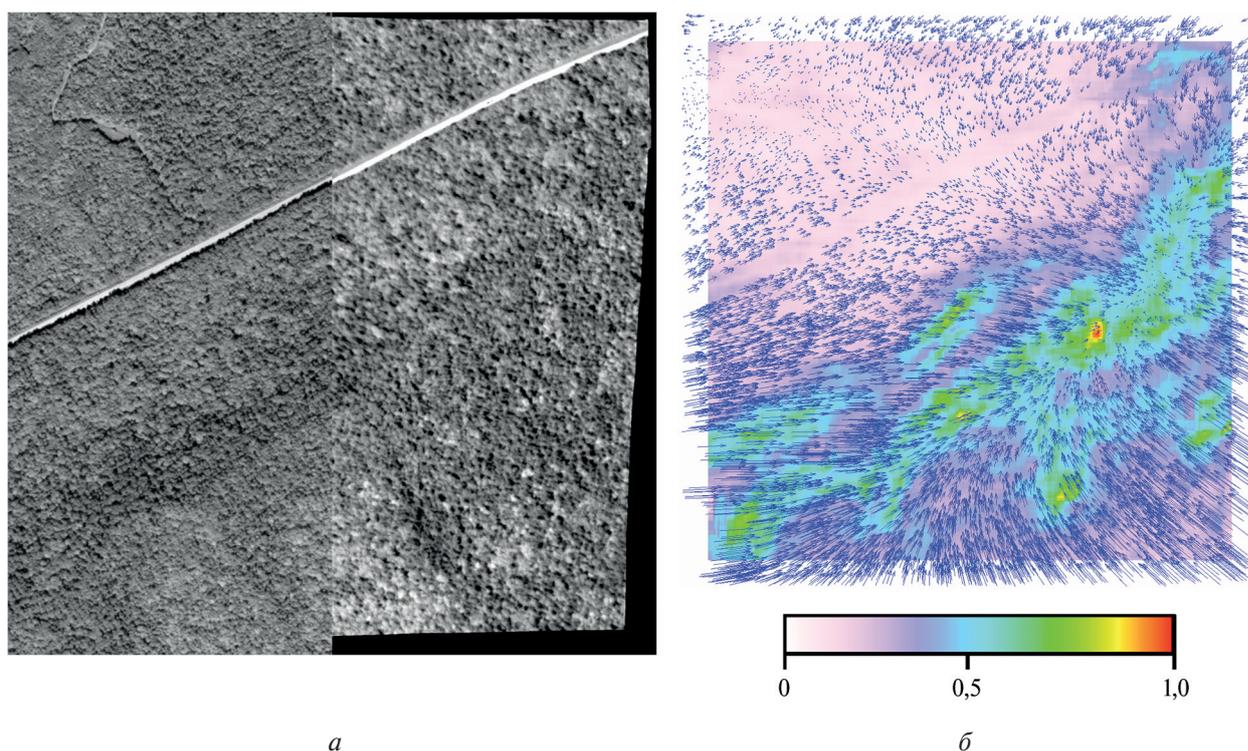
1. Совмещение изображений с пиксельной точностью.
2. Фильтрация облачности и объектов, не относящихся к лесу.
3. Выравнивание яркостных характеристик сравниваемых изображений на основе близости средних и дисперсий.
4. Построение разности яркостей с двумя предшествующими изображениями и выбор порогов выделения теней по гистограмме разностей для последнего по времени изображения. Выделение аномалий яркости.
5. Сравнение аномалий, полученных на последней паре изображений, с аномалиями, полученными по предшествующим изображениям. Фильтрация идентичных аномалий.
6. Фильтрация аномалий с малой площадью по разности последних по времени изображений.
7. Подтверждение достоверности обнаруженных аномалий, обусловленных изменчивостью лесного полога, по последовательности изображений.

В данной работе не используются алгоритмы выделения затенённых участков или участков повышенной яркости на исходных изображениях. Такие участки могут возникать в результате особенностей освещения солнцем и не быть связанными с рубками деревьев. Использование разности изображений должно давать более надёжные результаты, так как после выравнивания снимков по яркости значительное изменение разности показывает в основном произошедшую в лесном пологе изменчивость. Однако в этом случае также возможна ошибочная интерпретация аномалий яркости. Поскольку эксперименты ставились на изображениях одного и того же спутника, снятых фактически в одно и то же время дня и за временной интервал, когда угол солнца над горизонтом можно считать постоянным, то к факторам, генерирующим ложные выделения, можно отнести: мелкомасштабную неотфильтрованную облачность и её тени; различие формы и освещённости крон деревьев, снятых при существенно разных углах съёмки; неточности совмещения изображений. Первую проблему довольно легко решить, используя особенность прибора «Геотон» на спутнике «Ресурс-П» № 1 — существенно отличающийся угол съёмки у синего канала по сравнению с остальными каналами. Облачные образования будут в разных местах совмещённых снимков. Вторые два фактора связаны с различием углов съёмки совмещённых изображений. При значительном рассогласовании возможна генерация большого количества ложных аномалий яркости. Поэтому изменчивость, связанную с рубками, нужно подтверждать сравнением с другими изображениями. В проведённых экспериментах эта проблема рассматривалась детально.

## Эксперименты и результаты

Задача обнаружения вырубок состоит в сравнении пары разновременных снимков лесных участков и выявлении значимых различий. Эксперименты проводились с целью оценки возможности автоматизации обнаружения вырубок отдельных деревьев. Анализ имеющихся изображений со спутника «Ресурс-П» показывает, что географически хорошо привязанные снимки обнаруживают заметное расхождение координат прослеживаемых особенностей лесного полога уже для одновременных изображений, снятых в разных спектральных каналах, и существенное расхождение для разновременных снимков. Это происходит из-за различающихся

углов съёмки и обусловлено тем, что полог деревьев существенно выше рельефа местности, по которому осуществляют привязку. Для попиксельного сравнения снимков исключительно важна точность совмещения изображений, поэтому для того, чтобы избежать излишнего накопления ошибок привязки, представляется целесообразным в ряде случаев заменить географическую привязку каждого снимка на совмещение изображений. На *рис. 1* представлены результаты совмещения с эталонным изображением снимка за 10.08.2015, не прошедшего географическую привязку с ортотрансформированием, но скорректированного алгоритмом. Изображение снято под углом более  $30^\circ$  от надира, оно светлее, и на нём меньше теней. Рельеф характеризовался перепадом высот более 200 м. Векторы смещений показывают значительную нелинейность трансформации изображения и достигают величин в 150 пикселей. Векторы автоматически отфильтровываются не только на облачности, но и на дорогах (в том числе и на заросшей лесной, присутствующей в левом верхнем углу изображения), что имеет естественное объяснение. Совмещение осуществляется по пологу леса, который почти сплошной на данном фрагменте. Дорога лежит ниже полога на среднюю высоту деревьев, поэтому совмещение дороги с пиксельной точностью при имеющихся углах наблюдения невозможно (векторы смещений для неё отфильтровывались автоматически, так как относились к другому уровню поверхности). Расчёты показывают (*рис. 2а*, см. с. 178), что почти везде точность совмещения не превышает 1 пиксель. Согласно алгоритму точность рассчитывается не для конкретного пикселя, а некоторой его окрестности. Максимальные ошибки (чуть больше пикселя) наблюдаются в районе с сильной изменчивостью рельефа.



*Рис. 1.* Фрагменты двух изображений, состыкованных по произвольной линии разреза (*а*): слева — эталонное изображение, справа — изображение, прошедшее обработку алгоритмом. Векторы смещений на карте точности расчёта векторов смещений в пикселях (*б*)

Перед выравниванием яркостных характеристик изображений проводилась процедура фильтрации объектов, не относящихся к лесному пологу. Фильтрация осуществлялась по величине NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный относительный индекс растительности), не превышающей 0,1. Она позволила отфильтровать облачность (в том числе и полупрозрачную) и дороги — как основную, так и частично заросшую лесную.

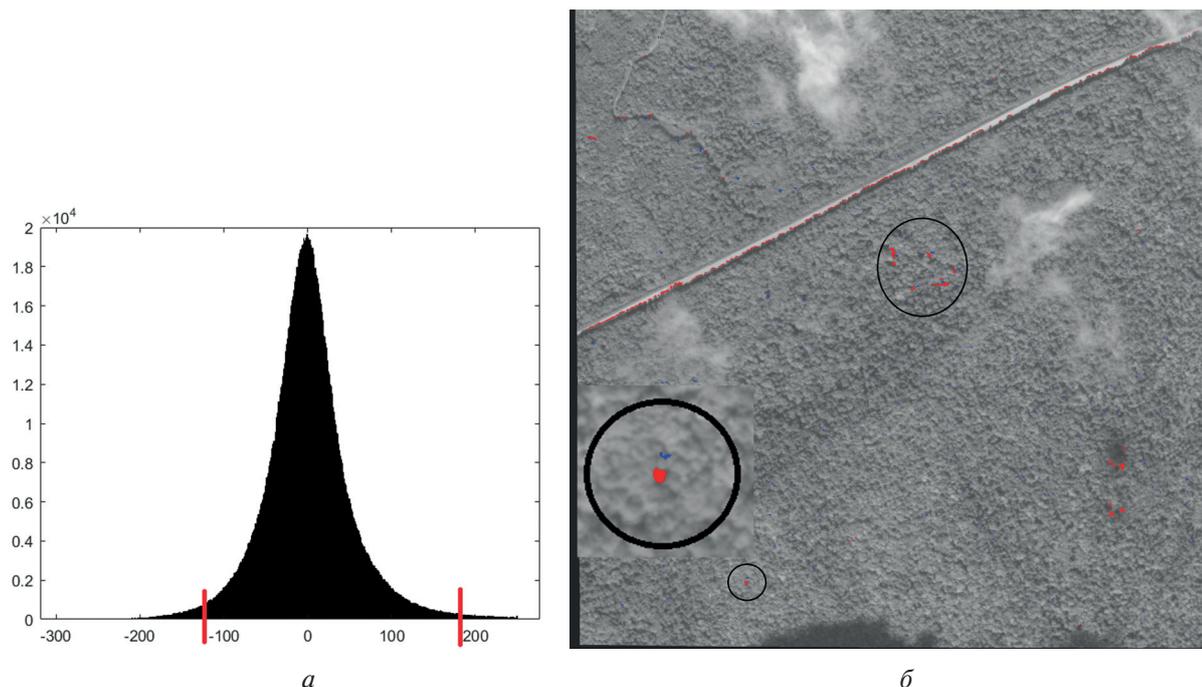


Рис. 2. Гистограмма разностей изображений 1 и 2 и выбранные пороги (а). Изображение лесного полога за 25.08.2015 с выделенными аномалиями пониженной (красный цвет) и повышенной (синий цвет) яркости; кружки — области пониженной и повышенной яркости, расположенные вблизи друг друга (б)

Поскольку изображения были сняты в разное время и при разных условиях освещения, то они проходили процедуру выравнивания по яркости. Применялась процедура нормализации яркостных характеристик относительно первого изображения — эталона:

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

где  $\tilde{I}_2$  — яркость нормализованного второго изображения;  $\mu_1, \mu_2$  — средние значения второго и первого изображения соответственно;  $\sigma_1, \sigma_2$  — стандартные отклонения изображений.

Автоматическое выделение аномалий яркости проводилось по заданным порогам, выбираемым по гистограмме разностей изображений. Пороги выбираются едиными для всех выровненных по яркости изображений. Поскольку изменчивость яркости в местах рубок значительная, то берётся высокая величина порога, и количество отсекаемых пикселей получается небольшое. На рис. 2а приведена гистограмма и соответствующие пороги для разности изображений 1 и 2 (здесь и далее из более раннего вычитается более позднее изображение). На рис. 2б приведены выделенные области аномалий изменчивости яркости по заданным порогам. Из них можно отметить места, где аномалии повышенной и пониженной яркости расположены близко друг к другу и являются местами возможных рубок либо падений деревьев. Несмотря на то что всего аномалий относительно немного, наблюдается значительный разброс их по пространству и в основном они не связаны с рубкой. Поскольку текстура лесного полога мелкомасштабная и характеризуется чередованием тёмных и светлых областей, то ошибки в географической привязке конкретного дерева в один пиксель и более могут образовывать аномалии. Фильтрация мелкомасштабных аномалий отбраковывает основную массу выделенных объектов. В данном случае фильтровались аномалии, чья площадь в окне размером  $7 \times 7$  не превышала 20 пикселей. До фильтрации было более одной тысячи выделенных областей. После фильтрации по площади осталось менее тридцати аномалий. Областей, где бы сочетались одновременно повышенные и пониженные яркости, оказалось всего две. Одна из них, расположенная у дороги, соответствует обнаруженной незаконной рубке четырёх де-

ревьев. Вторая, в глубине лесного массива, по-видимому, соответствует упавшему дереву. Однако оставшиеся аномалии требуют верификации.

Если аномалия соответствует рубке, то она будет присутствовать на различных разностях изображений. С целью подтверждения рубок были проанализированы разности между изображениями 1, 2 и 3 (рис. 3). Для оценки влияния облачности и посторонних объектов на генерацию аномалий яркости при расчёте разницы яркости изображений фильтрация облачности и дорог не использовалась. Аномалий яркости, построенных по разностям изображений, оказалось многократно больше, чем на разнице изображений 1 и 2. Это имеет естественное объяснение. При работе алгоритма совмещения изображений пиксельная точность обеспечивается не для каждого пикселя, а для некоторой его окрестности. В данном случае окрестность имела линейный размер в 200 пикселей. Алгоритм фактически совмещает изображения по некоторой усреднённой поверхности полога. Деревья выше этой поверхности и ниже её будут на разности изображений генерировать аномалии. Поскольку углы сканирования на изображениях 1 и 2 близки (их разность составляет  $3^\circ$ ), то количество ложных аномалий невелико и они малы по размеру. Для разниц изображений 1, 3 и 2, 3 углы сканирования рассогласованы примерно на  $30^\circ$ . Поэтому аномалий существенно больше и их размеры значительные. Если же вычесть выделенные аномалии друг из друга, то значимых по площади аномалий останется очень мало. Сравнение подтверждённых по разностям изображений 1, 3 и 2, 3 аномалий с аномалиями по изображениям 1, 2 показывает устойчивое выделение зон изменчивости лесного полога, отмеченных на рис. 2б.

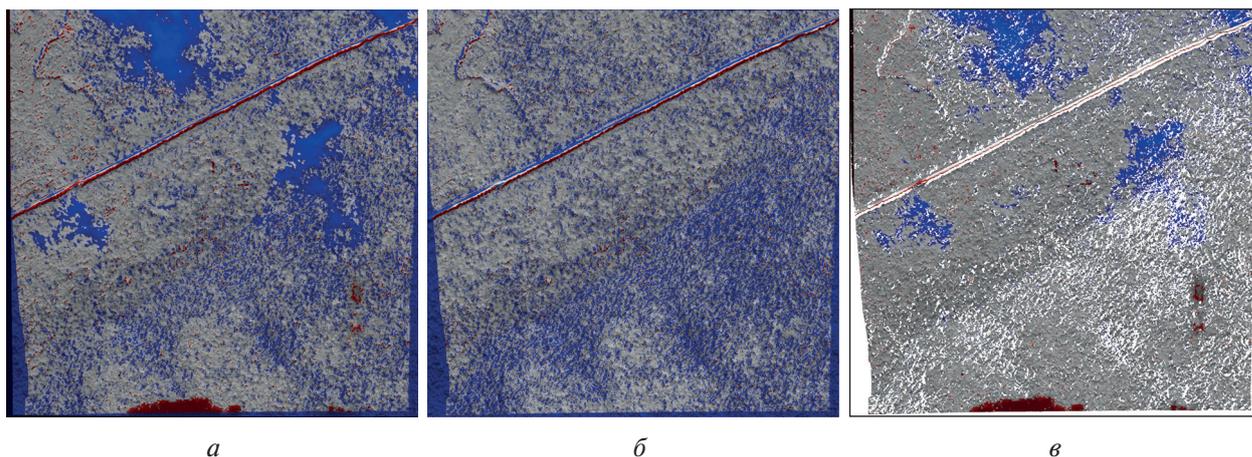


Рис. 3. Аномалии яркости, построенные по разнице изображений 1 и 3 (а). Аномалии по разнице изображений 2 и 3 (б). Разницы аномалий на рис. 3а и б с замаскированными идентичными тенями (белый цвет) (в)

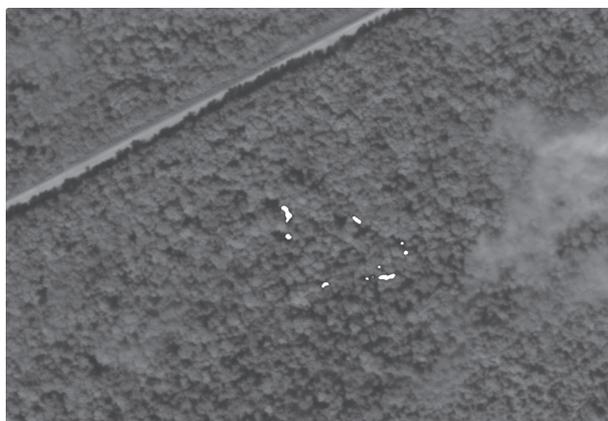


Рис. 4. Результат обнаружения рубок, наложенный на изображение за 14.09.2015

На рис. 4 (см. с. 179) приведены появившиеся тени (аномалии понижения яркости), которые соответствуют подтверждённой незаконной рубке четырёх деревьев вблизи дороги. Попытка выделить незаконную рубку по NDVI или по изменчивости яркости канала в ближней инфракрасной области не давала положительного результата. Приморские леса характеризуются подлеском, который имеет примерно такую же величину NDVI, как и срубленные деревья. Подлесок также маскирует следы повреждения почвы, которые обычно хорошо видны в ближнем инфракрасном канале. При рубке отдельных деревьев на изображениях со съёмкой местности под значительным углом, как, например, на изображении 3, следы деятельности техники на земле вообще не будут видны, так как они существенно ниже полого. В то же время изменчивость освещённости кроны в местах рубки проявляется на всех изображениях и уверенно выделяется. Помимо мест рубки выделяются мелкие аномалии, которые лежат вблизи крупных и поэтому не отфильтровались. Скорее всего, они показывают маршрут использованной техники. В целом проведённые эксперименты подтверждают возможность определения рубок отдельных деревьев по аномалиям яркости применяемым алгоритмом, если высота солнца на последовательности изображений меняется незначительно.

## Заключение

Рассмотрены проблемы и методика автоматического обнаружения незаконных рубок отдельных деревьев летом по спутниковым данным. Для нахождения таких рубок по панхроматическим спутниковым снимкам прибора «Геотон» использовалось совмещение лесных пологов на последовательности изображений с пиксельной точностью. Резкая изменчивость яркости какой-либо области может указывать на рубку или падение дерева. При рубке дерева должно образовываться две аномалии яркости: тень на месте дерева и освещённая крона деревьев, которые затенялись вырубленным. Незаконная вырубка четырёх деревьев, обнаруженная при проведении спутникового мониторинга незаконных рубок в Красноармейском районе Приморского края, подтверждает возможность обнаружения рубок по аномалиям яркости.

Основной проблемой корректного обнаружения рубок отдельных деревьев является организация эффективной фильтрации ложно выделяемых аномалий. В работе использовались изображения, снятые фактически при одинаковых углах места и азимутах солнца. К сожалению, изображения получены при углах съёмки, различие которых было значительным и достигало 30°. Метод совмещения снимков обеспечивает требуемую точность для окрестности каждого пикселя, размер которой составлял около 200 пикселей. То есть совмещение осуществляется для некоторой сглаженной поверхности лесного полого. Отдельные участки кроны могут быть как ниже, так и выше этой поверхности. Поэтому разность изображений приводит к резкому росту аномалий, которые можно ошибочно принять за рубки. Но если сравнить аномалии на последовательности изображений, то подавляющая их часть, не относящаяся к рубке, будет образовываться в одном и том же месте. Фильтрация совпадающих аномалий позволяет решать проблему ложных обнаружений, подтверждая корректность определения области рубки на последнем по времени изображении.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-41152РГО\_а).

## Литература

1. Алексанин А. И., Краснопеев С. М., Морозов М. А., Фомин Е. В. Совмещение изображений с российских спутников «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 18–28.
2. Алексанин А. И., Морозов М. А., Фомин Е. В. Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 9–16.

3. *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*. 2005. Т. 2. № 2. С. 217–227.
4. *Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
5. *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.
6. *Das S., Aery A.* A review: shadow detection and shadow removal from images // *Intern. J. Engineering and Technology*. 2013. V. 4. No. 5. P. 1764–1767.
7. *Miettinen J., Stibig H.-J., Achard F.* Remote sensing of forest degradation in Southeast Asia-Aiming for a regional view through 5–30 m satellite data // *Global Ecology and Conservation*. 2014. No. 2. P. 24–36.
8. *Shahtahmassebi A., Ning Ya., Ke W., Moore N., Zhangquan S.* Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing // *Chinese Geographical Science*. 2013. V. 23. No. 4. P. 403–420.
9. *Wijaya A.* Application of Multi-stage Classification to Detect Illegal Logging with the Use of Multi-source Data: A Case Study in Labanan Forest Management Unit, East Kalimantan, Indonesia. ITC, 2005. 64 p.

## Individual tree logging detection by shadows in Geoton sensor imagery of the Resurs-P satellite

A. I. Aleksanin, V. Kim, M. A. Morozov, E. V. Fomin

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia  
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

The problem of automatic detection of individual tree logging in Geoton sensor imagery (spatial resolution 0.7 m) of the Resurs-P satellite is considered. The logging of individual trees in the forest with a dense forest canopy is accompanied by the appearance of a shaded area in the place of logging. The logged trees open access to the sun for other trees, which increases significantly their brightness on the images. Such a pattern of brightness changes in a continuous forest canopy is used to determine logging sites. Using the procedure of image registration with pixel accuracy, it is possible to analyze the anomalies of brightness in a sequence of images by comparing them with each other. Numerous anomalies are detected in a pair of images. A comparison with previous anomalies leaves only those newly appeared. There are relatively few newly appeared anomalies, and the patterns of high and low brightness anomalies make it possible to confidently detect logging sites. An algorithm for detection of individual tree logging is considered, and its work is examined by an example of detected illegal logging during forest area monitoring carried out at the request of the Administration of Primorsky Krai. The issues of the influence of sensor orientation variability and inaccuracies of image registration are discussed. Logging sizes that can confidently be identified are estimated.

**Keywords:** Resurs-P, Geoton, individual tree logging, analysis of tree shadows

Accepted: 05.08.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-174-182

## References

1. *Aleksanin A. I., Krasnopeev S. M., Morozov M. A., Fomin E. V., Sovmeshchenie izobrazhenii s rossiiskikh sputnikov Resurs-P (Resurs-P satellites image registration), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 18–28.*
2. *Aleksanin A. I., Morozov M. A., Fomin E. V., Problemy sovmeshcheniya izobrazhenii s piksel'noi tochnost'yu (Problems of image registration with subpixel accuracy), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 9–16.*

3. Bartalev S. A., Kuryatnikova T. S., Stibig H.-J., *Metody ispol'zovaniya vremennykh serii sputnikovykh izobrazhenii vysokogo prostranstvennogo razresheniya dlya otsenki masshtabov i dinamiki vyrubok taezhnykh lesov (Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 217–227.
4. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii (Satellite mapping of the vegetation cover over Russia)*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
5. Borzov S. M., Potaturkin O. I., *Obnaruzhenie vyborochnykh rubok lesa po dannym distantsionnykh izmerenii vysokogo prostranstvennogo razresheniya (Detection of selective forest logging based on high-resolution remote sensing data)*, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 4, pp. 87–93.
6. Das S., Aery A., *A review: shadow detection and shadow removal from images*, *Intern. J. Engineering and Technology*, 2013, Vol. 4, No. 5, pp. 1764–1767.
7. Miettinen J., Stibig H.-J., Achard F., *Remote sensing of forest degradation in Southeast Asia-Aiming for a regional view through 5–30 m satellite data*, *Global Ecology and Conservation*, 2014, No. 2, pp. 24–36.
8. Shahtahmassebi A., Ning Ya., Ke W., Moore N., Zhangquan S., *Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing*, *Chinese Geographical Science*, 2013, Vol. 23, No. 4, pp. 403–420.
9. Wijaya A., *Application of Multi-stage Classification to Detect Illegal Logging with the Use of Multi-source Data: A Case Study in Labanan Forest Management Unit*, East Kalimantan, Indonesia, ITC, 2005, 64 p.