

# Обнаружение мелкомасштабной изменчивости лесного полога на спутниковых панхроматических изображениях на основе матрицы смежности перепадов яркости

М. Г. Алексанина, А. В. Храмцова

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН  
Владивосток, 690041, Россия*

*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690922, Россия  
E-mail: margeo@mail.ru*

На примере задачи обнаружения рубок одиночных деревьев на спутниковых изображениях лесного полога решается задача поиска оптимальных признаков, которые независимо от условия наблюдения идентифицируют наличие изменений на панхроматических изображениях. Исходными данными являются панхроматические изображения прибора «Геотон-Л1» с российского спутника «Ресурс-П» (пространственное разрешение 0,7 м). Предлагается подход на основе матрицы смежности, но не яркости, как в классическом случае, а перепадов яркости для заданного вектора смещения, на котором рассматривается перепад. И не для одного изображения, а для пары изображений. Рассматривается частота перехода конкретного перепада 1-го изображения в определённый перепад 2-го изображения. Отсутствие каких-либо значимых изменений в структуре изображений проявляется в матрице смежности перепадов яркости в том, что ненулевые значения частоты сосредотачиваются вдоль её диагонали. Если появляются даже небольшие пространственные изменения яркости — появляются «аномальные» частоты, ненулевые значения частот вне диагонали. Эта особенность используется для идентификации яркостных изменений типа «рубок». При сравнении пар спутниковых изображений, полученных при близких углах съёмки и солнца над горизонтом, подход находит области изменения перепадов яркости хорошо. Если углы существенно различаются, то появляются артефакты — ложные рубки. Такие аномальные перепады яркости могут быть как в местах потенциально реальных рубок, так и вследствие несоответствия углов съёмки и солнца над горизонтом. В таком случае анализируется стабильность выявленных аномалий по последовательности матриц смежности перепадов с трёх изображений. Для подтверждения достоверности рубки и уточнения её границ используются расчёты аномалий яркости при разных векторах смещения.

**Ключевые слова:** спутниковые изображения, мелкомасштабная изменчивость, текстура, перепады яркости, изменение величины перепада яркости, матрица частот, одиночные рубки

Одобрена к печати: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-47-59

## Введение

Задача обнаружения одиночных рубок в лесном пологе, как, например, рубок ценных пород отдельных деревьев в Приморском крае, является актуальной (Старовойтов и др., 2021; Matosak et al., 2022). Рубка отдельных деревьев не сильно меняет рисунок лесного полога, поэтому задача состоит в обнаружении в лесном пологе мелкомасштабной изменчивости. Решение такого типа задач может опираться на методы алгебраических вычислений и преобразований, классификации, искусственных нейронных сетей, нечёткой кластеризации, технологий геоинформационных систем (ГИС) и другие (Afaq, Manocha et al., 2021; Khan et al., 2017; Bromiley et al., 2002; Li et al., 2016; Townshend et al., 1992). Создано значительное количество методов для детектирования изменчивости именно растительного покрова (Барталев и др., 2016; Борзов, Потатуркин, 2020; Миклашевич, Барталев, 2016; Miettinen et al., 2016). Конкретно для детектирования рубок популярен подход на основе предварительной классификации растительности, осуществляющейся по мультиспектральным данным видимого диапазона, в том числе с привлечением микроволновых измерений (Wijaya, 2005). Здесь используются подходы, основанные на определении изменчивости яркости отдельных спектральных

каналов или параметров леса (в первую очередь вегетационного индекса). Для идентификации изменений используются пороговые методы, параметры которых подбираются экспериментально (Барталев и др., 2005), либо адаптивно (Борзов, Потатуркин, 2014).

Лесной полог на спутниковых изображениях высокого разрешения выглядит как текстура (Сидорова, 2007). Поэтому логично использовать алгоритмы на основе текстурных признаков (Milne, 1988). Однако процедуры, хорошо работающие с изображениями технических текстур, сталкиваются со сложностями изображений природных текстур. Вид текстуры лесного полога меняется в зависимости от угла солнца над горизонтом, прозрачности атмосферы, влажности и температуры воздуха, характера отбрасывания тени близстоящих деревьев (Борзов, 2014). Поэтому требуется подход на основе пространственных признаков, которые нечувствительны к изменениям условий съёмки.

При таком подходе задача формулируется как разработка новых дескрипторов, которые учитывают изменения пространственных характеристик в ближайшей окрестности пикселя и которые, независимо от угла съёмки и прочих внешних параметров, будут идентифицировать наличие каких-либо мелких масштабных изменений типа рубок, вала и т. п., а также повысят вероятность обнаружения этих изменений и локализацию их на изображении. Целью работы стало создание алгоритма, который на панхроматическом изображении многократно сокращает площадь поиска, автоматически формирует области изменений и фильтрует артефакты.

### Данные и их предварительная обработка

Для исследования были выбраны участки лесного полога до рубки и после неё в Красноармейском р-не Приморского края, данные по ним брались за август – сентябрь 2015 г. Красноармейский р-н относится к лесхозу Рошинский, лесничество Вострецовское Приморского края. Согласно материалам лесоустройства Рошинского лесхоза Приморского управления лесами за 1996 г., в исследуемом районе тип леса по преобладающей породе относится к широколиственно-кедровым лесам. Преобладающая порода — кедр. Древостой — 20 % кедр, 20 % дуб, 20 % берёза жёлтая, 10 % ель, 10 % пихта, 10 % клёны, 10 % ильм. Высота древостоя (преобладающей породы) — 21 м. Возраст древостоя (преобладающей породы) — 160 лет. Средний диаметр древостоя (преобладающей породы) — 32 см.

Исходными данными были панхроматические изображения прибора «Геотон-Л1» с российских спутников «Ресурс-П» (пространственное разрешение 0,7 м) Красноармейского р-на Приморского края 10.08.2015, 25.08.2015 и 14.09.2015. Координаты верхнего левого угла —  $45^{\circ} 57' 41,28''$  с.ш.,  $134^{\circ} 56' 40,79''$  в.д., нижнего правого угла —  $45^{\circ} 56' 55,54''$  с.ш.,  $134^{\circ} 57' 46,57''$  в.д.

Сцена представляет собой лесной массив с дорогой. Рассматривались изображения участков лесного полога в Красноармейском р-не Приморского края до рубки — за 10.08.2015, угол крена  $26^{\circ}$ , и два изображения, снятых почти в надир за 25.08.2015, угол крена  $1^{\circ}$ , и после рубки — за 14.09.2015, угол крена  $4^{\circ}$  (рис. 1а–в, см. с. 49). Наличие в выбранном районе рубки, которая произошла между 25 августа и 14 сентября 2015 г., было подтверждено Всемирным фондом дикой природы (англ. World Wide Fund for Nature — WWF). На рис. 1г (см. с. 49) показан участок с найденными экспертом зонами рубок, наличие которых было подтверждено. Он представляет собой результат работы алгоритма (Алексанин и др., 2019а) после фильтрации выделенных зон по площади (20 пикселей) и сглаживания медианным фильтром.

Все изображения были автоматически совмещены друг с другом на основе нового метода совмещения изображений с оценкой точности совмещения каждого пикселя (Алексанин и др., 2019б). Также все изображения прошли стандартную процедуру выравнивания или эквализации яркостных характеристик на основе линейного преобразования яркости по гистограмме относительно эталонной (Гонсалес и др., 2006). Далее значения яркости изображения квантовались на 8, 16 или 32 уровня яркости. После чего согласно разработанной технологии по критерию длин серий (Колодникова, 2004; Прэтт, 1982) определялся характерный линейный размер (лаг) структурного элемента текстуры.

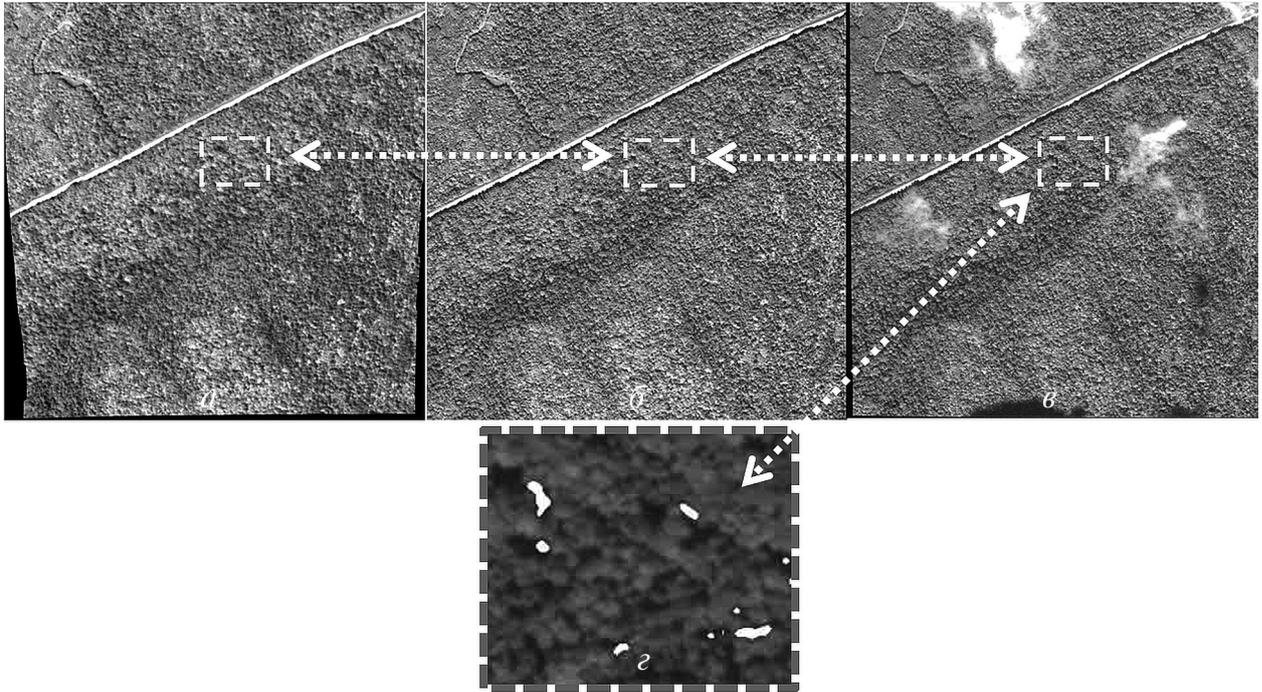


Рис. 1. Панхроматические изображения прибора «Геотон-Л1» с российского спутника «Ресурс-П» лесного полога в Красноармейском районе Приморского края: *а* — 10.08.2015; *б* — 25.08.2015; *в* — 14.09.2015; *г* — выявленные экспертом зоны рубки одиночных деревьев на изображении за 14.09.2015, которые подтверждены Всемирным фондом дикой природы

Размер рассматриваемых сцен  $701 \times 701$  пиксель. Анализ проводился на тестовых участках размером  $64 \times 64$  пикселя. Величина смещения или лага, на котором рассматривался перепад яркости, выбиралась от 10 до 20 пикселей, а ориентация лага рассматривалась в трёх положениях — горизонталь, диагональ, вертикаль.

### Подход на основе матрицы смежности перепадов яркости по паре изображений

Наиболее полное построение признаков текстуры одиночного изображения получается на основе классической матрицы смежности абсолютных яркостей (Прэтт, 1982; Харалик, 1979), которая, по сути, является матрицей частоты встречаемости значений яркости в пикселях на заданном векторе определённой длины или лаге. Но редкие точечные изменения яркости, обусловленные рубками отдельных деревьев, существенно саму текстуру не меняют. Поэтому признаки на основе классической матрицы смежности яркости не работают (Борзов, Потатуркин, 2014; Борзов и др., 2016; Тымчук, 2018; Храмцова, Алексанина, 2021). Однако при использовании матрицы смежности яркости было замечено (Алексанина, Храмцова, 2022), что редкие точечные изменения меняют статистику не самой яркости, а перепадов яркости на определённых смещениях.

Для обнаружения изменчивости перепадов яркости был предложен новый подход на основе построения матрицы частоты переходов или изменений перепадов яркости. Назовём это короче — матрица смежности перепадов яркости (МСПЯ) для двух изображений на определённом векторе смещения. Тогда ячейка МСПЯ двух изображений будет показывать частоту перехода конкретного перепада яркости 1-го изображения при определённом векторе смещения в другой перепад яркости на 2-м изображении при таком же векторе смещения (рис. 2, см. с. 50).

В данном подходе МСПЯ двух изображений формируется аналогично классической матрице смежности яркости, только вместо яркости  $I$  в ней рассматриваются перепады  $\Delta I$ , где

$I$  — уровень квантования яркости от 1 до  $K$ . Тогда для заданного лага (заданного смещения по горизонтали и вертикали в пикселях  $\Delta x, \Delta y$ ) величина перепада  $\Delta I = I(x, y) - I(x + \Delta x, y + \Delta y)$  меняется от  $-K$  до  $+K$ . Соответственно, перепад яркости идентифицируется номером  $i$  от 1 до  $2K + 1$ . При заданном векторе смещения подсчитывается число переходов перепада яркости  $i$  на 1-м изображении в перепад яркости  $j$  на 2-м изображении. Результат заносится в ячейку  $(i, j)$  МСПЯ. Матрица смежности перепадов яркости, которую обозначим  $\mathbf{P}$ , будет иметь размер  $(2K + 1) \times (2K + 1)$ . Каждый элемент матрицы  $\mathbf{P}$  размером  $(2K + 1) \times (2K + 1)$  элементов будет содержать число переходов  $\mathbf{P}(i, j)$  перепада яркости  $i$  на 1-м изображении в перепад яркости  $j$  на 2-м изображении между пикселями, взаимное расположения которых определяется вектором смещения  $(\Delta x, \Delta y)$ :

$$\mathbf{P}(i, j) = \sum_y \sum_x \{1, \text{если } \Delta I^1(x, y) = i \text{ и } \Delta I^2(x, y) = j; \text{ иначе } 0.$$

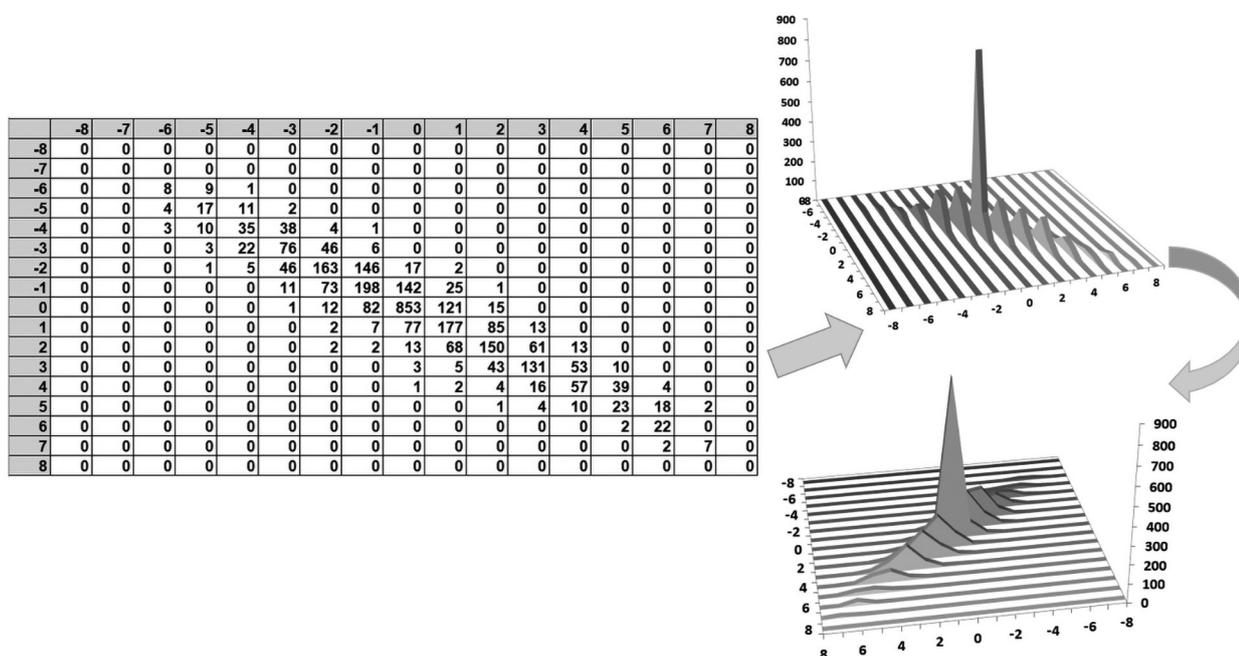


Рис. 2. Матрица смежности перепадов яркости пары изображений лесного полога при восьми уровнях квантования одного и того же участка (64×64 пикселя) без рубки, снятого в наدير. Вид этой матрицы в трёхмерном виде и с поворотом. По оси  $X$  и  $Y$  отложены величины перепадов, по оси  $Z$  — частота переходов одного перепада в другой

При сравнении похожих по текстуре спутниковых изображений, снятых в наدير, МСПЯ будет выглядеть как диагональная (рис. 3а, б, см. с. 51). Если углы съёмки разные, одно изображение снято под углом (наклон), другое в наدير, диагональ размывается (рис. 3в, г, см. с. 51). При наличии изменений типа «рубок» на близких по параметрам угла съёмки и угла солнца изображениях в матрице МСПЯ в стороне от диагонали появляются аномальные значения матрицы  $\mathbf{P}$  — «всплески» значений, которые выделены пунктирными овалами (рис. 3д, е, см. с. 51).

Такие всплески частоты изменений перепадов яркости в стороне от основной диагонали МСПЯ при наличии яркостных изменений типа рубки можно использовать для поиска пикселей с рубкой. При съёмке наدير/наدير для 8 уровней яркости такие всплески приходятся на изменение перепадов яркости на 3 и более уровней (см. рис. 3д), а при 16 уровнях яркости — на 6 и более уровней яркости (см. рис. 3е). Однако при съёмке наклон/наدير такие всплески частоты изменений перепадов яркости выделить сложнее (рис. 3ж, и, см. с. 51). Эти небольшие всплески изменения перепадов яркости в стороне от диагонали, назовём их аномалиями частот МСПЯ, указывают на наличие яркостных изменений, которые будем считать рубками.

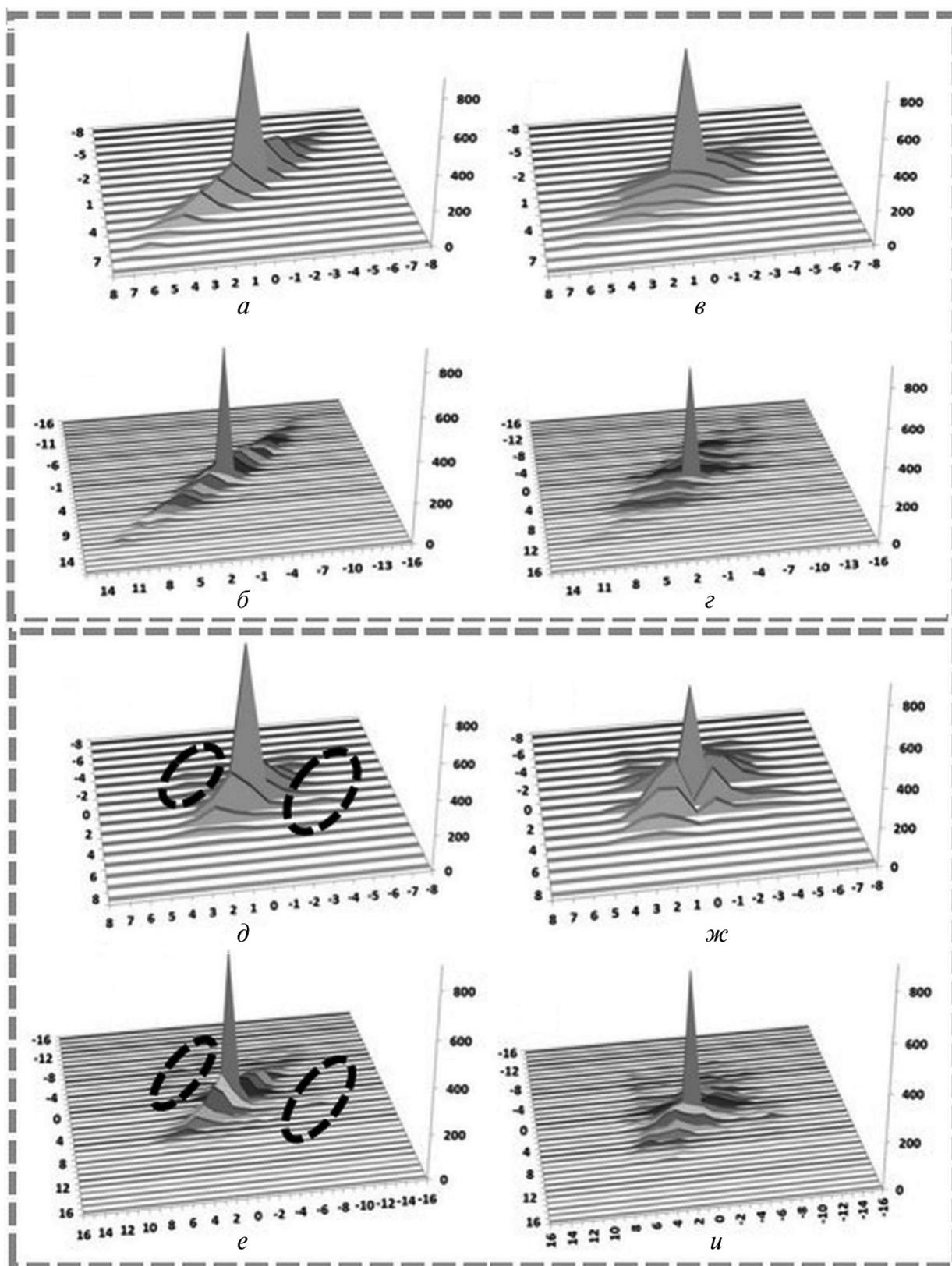


Рис. 3. Матрицы смежности перепадов яркости одного и того же участка лесного полога (64×64 пикселя) при разных условиях съёмки и уровнях квантования яркости. Верхний блок — без рубки: а — надир/надир, 8 уровней яркости; б — надир/надир, 16 уровней яркости; в — наклон/надир, 8 уровней яркости; г — наклон/надир, 16 уровней яркости. Нижний блок — с рубкой: д — надир/надир, 8 уровней яркости; е — надир/надир, 16 уровней яркости; ж — наклон/надир, 8 уровней яркости; и — наклон/надир, 16 уровней яркости

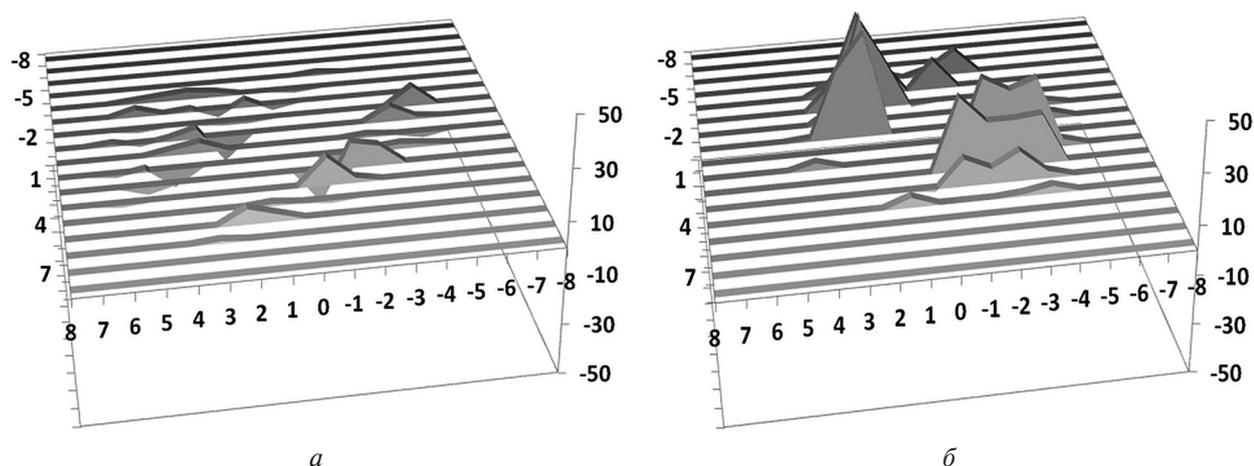


Рис. 4. Разность МСПЯ для восьми уровней яркости на участке 64×64 пикселя при съёмке в наклон/надир: а — для пары участков без рубки за 10.08.2015 и 25.08.2015; б — для пары участков за 10.08.2015 и 14.09.2015, второй из которых после рубки. Диагональные элементы обнулены, чтобы показать всплески изменений перепадов яркости вне диагонали матрицы МСПЯ

Всплески изменения перепадов яркости в стороне от диагонали особенно чётко обнаруживаются в разности матриц МСПЯ (1-я матрица — это МСПЯ двух изображений, оба изображения сделаны до рубки за 10.08.2015 и 25.08.2015 (см. рис. 1а, б) и 2-я матрица — это МСПЯ двух изображений, одно изображение до рубки за 10.08.2015, второе — после рубки за 14.09.2015 (см. рис. 1а, в)), если убрать из рассмотрения ближайшие к диагональной линии элементы (рис. 4). Видно, что в случае с рубкой частота изменения перепадов яркости в стороне от диагонали возросла многократно. Это объясняется тем, что появились новые осветлённые и затемнённые участки лесного полога.

Как возможные рубки будем рассматривать только те пары пикселей на зафиксированном лаге, в которых происходит изменение перепада при переходе от состояния до рубки к состоянию возможной рубки и это изменение составляет не менее 3 уровней яркости для 8 уровней яркости и 6 уровней яркости для 16 уровней яркости. На рис. 5а–в видно, что при таком подходе выделенные даже на одном лаге (смещение по горизонтали в 10 пикселей) пиксели попадают в зоны, выделенные экспертом и где действительно была рубка по данным WWF. Следует отметить, что форма выделенной области рубки может существенно зависеть от выбранного лага, длины смещения и направления, особенно при разных углах съёмки. Требуется алгоритм оценки достоверности выделения рубки. Число уровней яркости существенно на результат не влияет. Поэтому дальнейшие исследования будем проводить для восьми уровней яркости.

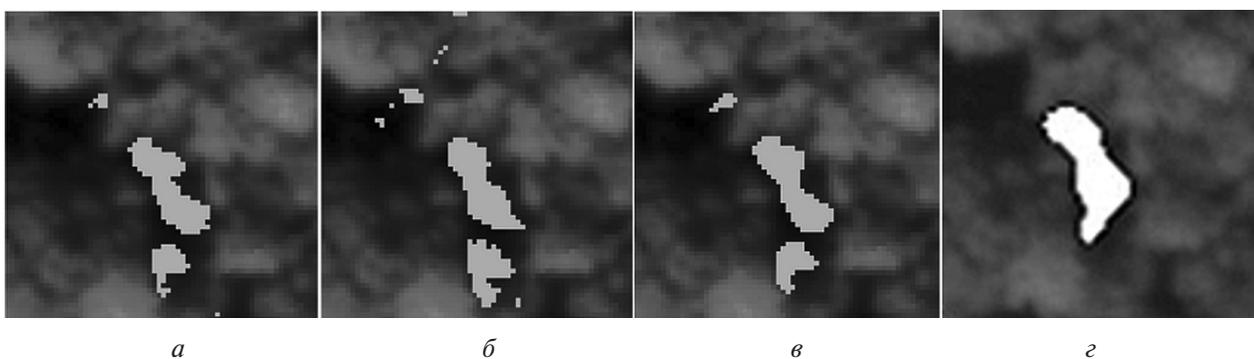


Рис. 5. Зоны потенциальной рубки на участке 64×64 пикселя, в которых изменение перепада яркости больше 3 уровней при 8 уровнях яркости и съёмке: а — надир/надир; б — наклон/надир; в — больше 6 уровней при 16 уровнях яркости и съёмке надир/надир; г — контрольный результат обнаружения экспертом зон рубок, реальность которых подтверждена данными WWF

## Алгоритм расчёта зон рубки

Аномалии МСПЯ дают нам признаки изменения яркости для областей, в которых возможны яркостные изменения типа рубки. Для подтверждения рубок и уточнения их границ предлагается следующий алгоритм.

Рассмотрим, что такое рубка с точки зрения изменения перепада яркости. Верхушки крон деревьев лесного полога освещены. При рубке исчезают высветленные кроны деревьев, что приводит к появлению тёмных пикселей. В то же время освещаются деревья, которые были затенены вырубленными, т. е. появляются светлые пиксели. В таком случае идентификация рубка/не рубка работает следующим образом. Рассмотрим пары пикселей, между значениями яркости которых рассчитывается перепад. Пусть  $(a_1, a_2)$  — пара яркости 1-го по времени изображения,  $(b_1, b_2)$  — пара яркости 2-го по времени изображения. Рассмотрим, при каких условиях пиксель с номером 1 соответствует рубке. Предполагаем, что два изображения и выбор лага идеальны, т. е. там, где рубки не было, яркость не изменилась, а вторая точка заведомо рубкой не является. Тогда сравниваем перепады каждого изображения  $\Delta a = a_1 - a_2$  и  $\Delta b = b_1 - b_2$ . Если  $\Delta a > \Delta b$ , то уменьшение перепада будем рассматривать как признак возможной рубки. Но  $\Delta a > \Delta b$  может означать не только уменьшение яркости в 1-м пикселе (рубку), но и увеличение яркости во 2-м пикселе. Поэтому, чтобы идентифицировать изменение яркости именно в 1-м пикселе 1-го в паре изображения, рассмотрим изменение яркости отдельных пикселей с двух изображений  $\Delta 1 = a_1 - b_1$ . Если  $\Delta 1 > 0$ , то это означает, что яркость 1-го в паре пикселя уменьшилась, он потемнел, т. е. рубка произошла в 1-м пикселе, поэтому идентифицируем его как потенциальную рубку. При условии  $\Delta a < \Delta b$  и  $\Delta 1 < 0$  получается, что 1-й пиксель в 1-й паре посветлел. Идентифицируем его как «осветление». Признаком изменений типа рубка будем считать появление рядом потемневших (рубка) и осветлённых (осветление) пикселей, т. е. наличие парных зон рубка/осветление.

Наши предположения об идеальности изображений и выборе лага на практике не выполняются; 2-й пиксель может менять яркость как за счёт шумов оцифровки и квантования, так и может прийти на рубку. Но шумы квантования носят случайный характер, а рубки — выборочные, т. е. в окрестности рубки с относительно большим лагом вероятность того, что 2-й пиксель будет также соответствовать рубке, мала. Для получения достоверного результата идентификации зон рубка/осветление процедура проводится при разных по величине и направлению лагах. Если пиксель, который идентифицирован как рубка, подтверждает свой статус в установленном процентном соотношении, то считаем, что он соответствует рубке. В случае, когда углы сканирования участка на двух изображениях близки и углы солнца над горизонтом в момент съёмки тоже, данный результат можно рассматривать как конечный. В нашем случае это 2-е и 3-е изображения при съёмке в надир (угол крена  $1^\circ$ )/надир (угол крена  $4^\circ$ ).

При рассмотрении изображений, снятых под разными углами, возникает много артефактов. Пиксели, идентифицированные предложенным алгоритмом как рубки, на паре таких изображений будут соответствовать в основном не рубкам, а изменениям в тенях лесного полога, которые обусловлены разным ракурсом съёмки и изменением угла солнца над горизонтом. В таком случае для идентификации рубок используются расчёты по двум парам изображений: 1-я пара — это два изображения, когда съёмка и 1-го, и 2-го проведена до реальной рубки; 2-я пара — это изображения, когда съёмка 1-го изображения сделана до реальной рубки, а съёмка 2-го изображения после реальной рубки. Для идентификации зон рубка/осветление выделенные пиксели на 1-й паре (без реальных рубок) сравниваются с выделенными как зоны рубка/осветление пикселями 2-й пары. Если на двух парах изображений пиксель выделен и имеет один и тот же статус, то он игнорируется. Остаются как зоны рубка/осветление только те пиксели, которые имеет статус рубки/осветление только на 2-й паре изображений, а на 1-й паре изображений у них такого статуса нет.

## Эксперименты

К тестируемым участкам был применён алгоритм при 8 уровнях яркости и 9 разных лагах, различающихся по длине — 10, 15, 20 пикселей и по трём направлениям: слева направо (горизонталь), сверху вниз (вертикаль), от левого верхнего края к правому нижнему краю (диагональ). Результирующей зоной была область из пикселей, в которых на основе сравнения матриц (МСПЯ) двух пар изображений были обнаружены изменения перепада яркости в 3 уровнях квантования и более при 8 уровнях квантования яркости и не менее, чем в 6 случаях при 9 разных векторах смещения, т. е. с вероятностью около 67 %.

Анализ результатов предложенного алгоритма показал, что в случае, когда изображения до реальной рубки и после реальной рубки сделаны почти в надир (рис. ба), алгоритм уверенно выделяет зоны рубка/освещение по паре изображений (рис. ба\*). Поскольку углы сканирования на изображениях, снятых в надир, близки, то количество ложных аномалий небольшое и они малы по пространственному размеру (рис. ба, а\*).

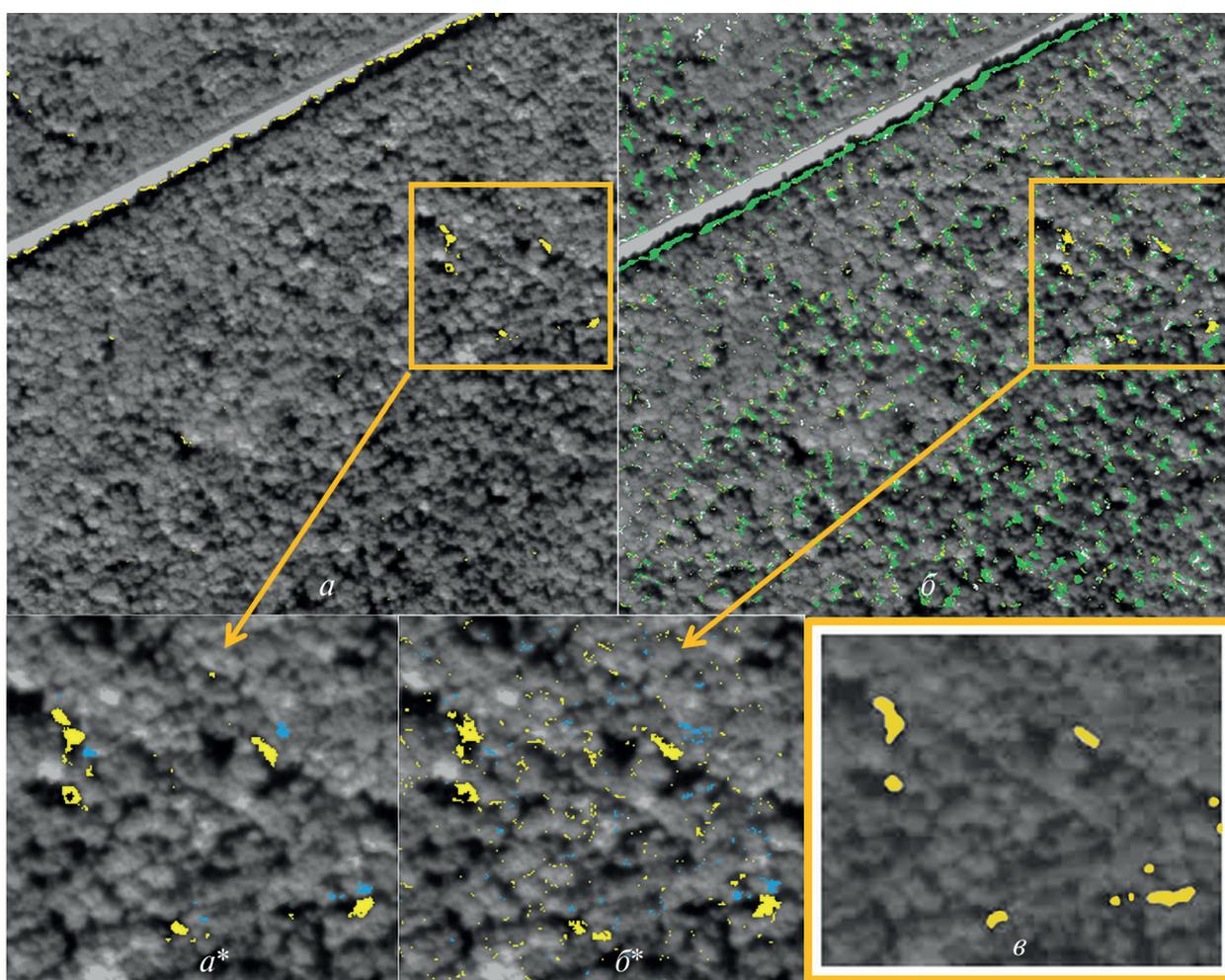


Рис. 6. Обнаружение изменений типа рубки (жёлтый цвет) на участке  $701 \times 701$  пикселей по парам изображений: *a* — под близкими углами крена съёмки ( $1$  и  $4^\circ$ ); *b* — под разными углами крена съёмки ( $26$  и  $4^\circ$ ), зелёным цветом выделены общие аномалии перепада яркости пары изображений без рубок и пары изображений с рубками; *a\** — фрагмент рисунка *a* с зонами освещения (синий цвет); *b\** — фрагмент рисунка *b* с зонами освещения (синий цвет); *в* — зоны рубок, выделенные экспертом

На рис. 6б приведена более детальная информация процедуры выделения потенциальных рубок. Приведены аномалии для 1-й пары изображений (до реальной рубки деревьев) и 2-й пары, включающей реальную рубку. Здесь зелёным цветом выделены пересечения ано-

малый, занимающие, как видно, большие площади и не являющиеся рубкой. Белым цветом обозначены аномалии 1-й пары, которые не вошли ни в одну из рассматриваемых категорий, т. е. не идентифицированы как рубки или как пересечение аномалий яркости двух пар рассматриваемых изображений. Жёлтым цветом обозначены пиксели, которые можно отнести к рубкам. На *рис. 6б\** для пары изображений, съёмка которых сделана под разными углами крена, также показаны зоны рубка/осветление. Видно, что мелкие по площади артефакты, не являющиеся рубками, всё равно присутствуют. Последние можно фильтровать, например, оценивая площади компактно расположенных пикселей (Алексанин и др., 2019а).

Проблема фильтрации появляющихся в результате работы алгоритма мелких артефактов — это отдельная задача, требующая специального рассмотрения и подхода. Характерные размеры аномалий зависят от разницы углов сканирования, угла солнца над горизонтом и неоднородности высоты полога леса. В частности, в данном случае максимальные аномалии возникают на дороге в основном за счёт изменчивости тени. Если есть последовательность спутниковых изображений, например в разное время суток, то можно вычислить неоднородность высоты полога, размеры теней и их положение на изображении. В результате можно оценить аномалии, которые получаются из-за разницы углов и теней, что позволит их отфильтровать.

Необходимо отметить, что даже при съёмке под одинаковыми углами и близкими углами солнца над горизонтом следует использовать последовательность из не менее трёх или четырёх изображений. Наличие неотфильтрованной полупрозрачной облачности (присутствующей, например, на *рис. 1в*) тоже будет давать артефакты, поэтому требуется проверка устойчивости выявленных зон рубка/осветление во времени.

## Заключение

Подход для автоматического обнаружения мелкомасштабной изменчивости лесного полога на спутниковых панхроматических изображениях на основе сравнения матриц смежности перепадов яркости пары и более изображений показал, что мелкомасштабные изменения яркости типа рубка обнаруживаются в появлении аномальных ненулевых частот МСПЯ на удалении от диагонали матрицы. По результатам тестирования предложенного подхода можно сделать следующие выводы.

1. Результат предложенного подхода зависит от параметров наблюдения, а именно от угла съёмки. На спутниковых изображениях, снятых в надири, алгоритм уверенно идентифицирует изменения типа рубка. Если хотя бы одно из спутниковых изображений снято под углом, появляются артефакты. Поэтому необходимо анализировать не пару изображений, а серию пар, т. е. три и более изображений.
2. Число уровней квантования яркости не сильно меняет конечный результат. На восьми уровнях яркости зоны потенциально реальных рубок приемлемо определяются.
3. Увеличение числа квантования яркости влияет на детальность границ определяемых зон потенциально реальных рубок.
4. Преимуществом предложенного подхода является то, что он позволяет сузить зону поиска потенциально реальных рубок, определив параметры этих зон через пороговую величину изменения перепада яркости.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН — тема № FWFV-2021-0004, а также при финансовой поддержке Дальневосточного федерального университета — программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»: Центр цифрового развития.

## Литература

1. *Алексанин А. И., Ким В., Морозов М. А., Фомин Е. В.* (2019а) Обнаружение рубок отдельных деревьев по теням на основе снимков прибора «Геотон» спутника «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 174–182. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-174-182.
2. *Алексанин А. И., Морозов М. А., Фомин Е. В.* (2019б) Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 9–16. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16.
3. *Алексанина М. Г., Храмцова А. В.* Статистика изменений яркости двух изображений для поиска мелкомасштабных изменений по данным спутника «Ресурс-П» // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2022. С. 11. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
4. *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. Вып. 2. Т. 2. С. 217–227.
5. *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.
6. *Борзов С. М., Потатуркин О. И.* Классификация типов растительного покрова по гиперспектральным данным дистанционного зондирования Земли // Вестн. НГУ. Сер.: Информац. технологии. 2014. Т. 12. № 4. С. 13–22.
7. *Борзов С. М., Потатуркин О. И.* Повышение эффективности классификации гиперспектральных изображений за счет разномасштабной пространственной обработки // Компьютер. оптика. 2020. Т. 44. № 6. С. 937–943. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-779.
8. *Борзов С. М., Узилов С. Б.* Обнаружение слабозаметных антропогенных изменений растительного покрова по мультиспектральным разновременным изображениям // Вычисл. технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 40–48.
9. *Борзов С. М., Потатуркин А. О., Потатуркин О. И., Федотов А. М.* Исследование эффективности классификации гиперспектральных спутниковых изображений природных и антропогенных территорий // Автометрия. 2016. Т. 52. № 1. С. 3–14. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-779.
10. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.* Цифровая обработка изображений в среде MatLab: пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
11. *Колодникова Н. В.* Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2004. Т. 9. № 1. С. 113–123.
12. *Миклашевич Т. С., Барталев С. А.* Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24.
13. *Прэнтт У.* Цифровая обработка изображений: в 2-х т.; пер. с англ. М.: Мир, 1982. Т. 1. 311 с.
14. *Сидорова В. С.* Неконтролируемая классификация текстурных изображений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2007. № 3. С. 178–183.
15. *Старовойтов А. В., Фаттахов А. В., Ячменёва Е. А. и др.* Оценка объемов вырубки леса с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естествен. науки. 2021. Т. 163. Кн. 4. С. 591–602. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.4.
16. *Тымчук А. И.* О текстурных признаках в задаче сегментации аэрофотоснимков на основе матриц яркостной зависимости // Кибернетика и программирование. 2018. № 6. С. 31–39. DOI: 10.25136/2306-4196.2018.6.28395.
17. *Харалик Р. М.* Статистический и структурный подходы к описанию текстур // Тр. Ин-та инженеров по электронике и радиотехнике: пер. с англ. 1979. Т. 67. № 5. С. 98–120.
18. *Храмцова А. В., Алексанина М. Г.* Обнаружение рубок на основе матрицы смежности перепадов яркости на примере изображений спутника «Ресурс-П» // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2021. С. 389. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
19. *Afaq Y., Manocha A.* Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review // Ecological Informatics. 2021. V. 63. Article 101310. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101310>.
20. *Bromiley P., Thacker N., Courtney P.* Non-parametric image subtraction using grey level scattergrams // Image and Vision Computing. 2002. V. 20. No. 9–10. P. 609–617. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00050-1).

21. Khan S. H., He X., Porikli F., Bennamoun M. Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. P. 5407–5423. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2707528.
22. Li F., Zeng Y., Luo J., Ma R., Wu B. Modeling grassland aboveground biomass using a pure vegetation index // Ecological Indicators. 2016. V. 62. P. 279–288. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.11.005.
23. Matosak B. M., Fonseca L. M. G., Taquary E. C. et al. Mapping deforestation in cerrado based on hybrid deep learning architecture and medium spatial resolution satellite time series // Remote Sensing. 2022. V. 14. No 1. Article 209. <https://doi.org/10.3390/rs14010209>.
24. Miettinen J., Shi Ch., Liew S. Ch. Land cover distribution in the peatlands of Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with changes since 1990 // Global Ecology and Conservation. 2016. V. 6. P. 67–78. DOI: 10.1016/j.gecco.2016.02.004.
25. Milne K. Change direction analysis using landsat imagery: A review of methodology // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. “Remote Sensing: Moving Toward the 21<sup>st</sup> Century”. 1988. P. 541–544. <https://doi.org/10.3390/rs12111781>.
26. Townshend J. R. G., Justice C. O., Gurney C., McManus J. The impact of misregistration on change detection // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 1992. V. 30(5). P. 1054–1060. DOI: 10.1109/36.175340.
27. 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: PhD Thesis. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Department of Urban and Regional Planning and Geo-Information Management, 2005. 64 p. <https://doi.org/10.3990/1.323024368>.

## Detection of small-scale forest canopy variability in satellite panchromatic images based on brightness difference adjacency matrix

M. G. Aleksanina, A. V. Khramtsova

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*  
*Far Eastern Federal University, Vladivostok 690922, Russia*  
*E-mail: margo@mail.ru*

In the example of the problem of detecting single-tree felling in satellite images of forest canopy, we solve the problem of searching for optimal features that identify the presence of changes in panchromatic images regardless of the observation conditions. The initial data are panchromatic images of the Geoton-L1 instrument from the Russian Resurs-P satellite (spatial resolution 0.7 m). We propose an approach based on the adjacency matrix, but not of brightness, as in the classical case, but of brightness differences for a given displacement vector on which the difference is considered; and not for a single image, but for a pair of images. Thus, the frequency of transition of a certain difference of the first image into a certain difference of the second image is considered. Absence of any significant changes in the structure of images is manifested in the matrix of brightness difference adjacency, in that non-zero values of frequencies are concentrated along its diagonal. If even small spatial changes in brightness appear, “anomalous” frequencies appear — non-zero frequency values outside the diagonal. This feature is used to identify changes of the “felling” type. When comparing pairs of satellite images acquired at close angles of the survey and the sun above the horizon, the approach finds areas of change in brightness differences well. If the angles differ significantly, artifacts — false felling — appear. Anomalous changes in brightness differences can be both in areas of potentially real felling, and due to a mismatch between the shooting angles and the sun above the horizon. In this case, it is necessary to analyze the stability of the identified anomalies according to the sequence of adjacency matrices of changes in brightness differences from three images. To confirm the reliability of the felling and clarify its boundaries, the brightness anomaly calculations are used for different displacement vectors.

**Keywords:** satellite images, small-scale variability, texture, brightness differential, changes in the magnitude of the brightness difference, frequency matrix, single felling

Accepted: 12.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-47-59

## References

1. Aleksanin A. I., Kim V., Morozov M. A., Fomin E. V. (2019a), Individual tree logging detection by shadows in Geoton sensor imagery of the Resurs-P satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 174–182 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-174-182.
2. Aleksanin A. I., Morozov M. A., Fomin E. V. (2019b), The problems of image superimposition with one-pixel accuracy, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 9–16 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16.
3. Aleksanina M. G., Khramtsova A. V., Statistics of changes in brightness of two images to search for small-scale changes according to data from the Resurs-P satellite, *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 20<sup>th</sup> Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2022, p. 11 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
4. Bartalev S. A., Kuryatnikova T. S., Stibig Kh. Yu., 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, Issue 2, Vol. 2, pp. 217–227 (in Russian).
5. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyan E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
6. Borzov S. M., Potaturkin O. I., Vegetative cover type classification using hyperspectral remote sensing, *Vestnik NGU, Seriya: Informatsionnye tekhnologii*, 2014, Vol. 12, No. 4, pp. 13–22 (in Russian).
7. Borzov S. M., Potaturkin O. I., Improving the efficiency of hyperspectral image classification through multi-scale spatial processing, *Komp'yuternaya optika*, 2020, Vol. 44, No. 6, pp. 937–943 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-779.
8. Borzov S. M., Uzilov S. B., Detection of subtle anthropogenic changes in vegetation covermultispectral multi-temporal images, *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2016, Vol. 21, No. 1, pp. 40–48 (in Russian).
9. Borzov S. M., Potaturkin A. O., Potaturkin O. I., Fedotov A. M., Study of the efficiency of classification of hyperspectral satellite images of natural and anthropogenic areas, *Avtometriya*, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 3–14 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-779.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L., *Digital Image Processing Using MATLAB*, Dorling Kindersley Pvt Ltd, 2006, 620 p.
11. Kolodnikova N. V., Overview of texture features for pattern recognition tasks, *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2004, Vol. 9, No. 1, pp. 113–123 (in Russian).
12. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 9–24 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24.
13. Pratt W. K., *Digital image processing*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1978, 750 p.
14. Sidorova V. S., Unsupervised texture image classification, *Interekspo Geo-Sibir'*, 2007, No. 3, pp. 178–183 (in Russian).
15. Starovoitov A. V., Fattakhov A. V., Yachmeneva E. A. et al., Estimating deforestation volumes using remote sensing data, *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 2021, Vol. 163, No. 4, pp. 591–602 (in Russian), DOI: 10.26907/2542-064X.2021.4.
16. Tymchuk A. I., On texture features in the problem of segmentation of aerial photographs based on brightness dependence matrices) *Kibernetika i programirovanie*, 2018, No. 6, pp. 31–39 (in Russian), DOI: 10.25136/2306-4196.2018.6.28395.
17. Haralick R. M., Statistical and structural approaches to texture, *Proc. IEEE*, 1979, Vol. 67, Issue 5, pp. 786–804, DOI:10.1109/PROC.1979.11328.
18. Khramtsova A. V., Aleksanina M. G., Detection of fellings based on the adjacency matrix of brightness differences using the example of images from the Resurs-P satellite, *Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2021, pp. 389 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
19. Afaq Y., Manocha A., Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review, *Ecological Informatics*, 2021, Vol. 63, Article 101310, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101310>.
20. Bromiley P., Thacker N., Courtney P., Non-parametric image subtraction using grey level scattergrams, *Image and Vision Computing*, 2002, Vol. 20, No. 9–10, pp. 609–617, [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00050-1).
21. Khan S. H., He X., Porikli F., Bennamoun M., Forest change detection in incomplete satellite images with deep neural networks, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, pp. 5407–5423, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2707528.

22. Li F., Zeng Y., Luo J., Ma R., Wu B., Modeling grassland aboveground biomass using a pure vegetation index, *Ecological Indicators*, 2016, Vol. 62, pp. 279–288, DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.11.005.
23. Matosak B. M., Fonseca L. M. G., Taquary E. C. et al., Mapping deforestation in cerrado based on hybrid deep learning architecture and medium spatial resolution satellite time series, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Article 209, <https://doi.org/10.3390/rs14010209>.
24. Miettinen J., Shi Ch., Liew S. Ch., Land cover distribution in the peatlands of Peninsular Malaysia, Sumatra and Borneo in 2015 with changes since 1990, *Global Ecology and Conservation*, 2016, Vol. 6, pp. 67–78, DOI: 10.1016/j.gecco.2016.02.004.
25. Milne K., Change direction analysis using landsat imagery: A Review of methodology, *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. "Remote Sensing: Moving Toward the 21<sup>st</sup> Century"*, 1988, pp. 541–544, <https://doi.org/10.3390/rs12111781>.
26. Townshend J. R. G., Justice C. O., Gurney C., McManus J., The impact of misregistration on change detection, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, pp. 1054–1060, DOI: 10.1109/36.175340.
27. 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, PhD Thesis*, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Department of Urban and Regional Planning and Geo-Information Management, 2005, 64 p., <https://doi.org/10.3990/1.323024368>.