

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 528.854

ВЫЯВЛЕНИЕ УЧАСТКОВ АНТРОПОГЕННО-ПРЕОБРАЗОВАННОЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА РАЗНОСЕЗОННОЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЁМКИ

© И. В. Журбин, А. С. Шаура, А. Г. Злобина, А. И. Баженова

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: aigul_bazh@udman.ru*

Комплексный анализ мультиспектральных данных, полученных в разные периоды вегетации, позволяет реконструировать современное состояние антропогенно-преобразованной природной среды и выявлять участки исторического природопользования. Неоднозначность проявления следов вторичной сукцессии лесных массивов требует сопоставления на разносезонных изображениях изменений спектральных признаков растительности и особенностей текстуры ландшафтных объектов. Методическая основа таких исследований — алгоритм обработки мультиспектральных данных, адаптированный для применения текстурных признаков Харалика на этапе извлечения признаков изображения. Совместная сегментация массивов разносезонной мультиспектральной съёмки «сглаживает» локальные, менее значимые изменения текстуры ландшафтных объектов, что позволяет более контрастно продемонстрировать обобщающие тенденции распределения растительности.

Территория обследования включала фрагмент дачи Пудемского железодельательного завода, где в первой половине XIX в. производились вырубki строевого и дровяного леса для нужд производства. Сегментированное изображение демонстрирует принципиальные отличия растительного покрова западной и восточной частей территории обследования: участка исторических лесосек и части дачи, которая не подвергалась интенсивному антропогенному воздействию.

Ключевые слова: текстурные признаки Харалика, сегментация изображений, разносезонная мультиспектральная съёмка, антропогенно-преобразованная природная среда.

DOI: 10.15372/AUT20240108

EDN: BEYNEQ

Введение. Выявление следов исторической хозяйственной деятельности и изучение последствий антропогенного преобразования природной среды необходимо и актуально. С одной стороны, такие исследования позволяют реконструировать систему жизнеобеспечения сообществ, существовавших в различные исторические периоды. Другим аспектом таких работ выступает возможность восстановить причинно-следственные связи процесса трансформации природной среды на участках исторического хозяйственного освоения, что является основой для решения экологических проблем и в перспективе базой для формирования системы рационального природопользования современного общества. Следы исторического антропогенного воздействия неоднозначно выражены в современном ландшафте. Одним из признаков исторических рубок леса, пашен, рудников и других зон хозяйственного освоения могут являться участки растительности, сформировавшейся в результате вторичной сукцессии [1]. Поэтому определение территории исторического природопользования на фоне природной среды, не подвергавшейся антропогенному воздействию, можно свести к задаче классификации растительности.

Исследование растительности и её классификация в зависимости от возраста, состояния и видового состава возможно при использовании спектральных характеристик её отражающей способности [2], полученных в результате мультиспектральной съёмки. Однако спектральные характеристики носят локальный характер и в существенной степени зависят от условий освещённости, времени съёмки и других факторов. Поэтому при поиске и анализе площадных объектов, выявлении определённых типов ландшафта или видов растительности более эффективной может быть оценка текстуры изображений [3].

Данная работа посвящена применению методов статистического анализа и текстурной сегментации изображений на основе признаков Харалика для выявления территории исторического природопользования на фоне природной среды, не подвергавшейся антропогенному воздействию. С целью повышения достоверности анализа в качестве исходных данных выступают результаты разносезонной мультиспектральной съёмки. В качестве антропогенно-преобразованной природной среды рассматриваются территории горнозаводских округов, создававшиеся со второй половины XVIII в. в северной части Вятской губернии [4]. Здесь сформировался экономический район с чугуноплавильными и железоделательными предприятиями, ориентированными на переработку местных болотных руд. Каждый горнозаводской округ включал заводскую дачу — участки с промышленными сооружениями, рудными месторождениями, лесными массивами, пашнями, усадьбами рабочих и пр. В Глазовском уезде Вятской губернии в 1759 г. был основан Пудемский железоделательный завод (совр. — с. Пудем Ярского района Удмуртской Республики).

Цель представленной работы состоит в разработке и апробации алгоритма комплексного анализа текстурных характеристик мультиспектральных снимков и оценке сезонной динамики их изменения, что позволяет выявить участки антропогенно-преобразованной природной среды.

Эталонные и исходные данные. Исторические картографические материалы. Наиболее информативные планы владений Пудемского завода были составлены в период Генерального межевания Вятской губернии в 1805–1835 гг. В данной работе внимание сосредоточено на ближайшей к предприятию округе.

Исходя из карты 1819 г., до начала хозяйственного освоения участка к востоку от межевой границы произрастал берёзовый лес, а к западу — смешанный, преимущественно еловый и пихтовый, необходимый для обеспечения железоделательного производства (рис. 1, *a*). Именно в западной части, судя по картографическим материалам 1832 г., производились наиболее интенсивные вырубki лесных массивов (тёмная заливка на рис. 1, *b*). Цифрами обозначены вырубki 1828–1832 гг., а литерой — более ранние вырубki 1818–1826 гг. На этом участке была проведена мультиспектральная аэрофотосъёмка (контур на рис. 1, *a*, *c*).

Аэрофотосъёмка в видимом диапазоне. Аэрофотосъёмочные работы (ООО «Финко», г. Ижевск) выполнены с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) самолётного типа Supercam S350F с бортовым двухчастотным геодезическим приёмником Javad TRE-G3TAKT и цифровой фотокамерой Sony α6000. Фотограмметрическая обработка снимков выполнялась в PHOTOMOD UAS, в результате которой получен цифровой ортофотоплан местности (рис. 2, *a*) в системе координат МСК-18 с разрешением 0,05 м/пиксель. Средние расхождения координат контрольных точек не превысили 0,06 м в плане и 0,08 м по высоте.

Визуальный анализ ортофотоплана позволяет определить расположение и конфигурацию ландшафтных рубежей, отмеченных на исторических картах, — Кешурского лога и р. Васеншур (рис. 2, *b*). Кроме того, фиксируется несколько участков с «рядной» структурой растительного покрова (см. рис. 2, *a*, справа). Вероятно, так проявляются разновозрастные лесопосадки XX–XXI вв. на участках поздних (по отношению к рассматриваемому историческому периоду) вырубok. Такие участки являются искажающим фактором

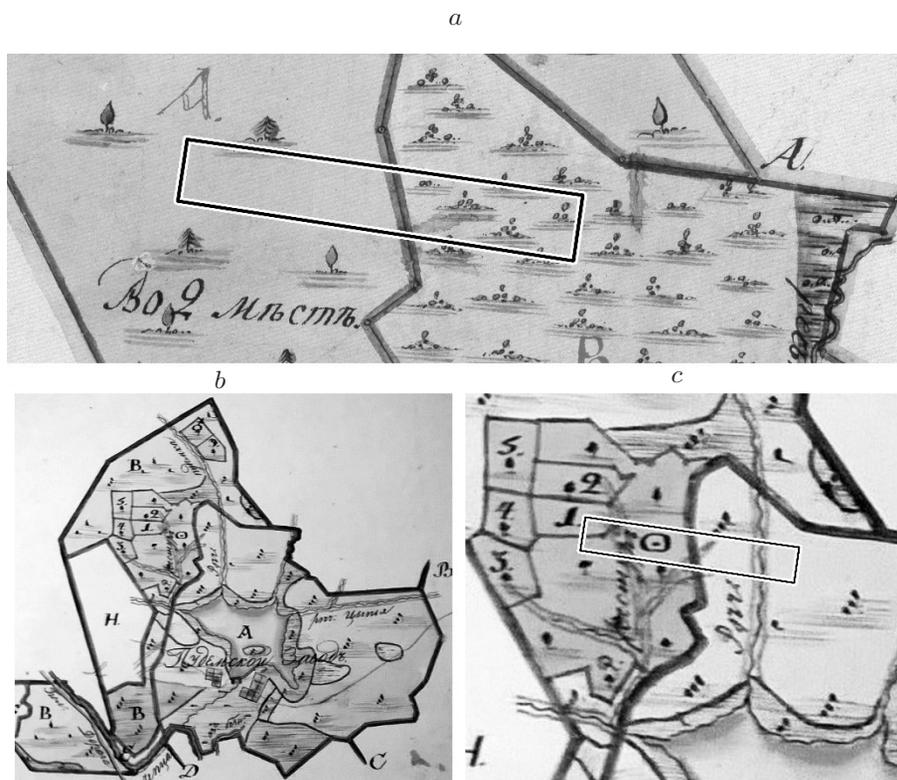


Рис. 1. Фрагменты плана дачи Пудемского железодельного завода: *a* — северо-западный участок дачи по состоянию на 1819 г. [5], *b* — завод и его ближайшая округа на карте 1832 г. [6], *c* — северо-западный участок дачи по состоянию на 1832 г. [6]

при выявлении следов исторического антропогенного преобразования, поэтому отмеченные штриховкой фрагменты (см. рис. 2, *b*) исключаются из дальнейшего анализа.

Мультиспектральная аэрофотосъёмка. Мультиспектральная аэрофотосъёмка (ООО «Финко», г. Ижевск) участка дачи Пудемского завода проводилась в два различных периода вегетации: в июне (максимальное развитие зелёной фитомассы) и в октябре (увядание растительности, опадание листьев). Съёмка выполнена камерой Parrot Sequoia с БПЛА Supercam S350F в четырёх спектральных диапазонах — зелёном (Green), красном (Red), граничном красном (RE) и ближнем инфракрасном (NIR). Разрешение снимков составило 0,31 м/пиксель.

Визуальное сопоставление разносезонных снимков (рис. 3) позволяет предположить, что возле лога и реки находится плотный хвойный лес (плотная растительность на снимках разных сезонов), значительная площадь западной части территории покрыта смешанным лесом с преобладанием хвойных пород (локальные участки растительности, сохранившиеся в переходный период). На востоке территории — редкий, преимущественно лиственный лес. Предложенная трактовка согласуется с историческими картами (см. рис. 1) и ортофотопланом (см. рис. 2). В целом сравнительный анализ данных разносезонной мультиспектральной съёмки позволяет на качественном уровне оценить распределение типов растительности. Для получения количественной оценки необходим статистический анализ аэрофотоснимков.

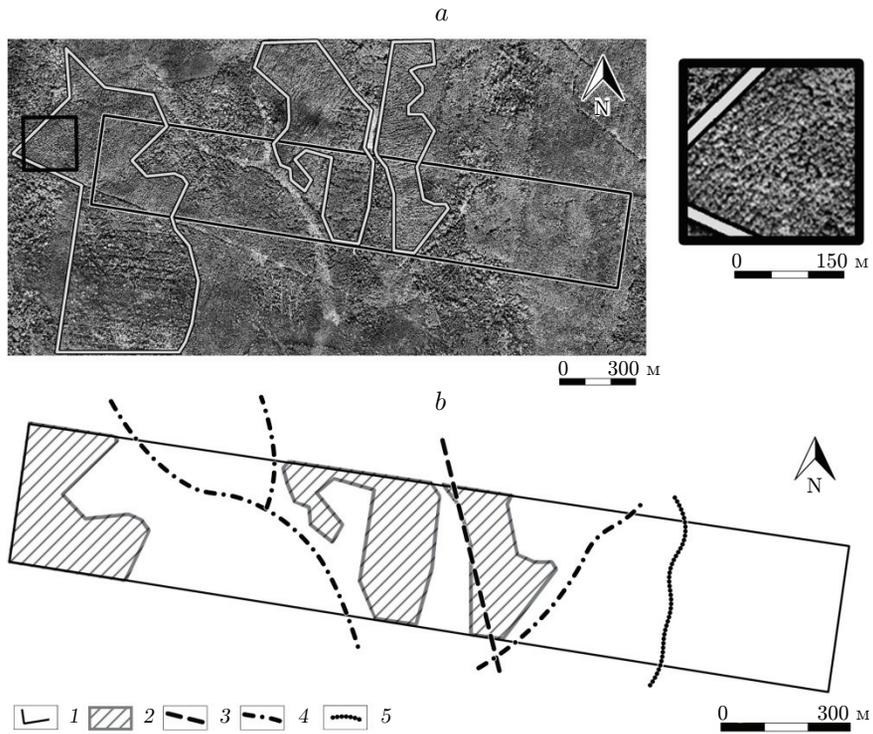


Рис. 2. Ортофотоплан (а) и план расположения ландшафтных рубежей (b): 1 — граница съёмки, 2 — лесопосадки XX–XXI вв., 3 — межевая граница, 4 — Кешурский лог, 5 — р. Васенщур



Рис. 3. Результат мультиспектральной съёмки (канал Green) в разные периоды вегетации

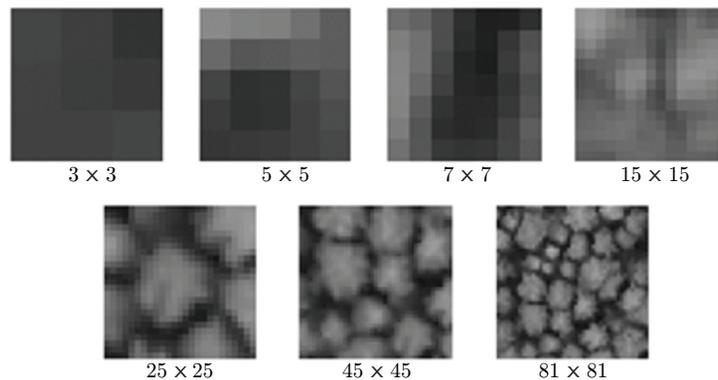


Рис. 4. Влияние размера скользящего окна на восприятие текстуры хвойного леса

Статистический анализ изображения на основе текстурных признаков. Для выявления участков с различной растительностью используется стандартный подход методов машинного обучения: выделение признаков — отбор признаков — классификация [7].

Выделение текстурных признаков. Первый этап заключается в описании исходных данных на более высоком уровне абстракций в виде численных признаков. В данном случае применяются текстурные признаки Харалика, хорошо зарекомендовавшие себя при решении задач сегментации [8]. Такие признаки являются статистическими функциями пространственной взаимозависимости значений яркости отдельных пикселей и вычисляются по оценкам плотности распределения вероятности нахождения сочетаний пикселей в смежных позициях.

Важной особенностью применения признаков Харалика является зависимость восприятия текстуры от размера скользящего окна $W \times W$. Показано, что при разрешении снимка 0,1–0,2 м/пиксель малое окно (3×3 или 5×5 пикселей) работает как детектор градиента яркости и недостаточно для определения крупных объектов [9]. По мере увеличения размера окна снижается роль отдельных пикселей: мелкие детали становятся неразличимы, начинают проявляться более крупные объекты и структуры (рис. 4). Исследования показали, что для текстурной обработки аэрофотоснимков лесных массивов и сельскохозяйственных угодий эффективно окно размером, близким к 20×20 пикселей.

Проведён анализ влияния размера окна на значения признаков в условиях решаемой задачи. Оптимальный размер окна составляет 25×25 пикселей, что позволяет различить большинство текстур на рассматриваемой территории. В областях с лесной растительностью такое окно захватывает целиком одно крупное или несколько мелких деревьев, что даёт возможность определить тип и видовой состав растительности (см. рис. 4).

Помимо размера скользящего окна, информативность текстурных признаков зависит от числа уровней квантования [10]. Выбор значений этих параметров влияет на разрежённость или заполненность матрицы уровней серого и, в конечном счёте, на статистическую значимость признаков. Предварительный анализ взаимного влияния числа уровней квантования и размера скользящего окна на репрезентативность матрицы смежности для различных текстур изучаемой территории показал, что при заданном размере окна 25×25 пикселей оптимальным является выбор 64 уровней (6 бит) квантования. Это согласуется с оценкой других исследователей, выполненных для схожих условий [11].

Анализ изображения на основе текстурных признаков состоит из нескольких этапов:

1. Квантование исходного изображения I в I_q с N градациями серого, $N < 255$.

Таблица 1

Основные текстурные признаки Харалика*

Contrast	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i-j)^2 p_{ij}$
Correlation	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{i-\mu_x}{\sigma_x} \right) \left(\frac{j-\mu_y}{\sigma_y} \right) p_{ij}$
Energy	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^2$
Entropy	$-\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^2 \log p_{ij}$
Homogeneity	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p_{ij}}{1+(i-j)^2}$
Variance	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (i-\mu)^2 p_{ij}$

*Примечание. $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ — средние значения и стандартные отклонения для величин p_x и p_y , которые обозначают суммы элементов матрицы P по строкам и столбцам соответственно.

2. Построение матрицы смежности для каждого положения скользящего окна:

$$X_{\theta}(i, j) = \sum_{m=1}^W \sum_{k=1}^W \begin{cases} 1, & \text{если } I_q(m, k) = i, \quad I_q(m + d_x, k + d_y) = j; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Матрица смежности X показывает, как часто пара пикселей с интенсивностями i и j оказывается смежной. Понятие смежности в направлении θ определяется вектором $r_{\theta} = (d_x, d_y)$, где d_x и d_y — расстояние между пикселями по горизонтали и вертикали соответственно. Значение X_{θ} рассчитывается для четырёх направлений: $r_0, r_{\pi/4}, r_{\pi/2}$ и $r_{3\pi/4}$, после чего усредняется $X = (X_0 + X_{\pi/4} + X_{\pi/2} + X_{3\pi/4})/4$ и нормируется

$$P = X / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X(i, j).$$

Не все текстурные признаки Харалика являются взаимно независимыми [12], поэтому принято решение ограничить рассмотрение основных, которые характеризуют контрастность (Contrast, Homogeneity), упорядоченность (Energy, Entropy), статистические оценки (Variance, Correlation).

3. Расчёт текстурных признаков Харалика [13] (табл. 1).

Визуализация признаков Харалика, рассчитанных для канала Green, представлена на рис. 5. Важно отметить, что распределение значений признаков меняется в зависимости от сезона съёмки: в июне для Homogeneity, Contrast и Variance наблюдается контраст между восточной и западной частями области обследования, а в октябре текстура растительного покрова выравнивается. Судя по изменению признака Entropy, происходит «инверсия» текстуры в западной части: переход от преимущественно низких значений признака (июнь) к преимущественно высоким значениям (октябрь). Выявленная динамика изменения текстуры ландшафта углубляет полученные ранее представления. Вариации текстуры в разные

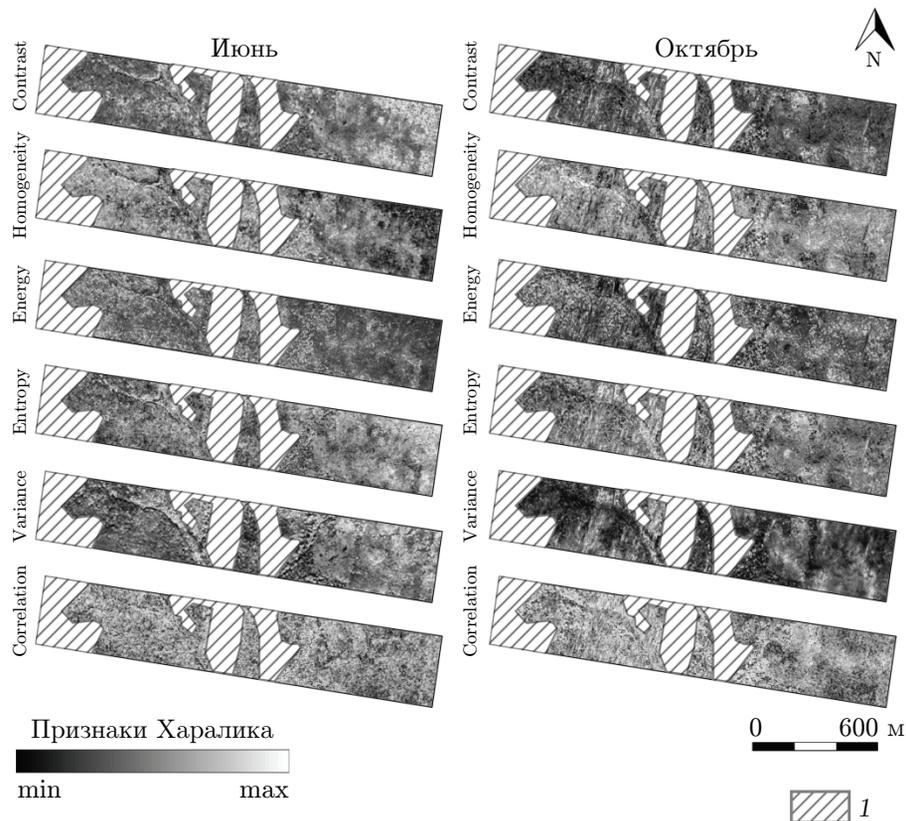


Рис. 5. Визуализация признаков Харалика (канал Green). Обозначение: 1 — лесопосадки XX–XXI вв.

сезоны съёмки позволяют детализировать особенности произрастания растительности, поэтому в работе используется комплексный анализ разносезонных данных.

Выявление главных компонент. Отбор подмножества признаков для снижения размерности и повышения интерпретируемости модели реализуется методом главных компонент (РСА) [14]. В результате работы РСА выбирается N первых главных компонент, кумулятивная дисперсия которых превышает 90 % [15].

Для июньских и октябрьских снимков получено по 24 массива данных — по 6 текстурных признаков Харалика для 4 каналов мультиспектрального изображения. В каждом из указанных наборов данных метод РСА позволил сократить признаковое пространство до 5 главных компонент, а при совместном анализе этих наборов (48 массивов) — до 12. Главные компоненты сложны для интерпретации в терминах текстуры изображения, однако в них содержится большая часть информации об особенностях текстуры исходных данных.

Сегментация изображения. Последний этап метода — разбиение исходного изображения на отдельные области (классы объектов) на основе признаков, выделенных и отобранных на первых двух этапах. Для этого используется хорошо масштабируемый метод k -means [16]. Значение параметра метода — количество классов сегментов — выбиралось согласно индексу Calinski — Harabasz [17] и было принято равным 5.

Результаты и обсуждение. Сравнительный анализ результатов сегментации мультиспектральной съёмки, выполненной в июне в период развитой растительности (рис. 6, *a*) и в октябре в переходный осенний период (рис. 6, *b*), демонстрирует следующие особенности структуры лесного массива. Наиболее стабильны по расположению (см. рис. 6, *a*, *b*) и

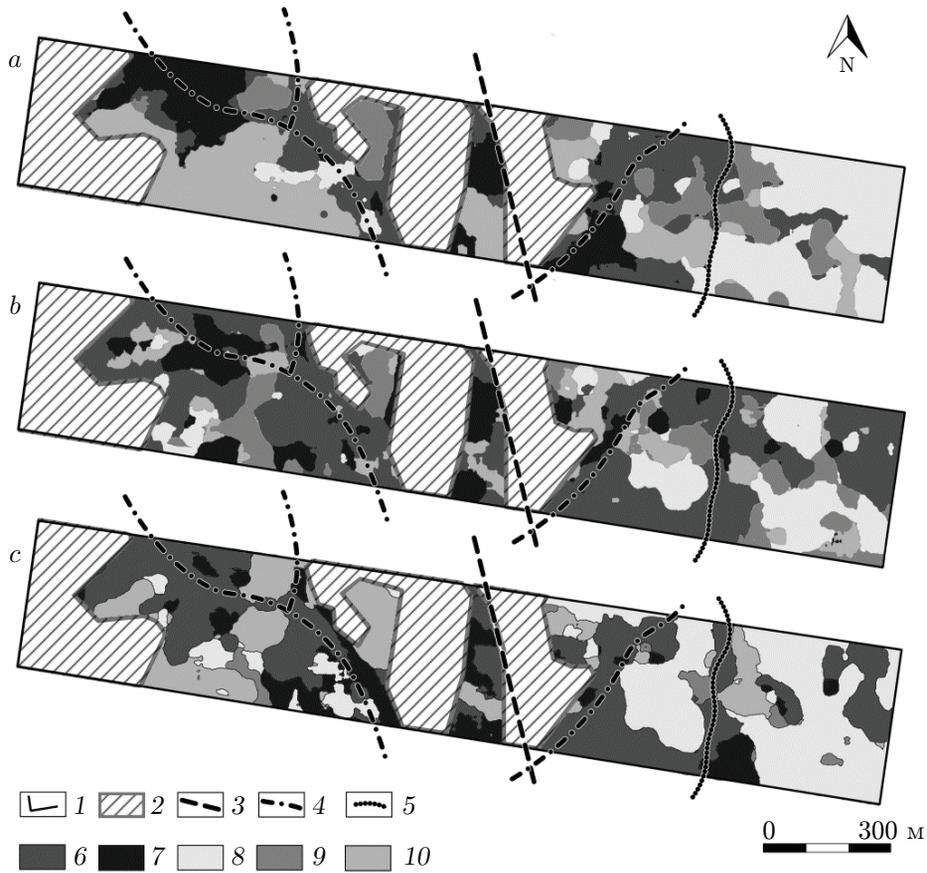


Рис. 6. Результаты сегментации данных мультиспектральной съёмки: *a* — июнь, *b* — октябрь, *c* — июнь и октябрь. Обозначения: 1 — граница съёмки; 2 — лесопосадки XX–XXI вв.; 3 — межевая граница; 4 — Кешурский лог; 5 — р. Васеншур; 6 — смешанный, преимущественно хвойный лес (Класс 1); 7 — хвойный плотный лес (Класс 2); 8 — редкий лиственный лес (Класс 3); 9 — смешанный лес (Класс 4); 10 — преимущественно лиственный лес (Класс 5)

Таблица 2

Площади сегментов выделенных классов (%)

Класс	Июнь	Октябрь	Июнь и Октябрь
1	21	47	38
2	15	17	14
3	24	13	26
4	13	12	3
5	27	11	19
Итого	100	100	100

по площади (табл. 2) сегменты Класса 2. Участки этого класса приурочены к ландшафтными рубежам — отвёршкам Кешурского лога и р. Васеншур. В исторических документах фиксируется: «... строевые леса имеют расположение более овражистое, низинное, скатное к рекам ...» [18]. Это позволяет предположить, что сегменты Класса 2 относятся к хвойному плотному лесу, текстура которого не зависит от сезона съёмки. Наибольшая вариация площади и расположения сегментов наблюдается для Классов 1, 3, 5, соответствующих смешанному и лиственному лесу. В июне сегменты Класса 1 однозначно локализируются вдоль выделенных ландшафтных рубежей, что, вероятно, определяется значительной долей деревьев хвойных пород. Сегменты Класса 5 расположены на периферии этой области. Эта особенность согласуется с картографическими материалами 1819 г. (см. рис. 1, *a*) и описанием лесного массива, расположенного западнее межевой границы заводской дачи (1809 г.): «... лес произрастает еловый, пихтовый, осиновый, частью липовый, берёзовый, ольховый ... качества посредственного. Строевые леса имеют расположение ... частью в середине лесного массива» [18]. В осенний период наблюдается принципиально иная ситуация: сегменты Класса 1 замещают сегменты Класса 5, что в большей степени выражено в западной части территории обследования (см. рис. 6, *a, b*). В некоторой степени сезонная динамика, отмеченная для Класса 5, характерна и для Класса 3, сегменты которого преимущественно локализируются в восточной части участка обследования. Существенное отличие состоит в том, что и в осенний переходный период сохраняется общая картина распределения участков Класса 3. При этом фиксируется лишь сокращение площади, занятой этими сегментами, при сохранении их конфигурации. В соответствии с историческими данными здесь не было вырубок, так как лес не пригоден для заводских нужд — «мелкий лес с покосами» (см. рис. 1, *b, c*). В целом в осенний период, по сравнению с периодом развитой растительности, площадь Класса 1 возрастает более чем в 2 раза при существенном уменьшении площади Классов 5 и 3 (см. табл. 2). Вероятно, участки смешанного и лиственного леса становятся неразличимы в связи с отсутствием в переходный осенний период листвы на деревьях. Сегменты Класса 4 занимают промежуточную позицию между сегментами Классов 1 и 3 (см. рис. 6, *a, b*) и, вероятно, соответствуют некоторой «пограничной» ситуации растительности между смешанным и лиственным лесом. Тенденции их распространения не позволяют предложить достаточно определённую интерпретацию этих сегментов. Характерно, что их площадь (см. табл. 2) и их расположение практически не зависят от сезона съёмки.

Таким образом, сезонная динамика расположения и площади сегментов может рассматриваться как основа для интерпретации выделенных классов растительности. Но при этом сравнительный анализ результатов сегментации мультиспектральной съёмки, выполненной в разные периоды вегетации, не позволяет выделить обобщающие тенденции распределения растительного покрова на территории обследования. Одним из способов выхода из этой ситуации является совместная сегментация наборов данных, полученных в различные периоды вегетации. Известно, что такой подход позволяет повысить качество распознавания растительности за счёт повышения точности классификации [19, 20].

В результате совместной сегментации июньского и октябрьского наборов данных (см. рис. 6, *c*) показано, что Классы 1 и 2 занимают смежные позиции: в обоих классах выявлено присутствие хвойных пород. Участки данных классов соотносятся с Кешурским логом и р. Васеншур, что определило преобладание на таких участках строевого и дровяного леса [18]. Сведений о рубках в восточной части дачи Пудемского завода нет, поэтому выделенные массивы хвойных пород к востоку от межевой границы можно считать лесом, сохранившимся в исходном состоянии. Близость текстуры участков леса, восстановившегося после рубок первой половины XIX в. (см. рис. 1, *b, c*), и текстуры леса, сохранившегося в естественном состоянии, позволяет предположить, что в западной части территории обследования вторичная сукцессия растительности полностью заверши-

ласть. В целом сегменты Классов 1 и 2 занимают более половины территории обследования (см. табл. 2).

Сегменты Классов 4 и 5 соответствуют смешанному лесу с преобладанием лиственных пород. Сегменты Класса 4 занимают промежуточную позицию между сегментами Классов 5 и 3 (см. рис. 6, *c*) и при совместной сегментации самостоятельной роли не играют (см. табл. 2). Участки Класса 5 преобладают на участке вырубок XIX в. и расположены на периферии сегментов Классов 1 и 2. Вероятно, здесь восстановилась исходная ситуация: «Строевые леса имеют расположение ... частью в середине лесного массива» [18]. Доля смешанного леса, отнесённого к Классам 4 и 5, составляет более 20 %.

Сегменты Класса 3 соответствуют лиственному редколесью и преимущественно расположены в восточной части участка (см. рис. 6, *c*). По историческим данным, здесь не было вырубок (см. рис. 1, *b, c*), поэтому сегменты Класса 3 маркируют участки, сохранившиеся в естественном состоянии.

Заключение. Методической основой для реконструкции современного состояния антропогенно-преобразованной природной среды и поиска участков исторического природопользования является алгоритм обработки мультиспектральных данных. Отличительные особенности алгоритма — применение текстурных признаков Харалика и совместная сегментация разносезонных мультиспектральных данных. Комплексный анализ текстурных характеристик снимков и оценка сезонной динамики их изменения позволяют выявить участки антропогенно-преобразованной природной среды.

Исследование проведено для фрагмента дачи Пудемского железодельательного завода, где в первой половине XIX в. происходили сплошные вырубки строевого и дровяного леса для нужд производства. Показано, что исследуемый участок в целом покрыт смешанным лесом, а выделенные сегменты отличаются соотношением деревьев хвойных и лиственных пород и плотностью их произрастания. Хвойная растительность соотносится с логом и рекой. Признаком смешанного леса, возникшего в результате вторичной сукцессии, является компактность расположения и значительная площадь сегментов Класса 5, а признаком участков редкого лиственного леса, сохранившегося в естественном состоянии, — Класса 3. Сложные вариации состава пород и плотности лесного массива неоднозначно проявляются при сравнительном анализе разносезонных изображений. Совместная сегментация разносезонных данных позволяет более контрастно представить обобщающие, наиболее значимые тенденции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kalinina O., Goryachkin S. V., Lyuri D. I., Giani L.** Post-agrogenic development of vegetation, soils, and carbon stocks under self-restoration in different climatic zones of European Russia // *Catena*. 2015. **129**. P. 18–29.
2. **Шовенгердт Р. А.** Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
3. **Zhang Z., Gao F., Ma B., Zhang Z.** Extraction of Earth Surface Texture Features from Multispectral Remote Sensing Data // *Journ. Electrical and Computer Eng.* 2018. **2018**. 9684629.
4. **Васина Т. А.** Формирование горнозаводских округов в конце XVIII – 1 половине XIX веков на территории современной Удмуртии // *Научный диалог*. 2019. № 7. С. 222–239.
5. **Геометрический** план Пудемского железодельательного завода Осокина в Глазовском уезде // *Российский государственный исторический архив*. Ф. 1424. Оп. 4. Д. 66. Л. 1.
6. **План** дач Пудемского железодельательного завода Г. Осокина в Глазовском уезде Вятской губернии // *Государственный архив Свердловской области*. Ф. 59. Оп. 4. Д. 3363. Л. 1.

7. **Khalid S., Khalil T., Nasreen S.** A survey of feature selection and feature extraction techniques in machine learning // Proc. of the Science and Information Conference. London, UK, 27–29 Aug., 2014. P. 372–378.
8. **Salhi K., Jaara E. M., Talibi Alaoui M.** Texture Image Segmentation Approach Based on Neural Networks // Int. Journ. Recent Contributions from Engineering, Science & IT. 2018. **6**, N 1. P. 19–32.
9. **Колодников Н. В.** Обзор текстурных признаков для задач распознавания образов // Доклады ТУСУРа. 2004. **9**, № 1. С. 113–124.
10. **Huang X., Liu X. Zhang L.** A Multichannel Gray Level Co-Occurrence Matrix for Multi/Hyperspectral Image Texture Representation // Remote Sens. 2014. **6**, N 9. P. 8424–8445.
11. **Aksoy S., Haralick R.** Using Texture in Image Similarity and Retrieval // Texture Anal. Mach. Vis. 2000. **40**. P. 129–149.
12. **Ulaby F. T., Kouyate F., Brisco B., Williams T. H. L.** Textural Information in SAR Images // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1986. **GE-24**, N 2. P. 235–245.
13. **Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I.** Textural Features for Image Classification // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. 1973. **SMC-3**, Iss. 6. P. 610–621.
14. **Jolliffe I. T.** Principal Components Analysis. 2nd ed. N. Y.: Springer-Verlag New York, Inc., 2002. 487 p.
15. **Artoni F., Delorme A., Makeig S.** Applying dimension reduction to EEG data by principal component analysis reduces the quality of its subsequent independent component decomposition // NeuroImage. 2018. **175**. P. 176–187.
16. **Jain A. K.** Data clustering: 50 years beyond k-means // Pattern Recogn. Lett. 2010. **31**, Iss. 8. P. 651–666.
17. **Calinski T., Harabasz J.** A dendrite method for cluster analysis // Commun. Stat. 1974. **3**, N 1. P. 1–27.
18. **План** лесов отведенных Пудемскому железодельательному заводу Петрова из дач Еловской волости Глазовского уезда Вятской губернии // Государственный архив Свердловской области. Ф. 59. Оп. 3. Д. 2222. Л. 1.
19. **Immitzer M., Atzberger C.** Tree Species Diversity Mapping—Success Stories and Possible Ways Forward // Remote Sens. 2023. **15**, N 12. 3074.
20. **Lechner M., Dostalova A., Hollaus M. et al.** Combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Tree Species Classification in a Central European Biosphere Reserve // Remote Sens. 2022. **14**, N 11. 2687.

Поступила в редакцию 26.04.2023

После доработки 30.06.2023

Принята к публикации 07.07.2023
