

УДК 528.854

АЛГОРИТМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СЪЁМКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ КУЛЬТУРНОГО СЛОЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

© А. Г. Злобина¹, И. В. Журбин¹, А. С. Шаура¹, Е. А. Рублёва^{1,2}

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

² Удмуртский государственный университет,
426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1
E-mail: elf54@yandex.ru

Применение тепловизионной съёмки для реконструкции объектов исторического наследия ограничено влиянием современной распашки и отсутствием археологических объектов с контрастными термическими свойствами. Отличительная особенность предложенного алгоритма статистического анализа состоит в использовании текстурных признаков Харалика на этапе извлечения признаков. Последующая сегментация изображения позволяет выявить участки культурного слоя различной мощности как площадные ландшафтные объекты. Интерпретация их свойств основывается на эталонных данных междисциплинарных исследований — раскопок, геофизики, почвенных бурений. Оценка тенденций взаимного расположения сегментов разных классов и соотношение их площадей позволяет выдвинуть гипотезу о границах археологического памятника.

Анализ структуры сегментированного тепловизионного изображения на участке средневекового Кушманского III селища (Удмуртия) показал принципиальные отличия в распределении гумусированного слоя грунта на поселении и прилегающей территории, не подвергавшейся антропогенному воздействию. Предложенный алгоритм может рассматриваться как эффективный инструмент изучения объектов исторического наследия.

Ключевые слова: текстурные признаки Харалика, сегментация изображений, тепловизионная съёмка, археологический памятник, эталонные данные, граница.

DOI: 10.15372/AUT20250113

EDN: OLEESU

Введение. Дистанционное зондирование Земли выявляет археологические памятники как локальные участки с аномальными изменениями рельефа, растительного покрова и состава почв [1]. Признаки объектов исторического наследия контрастно проявляются в рельефе при съёмке в видимом диапазоне и лазерном сканировании [2], выражены в локальных вариациях растительности при мультиспектральной съёмке [3], а при тепловизионной съёмке — в распределении теплового излучения поверхности [4, 5]. Параметры таких участков существенно отличаются от параметров природной среды, не подвергавшейся антропогенному воздействию. Методы поиска археологических объектов по рельефным и растительным признакам разработаны и используются в исследовательских проектах и при мониторинге исторического наследия, но достоверное выявление почвенных признаков археологических объектов тепловизионной съёмкой вызывает сложности. Исходя из имеющегося опыта, наиболее уверенно определяются каменные конструкции [6, 7], а также заглублённые объекты, заполненные грунтом с высоким содержанием влаги [5, 8]. Наибольшей проблемой является изучение археологических памятников, культурный слой которых не содержит объекты с контрастными термическими свойствами. Примером являются поселения чепецкой культуры (IX–XIII вв., северная часть Удмуртии) [9]. Здесь схожие грунты остатков сооружений и вмещающего их культурного слоя априорно определяют малую контрастность аномалий, вызванных объектами планировки. Поэтому для

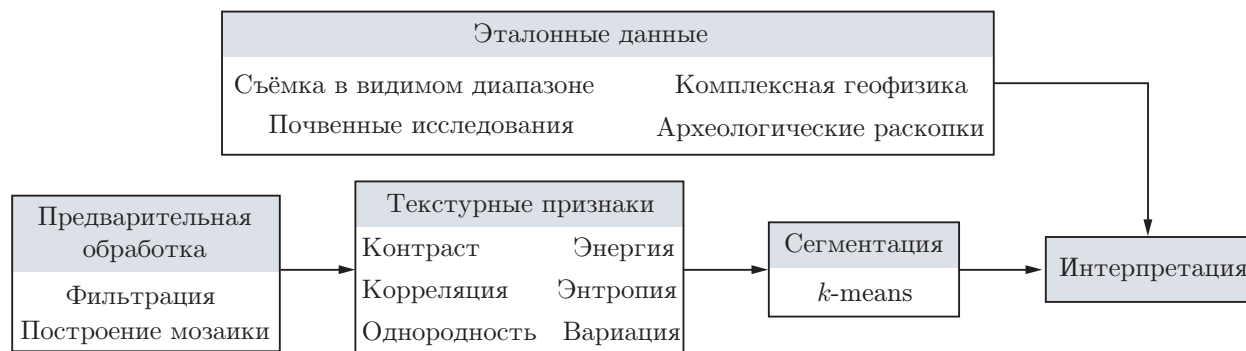


Рис. 1. Алгоритм статистического анализа данных тепловизионной съёмки

выявления отдельных объектов на чепецких поселениях, как и на многих других археологических памятниках средней полосы России, Предуралья и Зауралья, тепловизионная съёмка малоэффективна. Тем не менее этот вид дистанционного зондирования может быть использован для оценки расположения участков культурного слоя различной мощности и, соответственно, прогнозирования границ памятника, что является необходимым для сохранения объектов исторического наследия.

Цель данного исследования — разработка алгоритма статистического анализа тепловизионных снимков территории археологических памятников (рис. 1). Алгоритм основан на сегментации изображений по текстурным признакам. Интерпретация сегментов позволяет оценить границы памятника и вариации мощности культурного слоя. Апробация проведена на материалах тепловизионной съёмки средневекового Кушманского III селища, культурный слой которого в значительной степени разрушен распашкой. Достоверность интерпретации сегментов обеспечивается эталонными данными междисциплинарных исследований.

Эталонные данные. Кушманское III селище открыто Г. Т. Кондратьевой в 1959 г. [9]. В связи с многолетней распашкой рельефные признаки оборонительных сооружений и других средневековых построек отсутствуют. В 2012 г. А. Н. Кирилловым в центре площадки был заложен шурф размером 1×1 м (рис. 2). Выявлен культурный слой мощностью 0,7 м, насыщенный артефактами IX–XIII вв. В 2016–2017 гг. на мысовой части заложен раскоп, мощность слоя которого не превышала 0,45 м. Междисциплинарные исследования поселения проводились в 2013–2017 гг. [10]. Комплекс естественно-научных методов включал съёмку беспилотными летательными аппаратами (видимый диапазон, тепловизионная и мультиспектральная съёмки), геофизические исследования (электропрофилирование, магниторазведка, георадарная съёмка и электротомография), определение гранулометрического состава и морфологических свойств материалов почвенных кернов, химико-биологический анализ почв.

Тепловизионная съёмка и выбор параметров. Опыт тепловизионных обследований позволяет систематизировать параметры съёмки, обеспечивающие контрастное проявление искомых объектов на полученных изображениях: малую плотность растительного покрова [11, 12], съёмку после захода солнца [4, 6], резкий перепад дневной и ночной температур [5]. Поэтому полёты на участке Кушманского III селища выполнялись в мае 2015 г. с 02:00 по местному времени (UTC+4) в условиях слабой облачности. Температура воздуха днём составляла $+27^\circ\text{C}$, а ночью в период полёта — $+7^\circ\text{C}$. Это обеспечивало оптимальные условия съёмки: период ранней вегетации растительности и значительный контраст температур. Использовался комплекс беспилотного мониторинга на базе летательного аппарата самолётного типа Supercam S350 (ООО «Финко», Россия). Съёмка выполнялась нерадиометрической камерой с неохлаждаемым болометром FLIR Tau 2. Разрешение снимков составило 0,5 м/пикс.



Рис. 2. Топографический план Кушманского III селища (основа — Н. Г. Воробьева, ООО «Финко»; дополнение — Р. П. Петров, ФТИ УдмФИЦ УрО РАН).
Горизонтали через 2 м

Построение мозаики тепловизионных снимков. Обычно территория обследования отображается на наборе частично перекрывающихся снимков, поэтому необходимо построение их мозаики — сводного изображения, пригодного для выявления значимых термических аномалий [4, 13]. Объединение снимков требует выравнивания яркости смежных кадров [4] и удаления искажений изображений, вызванных камерой [6, 14]. В нашем случае для предварительной обработки применялись сглаживание высокочастотного шума исходных снимков фильтром Гаусса и последующее подавление фоновой составляющей фильтром скользящего среднего (см. рис. 1). Построение мозаики выполнено в геоинформационной системе MapInfo 12.5 (рис. 3). Для обеспечения непрерывного покрытия территории проведена привязка каждого снимка по характерным точкам, координаты которых получены с цифрового ортофотоплана. Количество таких точек на разных снимках варьировалось от 8 до 12. Значение продольного перекрытия снимков составляло 15 %, поперечного — 25 %.

Статистический анализ мозаики. Зачастую построение мозаики не обеспечивает визуальную контрастность термических аномалий объектов поиска. Для достижения большей наглядности наиболее часто применяется совместная обработка тепловизионных изображений и данных других методов, в том числе комплексных геофизических исследований [15] и мультиспектральной съёмки [14]. Проводились эксперименты с неконтролируемой кластеризацией и классификацией с обучением исходных материалов тепловизионной съёмки [8]. Перечисленные подходы эффективны при поиске локальных археологических объектов, которые достаточно однородны по термическим свойствам (древние дороги, сглаженные рвы, постройки и пр.). Однако участки культурного слоя различной мощности представляют собой площадные объекты практически произвольной конфигурации. Их тепловое излучение неоднородно ввиду сложной структуры самого культурного слоя. Поэтому для выявления разноплановых участков культурного слоя как единых пло-

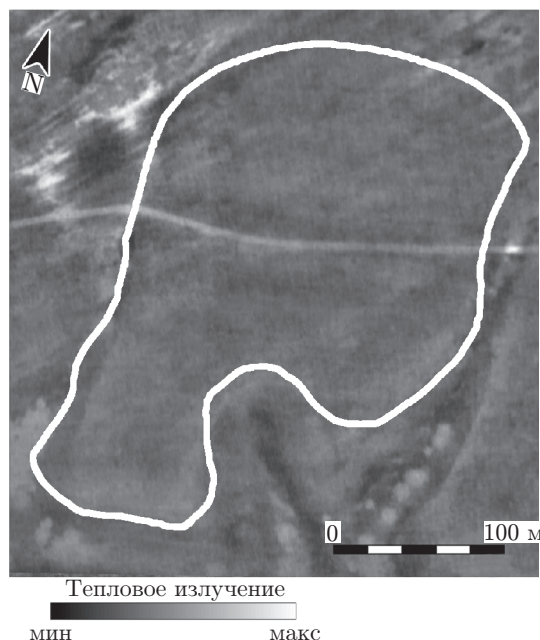


Рис. 3. Мозаика преобразованных тепловизионных изображений

щадных ландшафтных объектов необходимо анализировать не значение интенсивности единичных пикселей, а тенденции взаимного расположения пикселей в некоторой окрестности. Следовательно, для поиска таких площадных объектов принципиальна информация о текстуре изображения.

Выделение признаков. Для обработки построенной тепловизионной мозаики выбран участок на пологой поверхности мыса (обозначен белой линией на рис. 3). В первую очередь, это связано с задачей исследования: изучение распределения остатков культурного слоя в границах поселения и в качестве фона на прилегающей территории. Для описания текстуры выбранного участка рассчитаны основные признаки Харалика (рис. 4): контраст (contrast), корреляция (correlation), энергия (energy), энтропия (entropy), однородность (homogeneity) и вариация (variance) [16]. При их вычислении использовались следующие параметры: число уровней квантования 64, размер скользящего окна 25×25 [17].

На изображениях текстуры более однородная структура фиксируется минимальными значениями признаков контраста и энтропии и максимальными — однородности и энергии (см. рис. 4). Такие области преимущественно расположены вдоль условной оси участка (пунктирная линия на рис. 5, *a*). Контрастное отображение участков максимальных значений однородности и минимальных значений контраста получено в результате пороговой фильтрации (см. рис. 5, *a*). На западе и востоке территории обследования на основе практически всех признаков выделены существенно неоднородные участки (см. рис. 4). Областям локальных изменений и резких перепадов яркости соответствуют максимальные значения контраста и минимальные значения однородности (рис. 5, *b*). Неоднородность западной части определяется следами распашки, которые отображаются в виде узких параллельных полос, ориентированных по направлению северо-восток — юго-запад (см. рис. 3). Такое проявление распашки отмечено на тепловизионных снимках, полученных в различных регионах [5, 15, 18]. Неоднородные участки в восточной части, вероятно, вызваны пахотным горизонтом из переотложенного грунта культурного слоя, который возникает в результате распашки и последующей эрозии. Более определённо такие области выражены по внешнему периметру мыса — на переходе от пологой поверхности к склону (вариация

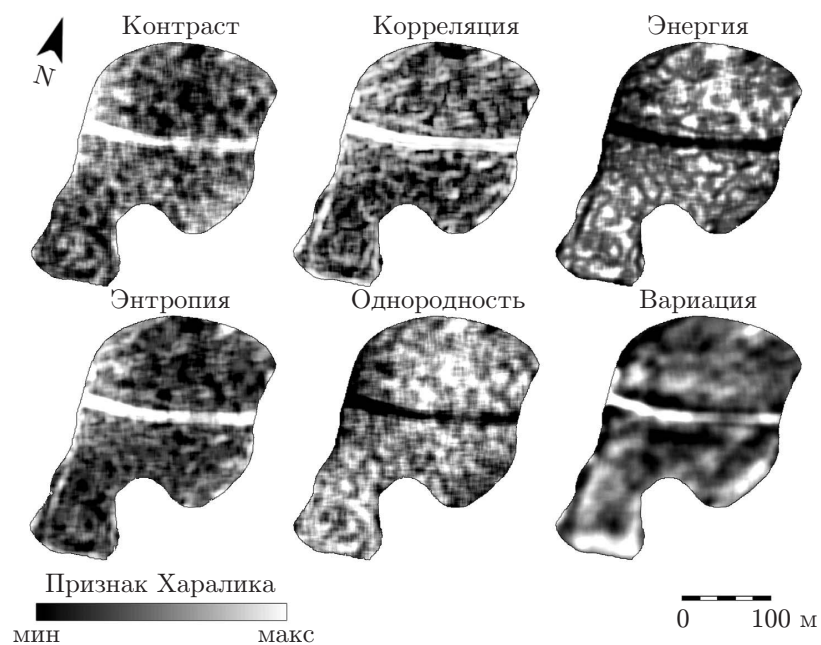
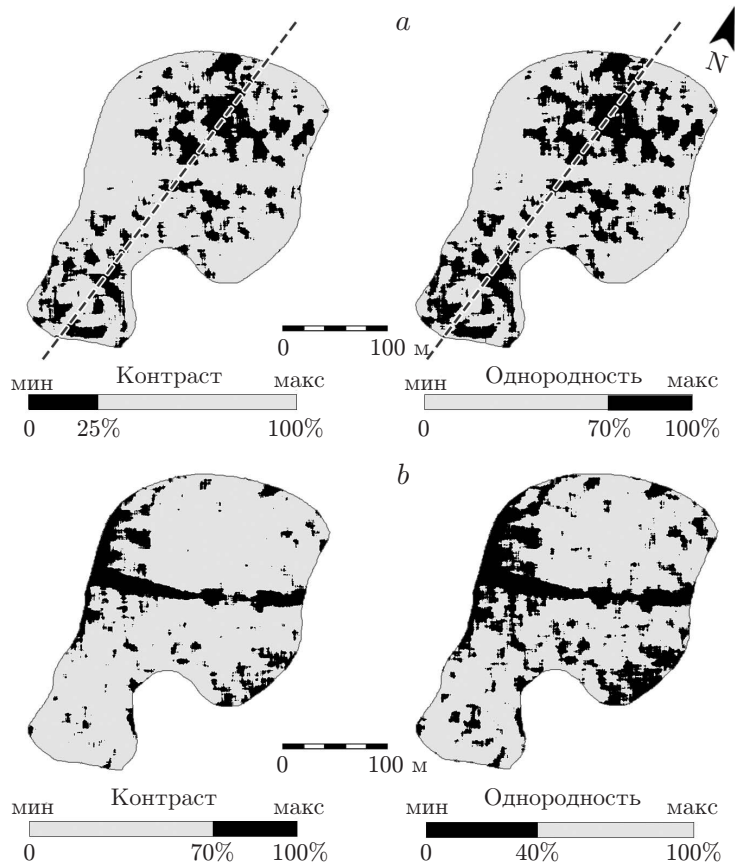


Рис. 4. Визуализация текстурных признаков Харалика

Рис. 5. Пороговая фильтрация изображений признаков однородности и контраста: *a* — области сглаженной текстуры, *b* — области локальных изменений и резких перепадов яркости

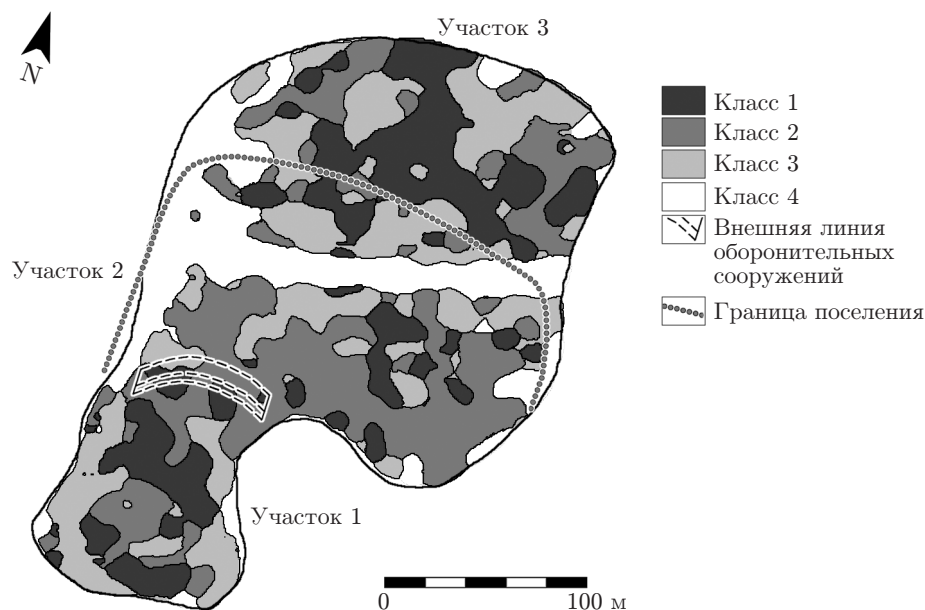


Рис. 6. Сегментация тепловизионного изображения в пространстве текстурных признаков

и корреляция на рис. 4). Все признаки очевидным образом выявляют линейную область, соответствующую полевой дороге (см. рис. 3). Таким образом, структура распределения теплового излучения, отображаемая через признаки Харалика, более контрастно (в сравнении с построенной мозаикой) подчёркивает особенности распределения гумусированных отложений на пологом участке.

Сегментация. Завершающим этапом обработки является сегментация изображения в пространстве новой системы информативных признаков — текстурных признаков Харалика. Наиболее популярный метод сегментации — алгоритм кластерного анализа k -means, отличающийся простотой реализации и высокой скоростью выполнения, что важно при обработке больших объёмов данных [19]. Ограничением метода является необходимость априорного задания количества кластеров, выбор числа которых основывался на анализе индекса Калински — Харабаш [20] и метода локтя [21]. Для обоих критериев на участке Кушманского III селища оптимальное число кластеров равно 4. В результате участки, отличающиеся по тепловому излучению, получают координатную привязку на территории обследования (рис. 6). Поэтому возможна интерпретация сегментов изображения на основе эталонных данных раскопок, геофизических исследований и почвенных бурений (см. рис. 2, 7).

Интерпретация сегментов. Сегменты класса 1 соответствуют поверхностно-трансформированному культурному слою значительной мощности (см. рис. 6), что подтверждается раскопками в центре площадки (см. рис. 2, 7). Культурный слой в шурфе фиксируется до глубины 0,7 м. Его верхняя часть (0,25–0,3 м) нарушена современной пахотой, а нижняя сохранилась в исходном состоянии. Значительная мощность слоя гумусированного лёгкого суглинка в сегментах класса 1 (более 0,7 м) также подтверждается почвенными бурениями (пикеты 7–12 на рис. 7), материалами площадной геофизической съёмки и электротомографии [10].

Вероятно, сегменты классов 2 и 3 соответствуют участкам гумусированного слоя меньшей мощности, что подтверждается раскопками на мысовой части поселения (см. рис. 2, 7). Раскоп расположен на границе областей трёх классов. Мощность напласто-

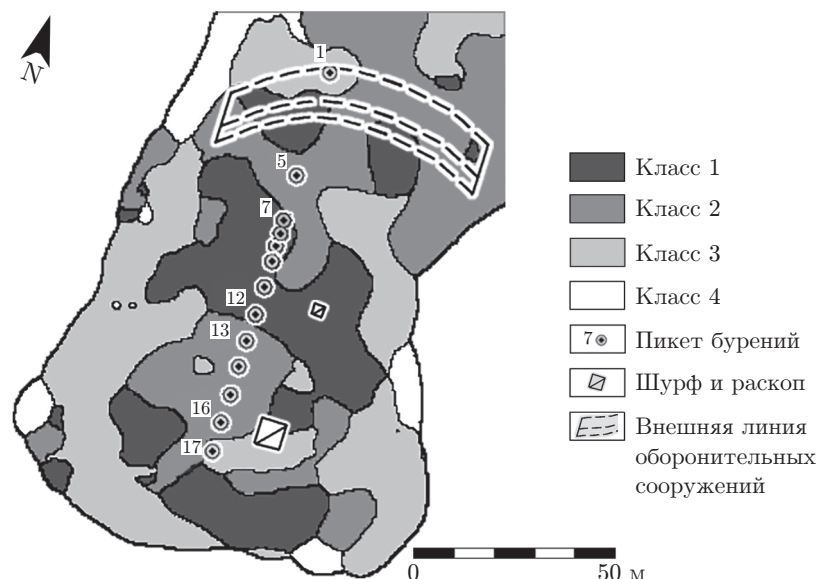


Рис. 7. Сегментированное изображение внутренней части поселения (участок 1)

Таблица 1

Площадь сегментов на различных участках поселения, %

Номер класса	Участок 1	Участок 2	Участок 3
1	29	11	34
2	32	34	22
3	35	25	31
4	4	30	13
Итого	100	100	100

ваний постепенно снижается от северной части раскопа (где не превышает 0,45 м) к его южному борту (до 0,2 м). Отмеченная тенденция подтверждается материалами почвенных исследований. В пикетах 5 и 13–16 (сегменты класса 2 на рис. 7) мощность гумусированного лёгкого суглинка не превышает 0,3–0,4 м, а перекрывающий его пахотный горизонт сформирован слабогумусированным тяжёлым суглинком. В сегментах класса 3 мощность гумусированного слоя минимальна и не превышает 0,1–0,2 м. В кернах 1 и 17 (см. рис. 7) этот тонкий слой перекрыт переотложенным тяжёлым суглинком толщиной до 0,3 м. Эта оценка согласуется с данными геофизической съёмки [10].

На внутренней части поселения (участок 1 на рис. 6) площадь сегментов, отнесённых к классу 4, незначительна (табл. 1). Сегменты располагаются на переходе от пологой поверхности к склонам, где наблюдается интенсивный транзит почвенно-грунтового материала в подчинённые формы рельефа. За счёт этого возникают открытые участки материковых пород, иногда перекрытые тонким слоем дёрна. Очевидным аналогом таких участков является область, вызванная полевой дорогой (см. рис. 3; участок 2 на рис. 6).

Обсуждение результатов. Сегментация позволяет разделить изображение на непересекающиеся области, каждая из которых характеризуется близкими значениями интенсивности теплового излучения и, вероятно, сопоставимой мощностью гумусированного слоя. Учитывая это, наиболее ярким признаком распределения слоя на территории обследования является структура сегментированного изображения. В области обследования,

Таблица 2

Количественные параметры сегментов классов 1–4

Номер участка	Класс	Количество сегментов, шт.	Площадь сегментов, пиксель		
			Средняя	Максимальная	Минимальная
1	1	12	1136	7413	1
	2	9	1701	8305	4
	3	7	2377	8236	73
	4	7	296	673	6
2	1	18	645	3212	10
	2	18	1965	30268	2
	3	20	1269	8520	34
	4	5	6092	26130	236
3	1	6	3752	19141	1
	2	8	1775	6810	2
	3	17	1173	8259	7
	4	5	1666	4617	220

включающей Кушманское III селище и прилегающую фоновую территорию, можно выделить три участка с различными тенденциями распределения сегментов (см. рис. 6).

Участок 1 — внутренняя часть поселения, ограниченная внешними оборонительными сооружениями — содержит следы застройки (заглублённые остатки жилых и производственных, оборонительных сооружений), что подтверждается раскопками, комплексными геофизическими исследованиями и почвенными бурениями [10] (см. рис. 3, 4, 5, а). Здесь «ядром» изображения являются сегменты классов 1 и 2, окружённые значительными по площади областями класса 3 (см. табл. 1). Предположительно, мощный поверхностно-трансформированный слой сохранился только в центральной части поселения (класс 1). По периметру этой области толщина гумусового горизонта постепенно уменьшается.

Участок 2, вероятно, представлял собой хозяйственную периферию без следов застройки. Использование этого участка в период существования поселения доказывают химико-биологические показатели почвенных материалов кернов [10] (см. рис. 5, б, 6). Здесь преобладают сегменты классов 2, 3 и 4 (см. рис. 6, табл. 1). Значительная площадь сегментов класса 4 очевидным образом связана с полевой дорогой. Сегменты классов 2 и 3 маркируют участки переотложенного грунта культурного слоя, перемещённого распашкой. Это подтверждается высокими значениями магнитной восприимчивости, содержания фосфатов и активной микробной биомассы в пахотном и подпахотном горизонтах, сопоставимыми со значениями в зоне поверхностно-трансформированного слоя [10]. Наблюдается постепенное уменьшение мощности слоя от южной границы рассматриваемого участка к его северной границе — от преобладания сегментов класса 2 к преобладанию сегментов класса 3. На переходе от пологой поверхности к склону оврага мощность гумусированного слоя становится минимальной (класс 4). Выявленную ситуацию, вероятно, в большей степени определяют особенности ландшафта. Увеличение уклона пологой поверхности мыса вызывает более интенсивные эрозионные процессы и транзит почвенно-грунтового материала в подчинённые формы рельефа.

По имеющимся данным [10], участок 3 в отличие от участков 1 и 2 в Средневековье не подвергался антропогенному воздействию. Эта территория является природным «фоном» к археологическому памятнику. Различие участков 2 и 3 демонстрирует существенное изменение доли площадей сегментов классов 1 и 4 (см. табл. 1). Отличия участков 1 и 3 менее очевидны и выявляются на основе количественных оценок параметров сегментов (табл. 2). На участке 3 в сравнении с участком 1 количество сегментов класса 1 сокращается в два

раза при одновременном увеличении их площади. Средняя площадь сегментов этого класса увеличивается более чем в три раза. Площадь сегмента максимального размера на участке 3 в 2,5 раза больше площади максимального сегмента участка 1. Для класса 3 наблюдается обратная ситуация: количество сегментов существенно увеличивается при одновременном уменьшении их средней площади в два раза. При этом площадь минимального сегмента класса 3 на участке 3 в сравнении с участком 1 существенно меньше, но площади сегментов максимального размера практически совпадают. Тенденции распределения сегментов класса 2 (средняя площадь сегментов, их количество, максимальная площадь) не претерпевают существенных изменений, но при этом сокращается их доля в общей площади участка 3 с 32 до 22 % (см. табл. 1). Сравнительный анализ параметров сегментов позволяет выделить основное отличие структуры участка 3 от участка 1: укрупнение сегментов класса 1 при уменьшении размеров и увеличении общего количества сегментов классов 2 и 3.

Выявленные отличия структуры сегментированного изображения могут рассматриваться как основа для определения границ исторических объектов, культурный слой которых частично разрушен в результате распашки. С точки зрения реконструкций участок 1 определяет границы самого средневекового поселения, а прилегающая хозяйственная периферия (участок 2) — границы археологического памятника как объекта историко-культурного наследия. Внешняя граница участков 1 и 2 рассматривается как зона охраны памятника и фиксируется в землеустроительной документации. С точки зрения практической значимости эта информация необходима для принятия мер по сохранению объектов историко-культурного наследия в процессе хозяйственного освоения новых территорий и развития инфраструктуры.

Заключение. Полученные результаты позволяют предположить, что тепловизионная съёмка информативна для определения границ исторических объектов, культурный слой которых частично разрушен распашкой. Алгоритм обработки, основанный на вычислении текстурных признаков и реализующий сегментацию мозаики снимков, обеспечивает переход от традиционного визуального анализа изображения (выявление термических аномалий локальных объектов) к восстановлению визуально неочевидной структуры теплового излучения, характеризующей тенденции изменения мощности культурного слоя. Интерпретация изображения может быть основана на вычислении количественных параметров сегментов (средняя/минимальная/максимальная площадь, количество и пр.) и оценке тенденций изменений значений параметров на разноплановых участках.

Апробация алгоритма статистического анализа тепловизионных снимков проведена на материалах исследований средневекового Кушманского III селища, культурный слой которого в значительной степени разрушен распашкой. На территории этого объекта наследия, как и на территории многих других археологических памятников средней полосы России, Предуралья и Зауралья, отсутствуют каменные архитектурные сооружения. Анализ структуры сегментированного изображения показал принципиальные отличия на участке застройки памятника, ограниченном оборонительными сооружениями (центр — сегменты классов 1 и 2), за пределами оборонительных сооружений, где располагалась хозяйственная периферия поселения (преимущественно классы 2 и 3), и на прилегающей территории (укрупнение сегментов класса 1 при уменьшении размеров и увеличении общего количества сегментов классов 2 и 3). Дополнительную информацию для реконструкции даёт взаимное расположение сегментов. Следовательно, показана возможность применения тепловизионной съёмки для решения принципиально новой задачи — выявления и интерпретации площадных ландшафтных объектов на участках природной среды, преобразованной в результате антропогенной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lasaponara R., Masini N.** Remote Sensing in Archaeology: From Visual Data Interpretation to Digital Data Manipulation / Eds. by R. Lasaponara, N. Masini // *Satellite Remote Sensing*. Vol. 16. Remote Sensing and Digital Image Processing. Dordrecht: Springer, 2012. P. 3–16.
2. **Vinci G., Vanzani F., Fontana A., Campana S.** LiDAR Applications in Archaeology: A Systematic Review // *Archaeological Prospection*. 2024. **0**. P. 1–21.
3. **Luo L., Wang X., Guo H. et al.** Airborne and spaceborne remote sensing for archaeological and cultural heritage applications: A review of the century (1907-2017) // *Remote Sens. Environment*. 2019. **232**. 111280.
4. **Casana J., Wiewel A., Cool A. et al.** Archaeological Aerial Thermography in Theory and Practice // *Adv. Archaeological Practice*. 2017. **5**, Iss. 4. P. 310–327.
5. **Waagen J., García Sánchez J., van der Heiden M. et al.** In the Heat of the Night: Comparative Assessment of Drone Thermography at the Archaeological Sites of Acquarossa, Italy, and Siegerswoude, The Netherlands // *Drones*. 2022. **6**, Iss. 7. 165.
6. **Hill A. C., Laugier E. J., Casana J.** Archaeological Remote Sensing Using Multi-Temporal, Drone-Acquired Thermal and Near Infrared (NIR) Imagery: A Case Study at the Enfield Shaker Village, New Hampshire // *Remote Sens*. 2020. **12**, Iss. 4. 690.
7. **Poirier N., Hautefeuille F., Calastrenc C.** Low Altitude Thermal Survey by Means of an Automated Unmanned Aerial Vehicle for the Detection of Archaeological Buried Structures // *Archaeological Prospection*. 2013. **20**, Iss. 4. P. 303–307.
8. **Brooke C., Clutterbuck B.** Mapping Heterogeneous Buried Archaeological Features Using Multisensor Data from Unmanned Aerial Vehicles // *Remote Sens*. 2020. **12**, Iss. 1. 41.
9. **Иванов А. Г., Иванова М. Г., Останина Т. И., Шутова Н. И.** Археологическая карта северных районов Удмуртии. Ижевск: УИИЯЛ УрО РАН, 2004. 276 с.
10. **Журбин И. В., Борисов А. В., Назмутдинова А. И. и др.** Комплексное использование методов дистанционного зондирования, геофизики и почвоведения при изучении археологических памятников, разрушенных распахкой // *Археология, этнография и антропология Евразии*. 2019. **47**, № 2. С. 103–111.
11. **Uribe Agudo P., Angás Pajas J., Pérez-Cabello F. et al.** The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery // *Drones*. 2018. **2**, Iss. 3. 29.
12. **Lasaponara R., Masini N., Holmgren R., Backe Forsberg Y.** Integration of aerial and satellite remote sensing for archaeological investigations: A case study of the Etruscan site of San Giovenale // *Journ. Geophys. and Eng.* 2012. **9**, Iss. 4. P. S26–S39.
13. **Blochin J. K., Pavlovskaja E. A., Sadykov T. R., Caspari G.** Remotely Sensing the Invisible-Thermal and Magnetic Survey Data Integration for Landscape Archaeology // *Remote Sens*. 2023. **15**, Iss. 20. 4992.
14. **McLeester M., Casana J., Schurr M. R. et al.** Detecting prehistoric landscape features using thermal, multispectral, and historical imagery analysis at Midewin National Tallgrass Prairie, Illinois // *Journ. Archaeological Sci.: Rep.* 2018. **21**. P. 450–459.
15. **Scudero S., Martorana R., Capizzi P. et al.** Integrated Geophysical Investigations at the Greek Kamarina Site (Southern Sicily, Italy) // *Surveys in Geophys.* 2018. **39**, Iss. 6. P. 1181–1200.
16. **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.

-
17. **Шаура А. С., Злобина А. Г., Журбин И. В., Баженова А. И.** Взаимное влияние параметров расчёта матрицы смежности при анализе мультиспектральных снимков естественного и антропогенно-преобразованного ландшафта // Прикладная физика и математика. 2023. № 4. С. 26–34.
 18. **Šedina J., Housarová E., Raeva P.** Using RPAS for the detection of archaeological objects using multispectral and thermal imaging // European Journ. Remote Sens. 2019. **52**, Iss. suppl. P. 182–191.
 19. **Ali H. H., Kadhum L. E.** K-Means Clustering Algorithm Applications in Data Mining and Pattern Recognition // Int. Journ. Sci. and Research. 2017. **6**, Iss. 8. P. 1577–1584.
 20. **Caliński T., Harabasz J.** A dendrite method for cluster analysis // Commun. Statist. 1974. **3**, Iss. 1. P. 1–27.
 21. **Bholowalia P., Kumar A.** EBK-Means: A Clustering Technique Based On Elbow Method And K-Means In WSN // Int. Journ. Comput. Applications. 2014. **105**, N 9. P. 17–24.

Поступила в редакцию 08.08.2024

После доработки 02.11.2024

Принята к публикации 10.01.2025
