DOI: 10.53737/2713-2021.2025.14.21.010

В.А. Данилов, В.А. Морозова, М.Н. Растегаева, А.В. Федоров

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ КУРГАНОВ*

Современные методы машинного обучения предлагают новые возможности для повышения эффективности анализа и точности идентификации курганов. Исследование включает применение алгоритмов машинного обучения, методов математико-картографического моделирования и ГИС-технологий для анализа больших объемов данных лидарной съемки, что способствует автоматизации процесса и выявлению скрытых паттернов. Апробация метода поиска курганов была проведена на территориях археологических памятников — поселение эпохи бронзы «Станция Красавка» и курганная группа (2 насыпи) около античного поселения «Тамань-3» (объект культурного наследия федерального значения «Поселение-3» и курганная группа (2 насыпи)). Применение автоматизированных алгоритмов анализа данных позволяет сократить время на их интерпретацию, открывая новые горизонты в археологии и способствуя эффективному сохранению культурного наследия. Результатами работы стали картографические модели с указанием потенциальных мест размещения курганов на территории памятников.

Ключевые слова: лазерное сканирование, ЦМР, ГИС, машинное обучение, математико-картографическое моделирование, поиск курганов, поселение эпохи бронзы Станция Красавка, античное сельское поселение Тамань-3.

Сведения об авторах: Данилов Владимир Анатольевич[1], кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского; Морозова Валерия Андреевна[2], старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского; Растегаева Мария Николаевна[3], ассистент кафедры истории древнего мира, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского; Федоров Алексей Васильевич[4], заведующий лабораторией геоинформатики и тематического картографирования географического факультета СГУ, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского.

Контактная информация: [1-4]410012, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, Саратовский национальный исследовательский Государственный Университет им. Н.Г. Чернышевского, e-mail: [1]kohavi@yandex.ru, [2]riukarin@gmail.com, [3]marija.rastegaeva1698@gmail.com, [4]alexeivf@gmail.com.

Vladimir Danilov, Valeriia Morozova, Mariia Rastegaeva, Alexei Fedorov

EXPERIENCE IN THE USE OF MACHINE LEARNING FOR THE IDENTIFICATION OF BURIAL MOUNDS

Modern machine learning methods offer new opportunities for enhancing the efficiency of analysis and accuracy of barrow identification. The study involves the application of machine learning algorithms, mathematical-cartographic modeling methods, and GIS technologies for analyzing large volumes of lidar survey data, which contributes to the automation of the process and the identification of hidden patterns. The testing of the mound search method was conducted in the areas of archaeological sites, specifically the Bronze Age settlement “Krasavka Station” and a group of mounds (2 barrows) near the ancient settlement “Taman-3” (a federal cultural heritage site “Settlement-3” and a group of mounds (2 barrows)). The use of automated data analysis algorithms allows reducing the time for their interpretation, opening up new

* Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки № FSRR-2023-0006.

Статья поступила в номер 19 апреля 2025 г.
Принята к печати 12 мая 2025 г.

© В.А. Данилов, В.А. Морозова, М.Н. Растегаева, А.В. Федоров, 2025.

horizons in archaeology and contributing to the effective preservation of cultural heritage. The results of the work are cartographic models indicating potential barrow locations on the territory of the monuments.

Key words: laser scanning, DTM (Digital Terrain Model), GIS, machine learning, mathematical-cartographic modeling, search for mounds, Bronze Age settlement Krasavka Station, ancient rural settlement Taman-3.

About the authors: Danilov Vladimir[1], PhD (Geography), Saratov State University; Morozova Valeriia[2], Saratov State University; Rastegaeva Mariia[3], Saratov State University; Fedorov Alexei[4], Saratov State University.

Contact information: [1-4]410012, Russian Federation, Saratov, 83 Astrachanskaya Str., Saratov State University, e-mail: [1]kohavi@yandex.ru, [2]riukarin@gmail.com, [3]marija.rastegaeva1698@gmail.com, [4]alexeivf@gmail.com.

Состояние проблемы

Курганы, представляющие собой насыпные могильные конструкции, были важными элементами погребальной практики и социального устройства различных народов, и актуальность их поиска, идентификации и исследования в археологии обусловлена в настоящее время их значением как ценных культурных и исторических артефактов, предоставляющих уникальную возможность получения информации о древних цивилизациях. Однако, несмотря на их культурное значение, процесс обнаружения и документирования курганов зачастую сталкивается с множеством трудностей, включая изменение ландшафта с течением времени и под воздействием различных факторов на территории, где расположены курганные группы.

Традиционные методы поиска и изучения курганов включают полевые обследования, визуальную интерпретацию спутниковых изображений, применение геофизических технологий, таких как магнитометрия и георадарная съемка. Эти методы, хоть и имеют свои преимущества, часто требуют значительных временных и финансовых затрат на дальнейшую обработку, анализ и интерпретацию полученных данных.

С развитием информационных технологий в области обработки данных, появляются современные методы машинного обучения, которые способны значительно улучшить эффективность анализа и интерпретации исходных данных и, как следствие, повысить точность обнаружения курганов. Они позволяют автоматизировать процессы обработки и анализа больших объемов информации, что особенно важно в контексте археологических исследований. Благодаря этому исследователи могут выявить скрытые паттерны и аномалии, указывающие на наличие курганов, а также повысить точность их идентификации.

Современные подходы, такие как геоинформационное моделирование, дистанционное зондирование, фотограмметрия, лидарная съёмка, в сочетании с алгоритмами машинного обучения, позволяют не только эффективно обрабатывать большие объемы информации, но и значительно сокращают время на её анализ и интерпретацию. Эти технологии открывают новые горизонты для археологии, позволяя выявлять и документировать курганы с высокой степенью вероятности и меньшими затратами.

Таким образом, сочетание традиционных и современных методов создает новые возможности для изучения археологических объектов и предоставляет археологам более быстрые и оптимальные инструменты для работы в сложных условиях с необходимой долей точности. Исследование актуальности, возможностей и ограничений этих методов является ключевым для дальнейшего развития археологической науки и эффективного сохранения культурного наследия.

Обзор литературы по данной проблеме показывает, что на сегодняшний день существует ряд исследований, тем или иным образом направленных на автоматизированное выделение аномалий морфометрии рельефа территории, в том числе курганных групп и антропогенных насыпей на базе лидарной съемки (Еремеев и др. 2023: 129—143; Иванов, Ермолаев 2017: 98—109; Лисицын, Обросов, Сафонов 2019: 103—118; Chang, Bailey, Le Moan 2019: 64—75; Ishalina, Bliakharskii, Florinsky 2021: 2529—2552; Berganzo-Besga et al. 2021: 15; Cartwright, Diehl 2017: 44; Хлебникова, Крупочкин 2009: 36—40).

Но следует обратить внимание на тот факт, что большинство исследований в качестве объекта используют региональный или глобальный масштаб, а на локальных участках машинное обучение используется как инструмент обработки и автоматизации фильтрации рельефа.

Целью данной статьи является выбор оптимального метода автоматизированной обработки данных лазерного сканирования на основе алгоритмов машинного обучения и математико-картографического моделирования для поиска курганов. В качестве объектов исследования были выбраны участки, расположенные на территории двух памятников — поселение и курганный могильник эпохи бронзы «Станция Красавка» и курганная группа (2 насыпи) около объекта культурного наследия федерального значения «Поселение-3».

Характеристика района исследований

Поселение эпохи бронзы — «Станция Красавка», расположено в Аткарском районе Саратовской области на второй надпойменной террасе левого берега р. Медведицы, в 100 м к северо-востоку от современного течения Медведицы, в 700 м к юго-западу от железнодорожной станции Красавка, в 2,5 км к северо-востоку от с. Нижняя Красавка и в 2,6 км к востоку от г. Аткарска.

Первые сведения о поселениях и курганных могильниках бронзового века в окрестностях с. Нижняя Красавка были получены в 1920—1930-х гг. по результатам разведок П. С. Рыкова, Н. К. Арзютова и И. В. Синицына. Сравнительно близкое расположение двух памятников — Нижняя Красавка-1 и Нижняя Красавка-2 привели к некоторой путанице в историографии, что затрудняет идентификацию проводившихся там до середины XX в. работ. Раскопки поселения «Станция Красавка» начались в 2019 г. и продолжаются до настоящего времени. Была вскрыта часть полуземляночной постройки прямоугольной формы (Лопатин, Тарабрин 2020: 76—81).

В непосредственной близости от поселения зафиксирована курганная группа, которая, по предварительным данным, может быть родовым могильником обитателей поселения «Станция Красавка».

На момент проведения исследований территория представляла собой пахотные угодья на преимущественно слабопокатом склоне западной экспозиции с углами наклона 1—3˚.

Курганная группа (2 насыпи) около объекта культурного наследия федерального значения «Поселение-3» (далее «Тамань-3») расположена в Темрюкском районе Краснодарского края на южном побережье Таманского залива в 5,2 км к северо-востоку от станицы Тамань, на левом борту балки Лисовицкого и севернее шоссе ст. Тамань — пос. Сенной.

Курганная группа известна с середины XIX в. и по настоящее время, на этой территории проводились несколько археологических изысканий (Кузнецова, Чурекова 2022: 76—81).

Ландшафт археологического памятника представлен слабопокатым макросклоном северной экспозиции с углами наклона 1—3˚ и более крутыми склонами восточной экспозиции балки Лисовицкого. В центральной части четко выражены два кургана высотой по 0,93 и 0,73 м и диаметром 50 и 44 м соответственно.

Исходные данные и метод

Алгоритм проведения данного исследования включает в себя несколько этапов:

1. Получение исходных данных и их первичная обработка.
2. Фильтрация данных.
3. Анализ данных методами машинного обучения.
4. Сопоставление полученной информации и окончательные выводы.

Первый этап заключается в получении исходных данных, источником которых послужили полевые работы, выполненные в апреле 2023 г. на территории археологического памятника «Станция Красавка» (площадь 8,27 га) (Свидетельство № 2023624926), а также

наземная лидарная съёмка, выполненная в июле 2024 г. на территории курганной группы около античного сельского поселения Тамань-3 (13,4 га) (Свидетельство № 2025620969).

Методика получения данных при выполнении наземной лазерной съёмки на обеих территориях существенно не отличалась и подробно описана в статье (Данилов и др. 2024: 5—24). Единственное отличие заключалось в характере подстилающей поверхности. Если на территории памятника «Станция Красавка» она была представлена озимыми высотой около 15 см, то на территории «Тамани-3» половина сельхозугодий была занята под стернёй высотой 10—15 см, а вторая половина под залежью с редким травостоем высотой 2—10 см, но на конечный результат данный факт не оказал существенного влияния. Обработка результатов полевых работ осуществлялась в программе Leica Cyclon, в результате были получены облака точек на оба участка исследования.

На втором этапе проводится упрощение и уменьшение объема, фильтрация и приведение исходных данных к регулярной сети. Пространственное разрешение модели рельефа сети имеет важное значение в выделении локальных максимумов, ведь чем больше точек на единицу площади получается, тем детальнее будет модель, что в свою очередь требует больших вычислительных ресурсов для дальнейшей обработки.

Вычисление отметок высот по регулярной сети делается, прежде всего, для удобства дальнейшего анализа. Для решения этой задачи, на языке программирования Python, была разработана программа, позволяющая выбрать в заданной ячейке регулярной сети точку с минимальным значением по высоте и сохранить её в новую базу данных (Свидетельство № 2025614924). В результате её работы, на каждую территорию исследования, были получены новые облака точек с размерностью сетки значений с шагом 25 × 25 см, максимально приближенные к земной поверхности.

На третьем этапе ставилась задача на базе высокоточной цифровой модели рельефа (ЦМР) на территориях исследования в автоматизированном режиме выделить курганы, в том числе визуально нечитаемые, на основе методов и алгоритмов машинного обучения.

В качестве базовой модели для дальнейшего анализа и сравнения результатов было выбрано облако точек на территорию археологического памятника «Станция Красавка». Ранее на этой территории были идентифицированы и отфильтрованы курганы в полуавтоматическом режиме на основе технологии Hillshade (Данилов и др. 2024: 5—24), которые можно использовать в качестве опорной модели для выбора оптимального алгоритма обработки и анализа данных.

Предварительная обработка облака точек заключалась в определении направления и вычислении угла глобального уклона поверхности для её дальнейшего горизонтирования. Это нужно, чтобы выровнять все точки относительно горизонтальной плоскости и минимизировать уклон. Такая операция позволит более чётко выявить все неровности и отклонения по высоте на плоскости, включая курганы. Для решения этой задачи был создан программный модуль, который позволяет на основе данных из облака точек высчитать приращения высоты в каждой точке и получить новое значение высоты для последующего анализа. После формирования нового облака точек, проводится его интерполяция и построение цифровой модели поверхности (ЦМП), используемой в дальнейших исследованиях.

Алгоритм выделения курганов

После опробования ряда методов машинного обучения для дальнейшего анализа был выбран алгоритм DBSCAN, который лучше всего позволил выделить и сгруппировать точки, относящиеся к курганам. Улучшение качества данных достигается при сочетании с методами математико-картографического моделирования.

Весь процесс анализа включает в себя несколько этапов.

1) Преобразование и интерполяция данных. На этом этапе идет создание сетки, по которой будут распределены данные, для поиска артефактных значений методом скользящего окна. С помощью функции “*scipy.interpolate.griddata*” выполняется интерполяция высот. Из различных методов интерполяции выбор был остановлен на линейной и кубической

интерполяции позволяющей сохранить контур участка, лучше проследить изменения рельефа, а также обеспечить при построении более сглаженную модель поверхности.

После интерполяции полученной ЦМП требуется дополнительная обработка, в частности, фильтрация. На ЦМП применяется алгоритм «Гауссов фильтр», позволяющий сгладить поверхность. Это даёт возможность отсеять возвышенности, однозначно являющиеся артефактными, и улучшить качество данных для последующих шагов анализа.

2) Поиск локальных максимумов. Для поиска потенциальных мест расположения курганов на ЦМП была использована функция "*peak_local_max*". Она ищет в наборе данных высот локальные максимумы и определяет локализацию центральной точки среди группы найденных пиков.

3) Кластеризация точек возвышенностей. На основе алгоритма DBSCAN была проведена кластеризация найденных максимумов на ЦМП, опирающаяся на концепцию керновых выборок. Использование этого алгоритма необходимо для объединения близко расположенных вершин в кластеры, представляющие отдельные курганы. Он был применен в связи с тем, что рассматривает кластеры как области высокой плотности, которые разделены областями низкой плотности и из-за этого довольно общего представления кластеры могут иметь любую форму (Алгоритмы машинного обучения: кластеризация, 2024).

4) Создание и сохранение картографических материалов по результатам моделирования. Итогом обработки и моделирования данных лазерного сканирования методами машинного обучения, математико-картографического моделирования и ГИС-технологий является карта, на которой обозначены места локальных максимумов высот поверхности, указывающих на возможное наличие курганов (рис. 1).

В результате апробирования различных алгоритмов программирования и машинного обучения, на данный момент был выделен наиболее оптимальный, отражающий локальные максимумы артефактных групп относительно уплощенной трансформированной поверхности рельефа.

После определения оптимальных параметров для участка станции Красавка, данный алгоритм был опробован на территории участка «Тамань-3» (рис. 2).

Интерпретация результатов и выводы

Способ линейной и кубической интерполяции с применением гауссова фильтра и метода скользящего окна позволяет лучше визуализировать различные неровности поверхности и проанализировать их на предмет того, являются ли они курганом или нет. На данном этапе программа выделяет все неровности, артефакты. Было проведено ранжирование и фильтрация полученных локальных максимумов, чтобы отсечь явные артефакты, которые в основном формируются по краям модели. Гиперпараметры, методы интерполяции, величина сетки и сглаживание подбирается для конкретного участка, чтобы варьировать частоту и способ нахождения локальных максимумов. Также следует отметить, что не для каждого случая можно корректно определить точный размер потенциального кургана.

В контексте нахождения локальных максимумов, чувствительность модели может зависеть от нескольких факторов: сглаживания, поиска локальных максимумов и кластеризации.

Параметры сглаживания. Использование функции "*gaussian_filter*" с параметром *sigma* влияет на сглаживание данных. Чем выше значение *sigma*, тем более сглаженной будет поверхность, что может привести к уменьшению количества выявляемых локальных максимумов, так как соседние значения отметок высот будут сглажены.

Параметры поиска локальных максимумов. Функция "*peak_local_max*" имеет параметры *min_distance* и *threshold_abs*, которые определяют минимальное значение превышения локального максимума и расстояние между данными пиками соответственно. Изменение этих параметров может существенно повлиять на количество и расположение найденных локальных максимумов.

Параметры кластеризации. Алгоритм *DBSCAN* использует параметры *eps* и *min_samples*, которые определяют радиус для поиска «соседних» значений локальных максимумов и минимальное количество точек для формирования кластера. Эти параметры влияют на то, какие локальные максимумы будут сгруппированы в единые кластеры и, соответственно, на форму и количество выделенных контуров.

Параметры выделения на обоих участках были настроены для поиска возвышения локальных максимумов от поверхности на 10 см и более, параметры сглаживания *sigma* и уровень детализация кубической интерполяции (*cubic*) были выставлены соответственно на 1 и 1000, что позволило улучшить точность и визуальное качество отображения модели.

Значение скользящего окна кластеризации было выставлено методом подбора на 100, что позволило выделять локальные максимумы (центры возвышений условных курганов) радиусом от 10 до 50 метров. Экспериментально было установлено, что, при задании большего значения не все тестовые курганы выявляются моделью, при уменьшении — выделяются очевидно артефактные.

На основании исследования можно сделать следующие выводы: исходя из интеграции методов машинного обучения, математико-картографического моделирования, пространственного анализа средствами ГИС и алгоритмов машинного обучения, можно выделить зоны потенциального расположения курганных групп. Методика визуальной интерпретации курганов по светотеневой отмывке (Хиллшейд), рассмотренная в качестве предварительного анализа и обработки данных, позволяет выявить некоторые курганы, но не все. Стоит отметить, что для территорий со значительным уклоном рекомендуется также проводить предварительную обработку и фильтрацию поверхности, путем горизонтирования.

Основываясь на апробируемой методике с использованием машинного обучения, можно сказать, что на участке исследования «Тамань-3» алгоритм проявляет себя корректно на уже выделенных визуально курганах, но также ловит и другие артефакты поверхности, которые требуют дополнительного анализа. Уязвимость алгоритма в том, что он крайне чувствителен к разбросу высот и выявляет довольно много локальных максимумов, которые не всегда являются именно курганами (гряды, холмы, насыпи и т.п.).

Так, для исследуемого участка курганного могильника у поселения «Станция Красавка» первоначально при полевом обследовании было выявлено шесть курганов. На базе метода Хиллшейд было выделено девять, а алгоритмом машинного обучения уже пятнадцать локальных максимумов, которые потенциально могут быть центрами возвышенностей курганов (рис. 1). При этом пять из них идентифицируются и с помощью свето-теневой отмывки, и с помощью алгоритма машинного обучения. На территории участка «Тамань-3» первоначально было выявлено два кургана, после применения алгоритма было выделено семь локальных максимумов (рис. 2). Стоит отдельно сказать, что на обоих участках после применения как метода Хиллшейд, так и алгоритмов выделения локальных максимумов, были локализованы ранее выявленные при визуальном обследовании курганы.

Стоит отметить, что найденные локальные пики на участке Красавка в некоторых ячейках помещаются внутрь контура ранее выделенного кургана, что можно объяснить повреждением формы кургана в результате хозяйственной деятельности человека или воздействия природных эрозионных факторов.

Литература

Алгоритмы машинного обучения: кластеризация. Scikit-learn. URL: https://scikit-learn.ru/stable/modules/clustering.html (дата обращения 29.11.2024).

Данилов и др. 2024: Данилов В.А., Лопатин В.А., Морозова В.А., Федоров А.В. 2024. Геоинформационное моделирование рельефа для выявления перспективных участков археологических исследований на примере памятников Саратовской области. *Нижневолжский археологический вестник* 23 (2), 5—24. DOI: https://doi.org/10.15688/nav.jvolsu.2024.2.1.

Еремеев и др. 2023: Еремеев С.В., Абакумов А.В., Андрианов Д.Е., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. 2023. Обнаружение многолетних бугров пучения с использованием декомпозиции цифровых моделей рельефа по топологическим признакам. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* 20 (6), 129—143. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-129-143.

Иванов М.А., Ермолаев О.П. 2017. Геоморфометрический анализ бассейновых геосистем Приволжского федерального округа по данным SRTM и AsterGDEM. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* 14 (2), 98—109. DOI: https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109.

Кузнецова Е.В., Чурекова Н.Б. 2022. Античное сельское поселение «Тамань 3»: предварительные итоги исследований 2015—2021 гг. В: *От Кавказа до Дуная: Северное Причерноморье в античную эпоху. Сборник научных трудов к 70-летию профессора С.Ю. Монахова*. Саратов: СарГУ 238—251.

Лисицын В.М., Обросов К.В., Сафонов В.А. 2019. Выделение и определение параметров цилиндрических и сферических поверхностей при сегментации дальностных лазерно-локационных изображений. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления* 6, 103—118. DOI: 10.1134/S0002338819060118.

Лопатин В.А., Тарабрин С.Ю. 2020. Новый памятник финальной бронзы с материалами сусканского типа на севере Волго-Донского междуречья. В: *Волго-Уральский регион от древности до средневековья: материалы VI Нижневолжской Международной археологической научной конференции.* Волгоград: ВолГУ, 76—81.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2023624926 Российская Федерация. Цифровая модель рельефа территории археологического памятника «Нижняя Красавка-2», расположенного в Аткарском муниципальном районе Саратовской области: №2023624423 : заявл. 03.12.2023 : опубл. 22.12.2023 / С.Ю. Монахов, М.Н. Растегаева, В.А. Лопатин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», 1—4.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620969 Российская Федерация. Цифровая модель поверхности территории объекта культурного наследия федерального значения «Поселение-3», курганная группа (2 насыпи) (ст-ца Тамань): №2025620472 : заявл. 23.02.2025 : опубл. 03.03.2025 / С.Ю. Монахов, М.Н. Растегаева, В.А. Данилов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», 1—4.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614924 Российская Федерация. Программа предварительной обработки данных лазерного сканирования для дальнейшего построения и анализа цифровой модели рельефа: №2025613176 : заявл. 23.02.2025 : опубл. 27.02.2025 / С.Ю. Монахов, М.Н. Растегаева, В.А. Данилов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», 1—4.

Хлебникова Е.П., Крупочкин Е.П. 2009. Методы дешифрирования археологических памятников. *Интерэкспо Гео-Сибирь* 4 (1), 36—40.

Berganzo-Besga et al. 2023: Berganzo-Besga I., Orengo H.A., Lumbreras F., Alam A., Campbell R., Gerrits P.J., Souza J.G., Khan A., Suárez-Moreno M., Tomaney J., Roberts R.C., Petrie C.A. 2023. Curriculum learning-based strategy for low-density archaeological mound detection from historical maps in India and Pakistan. *Scientific Reports* 13, 1—15. DOI: 10.1038/s41598-023-38190-x.

Cartwright J.M., Diehl T.H. 2017. Automated identification of stream-channel geomorphic features from high-resolution digital elevation models in West Tennessee watersheds. *Scientific Investigations Report*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 1—44. DOI: 10.3133/sir20165141.

Chang Y., Bailey D., Le Moan S. 2019. The shape of patterns tells more: Using two dimensional Hough transform to detect circles. *Procedia 5th Asian Conf. Pattern Recognition* 12047, 64—75. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41299-9_6.

Ishalina O.T., Bliakharskii D.P., Florinsky I.V. 2021. Recognition of crevasses with high-resolution digital elevation models: application of geomorphometric modeling and texture analysis. *Transactions in GIS* 25 (5), 2529—2552. DOI:10.1111/tgis.12790.

References

Machine learning algorithms: clustering. Scikit-learn. Available at: https://scikit-learn.ru/stable/modules /clustering.html (accessed 29.11.2024).

Danilov et al. 2024: Danilov, V.A., Lopatin, V.A., Morozova, V.A., Fedorov, A.V. 2024. In *Nizhnevolzhskiy Arkheologicheskiy Vestnik (The Lower Volga. Archaeological Bulletin)* 23 (2), 5—24. DOI: https://doi.org/10.15688/nav.jvolsu.2024.2.1 (in Russian).

Eremeev et al. 2023: Eremeev, S.V., Abakumov, A.V., Andrianov, D.E., Bogoyavlensky, I.V., Nikonov, R.A. 2023. In *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa (Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space)* 20 (6), 129—143. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-129-143 (in Russian).

Ivanov M.A., Ermolaev O.P. 2017. In *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa (Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space)* 14 (2), 98—109. DOI: https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-2-98-109 (in Russian).

Kuznetsova, E.V., Churekova, N.B. 2022. In: *Ot Kavkaza do Dunaya: Severnoye Prichernomor'ye v antichnuyu epokhu. Sbornik nauchnykh trudov k 70-letiyu professora S.Yu. Monakhova (From the Caucasus to the Danube: the Northern Black Sea region in the ancient era. Collection of scientific papers for the 70th Anniversary of Professor S.Yu. Monakhov)*. Saratov: SarGU, 238—251 (in Russian).

Lisitsyn, V.M., Obrosov, K.V., Safonov, V.A. 2019. In *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravleniya (Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems)* 6, 103—118. DOI: 10.1134/S0002338819060118 (in Russian).

Lopatin, V.A., Tarabrin, S.Yu. 2020. In: *Volgo-Ural'skiy region ot drevnosti do srednevekov'ya: materialy VI Nizhnevolzhskoy Mezhdunarodnoy arkheologicheskoy nauchnoy konferencii (The Volga-Ural region from antiquity to the Middle Ages: Proceedings of the Lower Volga International Archaeological Scientific Conference)*. Volgograd: VolGU, 76—81 (in Russian).

Certificate of state registration of the database No. 2023624926 Russian Federation. Digital relief model of the territory of the archaeological site "Nizhnyaya Krasavka-2" located in the Atkarsky municipal district of the Saratov region: No. 2023624423 : appl. 03.12.2023 : publ. 22.12.2023 / S.Yu. Monakhov, M.N. Rastegaeva, V.A. Lopatin [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky", 1—4 (in Russian).

Certificate of state registration of the database No. 2025620969 Russian Federation. Digital surface model of the territory of the cultural heritage site of federal significance "Settlement-3", kurgan group (2 mounds) (Taman station): No. 2025620472 : appl. 23.02.2025 : publ. 03.03.2025 / S.Yu. Monakhov, M.N. Rastegaeva, V.A. Danilov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky", 1—4 (in Russian).

Certificate of state registration of the computer program No. 2025614924 Russian Federation. Program for preliminary processing of laser scanning data for further construction and analysis of a digital relief model: No.2025613176 : appl. 23.02.2025 : publ. 27.02.2025 / S.Yu. Monakhov, M.N. Rastegaeva, V.A. Danilov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky", 1—4 (in Russian).

Khlebnikova, E.P., Krupochkin, E.P. 2009. In *Interekspo Geo-Sibir' (InterExpo Geo-Siberia)* 4 (1), 36—40 (in Russian).

Berganzo-Besga et al. 2023: Berganzo-Besga, I., Orengo, H.A., Lumbreras, F., Alam, A., Campbell, R., Gerrits, P.J., Souza, J.G., Khan, A., Suárez-Moreno, M., Tomaney, J., Roberts, R.C., Petrie, C.A. 2023. Curriculum learning-based strategy for low-density archaeological mound detection from historical maps in India and Pakistan. *Scientific Reports* 13, 1—15. DOI: 10.1038/s41598-023-38190-x.

Cartwright, J.M., Diehl, T.H. 2017. Automated identification of stream-channel geomorphic features from high-resolution digital elevation models in West Tennessee watersheds. *Scientific Investigations Report*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 1—44. DOI: 10.3133/sir20165141.

Chang, Y., Bailey, D., Le Moan, S. 2019. The shape of patterns tells more: Using two dimensional Hough transform to detect circles. *Procedia 5th Asian Conf. Pattern Recognition* 12047, 64—75. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41299-9_6.

Ishalina, O.T., Bliakharskii, D.P., Florinsky, I.V. 2021. Recognition of crevasses with high-resolution digital elevation models: application of geomorphometric modeling and texture analysis. *Transactions in GIS* 25 (5), 2529—2552. DOI: 10.1111/tgis.12790.

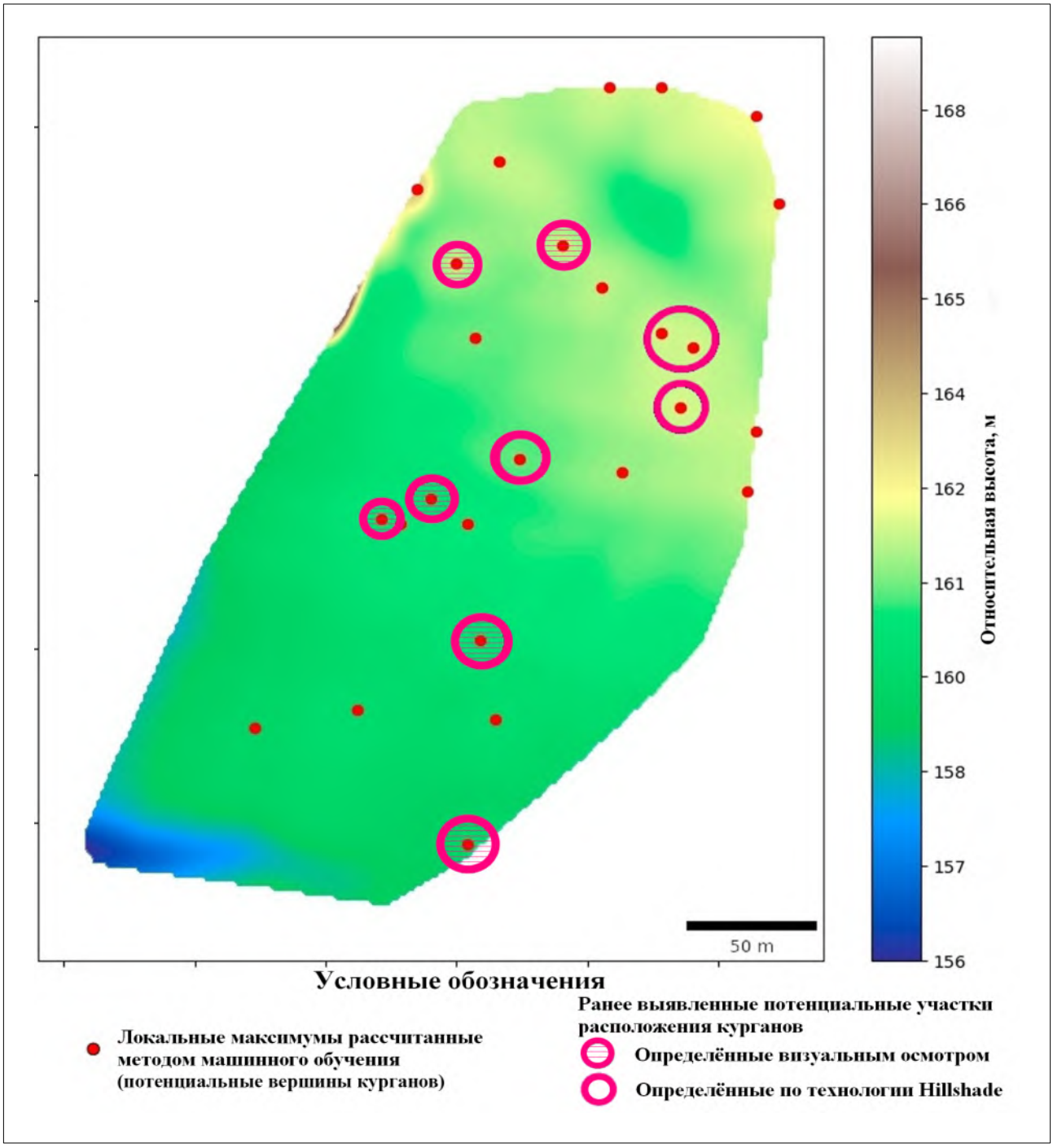

Рис. 1. Расчет локальных максимумов на территорию археологического памятника «Станция Красавка» по трансформированной модели рельефа с параметрами: sigma=1, детализация 1000 уровней, сетка 100 м.

Fig. 1. Calculation of local maxima for the territory of the archaeological monument “Stantsiya Krasavka” according to the transformed relief model with sigma=1 parameters, the detail is 1000 levels, grid is 100 m.

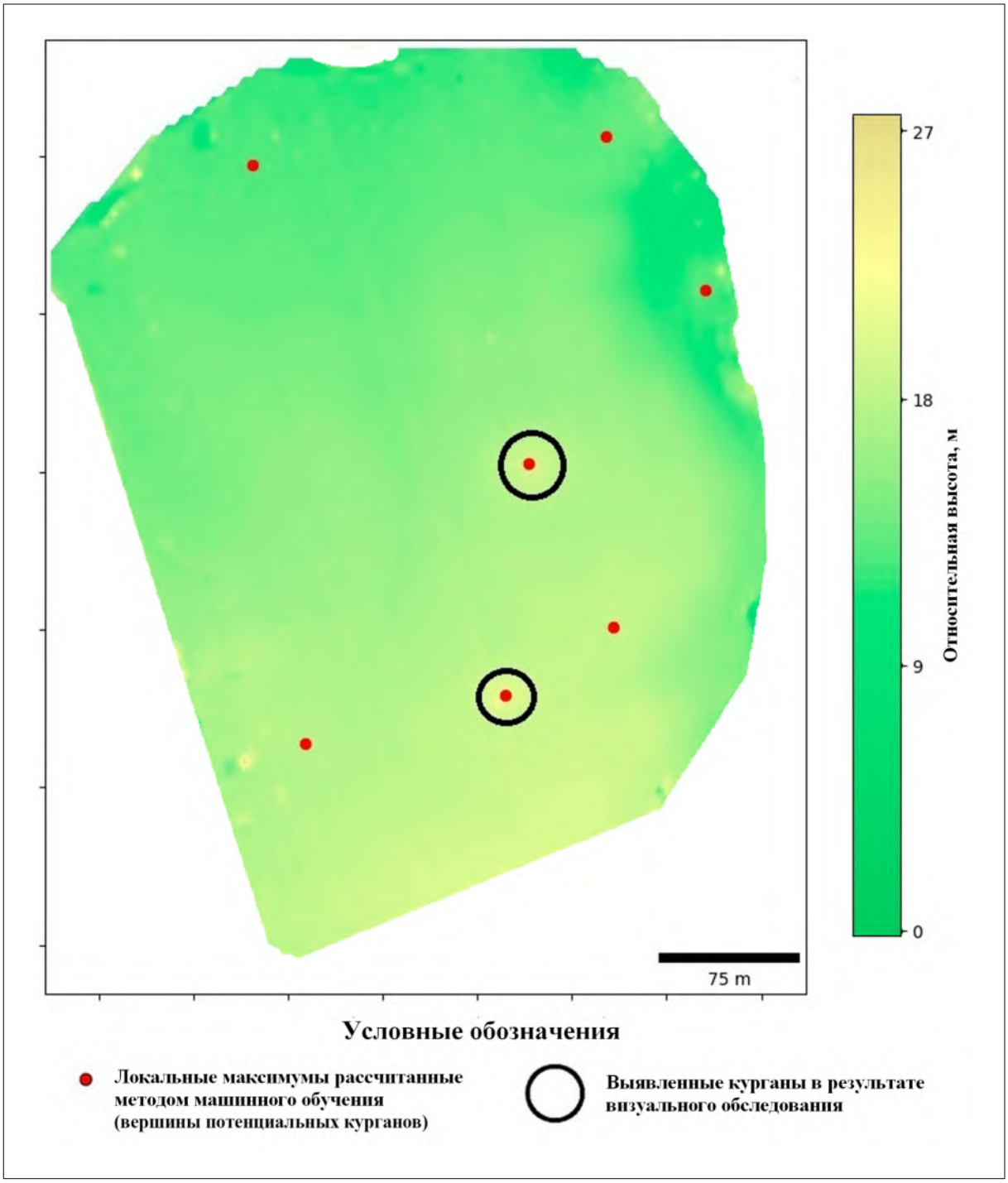

Рис. 2. Расчет локальных максимумов на территорию археологического памятника «Тамань-3» по трансформированной модели рельефа с параметрами: sigma=0.1, детализация 500 уровней, сетка 100 м.

Fig. 2. Calculation of local maxima for the territory of the archaeological monument “Taman-3” according to the transformed relief model with sigma=0.1 parameters, the detail is 500 levels, grid is 100 m.