



DOI: <https://doi.org/10.15688/nav.jvolsu.2024.2.1>

UDC [528.9:004]+902(470.44)  
LBC 63.48(2)+26.191



Submitted: 02.07.2024  
Accepted: 29.03.2024

**GEOINFORMATION MODELING OF TERRAIN  
TO IDENTIFY PROMISING AREAS FOR ARCHAEOLOGICAL RESEARCH  
USING THE EXAMPLE OF MONUMENTS IN SARATOV REGION <sup>1</sup>**

**Vladimir A. Danilov**

Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

**Vladimir A. Lopatin**

Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

**Valeriya A. Morozova**

Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

**Alexey V. Fedorov**

Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russian Federation

**Abstract.** This article provides an overview of modern remote sensing techniques in archaeology and their practical applications. The widespread use of GIS technologies and remote sensing methods such as photogrammetry and laser scanning is a distinguishing characteristic of contemporary archaeology. Remote sensing data is employed not only for the analysis of 3D archaeological objects and territories but also in the digital terrain models (DTMs) analysis to search for and identify potential archaeological excavation sites. The introduction of remote sensing methods in archaeology has brought about a change in the approach to conducting archaeological studies. In the field of international research, a distinct stage known as predictive archaeology, which involves preliminary reconnaissance of an area before excavation, has emerged. The study is focused on the archaeological sites of Stantsiya Krasavka and Akhmatskoe Gorodishche, located in the Atkarsky and Krasnoarmeysky municipal districts of the Saratov region. The selected study areas applied the DTM analysis, specifically using the “Hillshade” technique (analytical shading relief), which allows for the detection of previously overlooked terrain features. Based on the results, the potential of this technology for identifying individual archaeological objects using contemporary open DTMs and field geodetic survey data was analyzed. Experimental determination of the optimal DTM resolution for the identification and analysis of objects was conducted in areas previously subject to archaeological research. The experiments and comparative analysis of various laser scanning technologies led to the identification of optimal methods and filtering parameters to “exclude” vegetation and generate DTMs.

**Key words:** laser scanning, DTM, GIS, preliminary stage, predictive search, Hillshade, Akhmatskoe Gorodische, Stantsiya Krasavka.

**Citation.** Danilov V.A., Lopatin V.A., Morozova V.A., Fedorov A.V., 2024. Geoinformatsionnoe modelirovanie rel'efa dlya vyyavleniya perspektivnykh uchastkov arheologicheskikh issledovaniy na primere pamyatnikov Saratovskoy oblasti [Geoinformation Modeling of Terrain to Identify Promising Areas for Archaeological Research Using the Example of Monuments in Saratov Region]. *Nizhnevolzhskiy Arkheologicheskiy Vestnik* [The Lower Volga Archaeological Bulletin], vol. 23, no. 2, pp. 5-24. DOI: <https://doi.org/10.15688/nav.jvolsu.2024.2.1>

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКОВ  
АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НА ПРИМЕРЕ ПАМЯТНИКОВ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ<sup>1</sup>**

**Владимир Анатольевич Данилов**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
г. Саратов, Российская Федерация

**Владимир Анатольевич Лопатин**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
г. Саратов, Российская Федерация

**Валерия Андреевна Морозова**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
г. Саратов, Российская Федерация

**Алексей Васильевич Федоров**

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
г. Саратов, Российская Федерация

**Аннотация.** Статья содержит обзор современных средств дистанционного зондирования в археологии. Широкое применение ГИС-технологий и дистанционных методов, таких как фотограмметрия и лазерное сканирование, является отличительной особенностью современной археологии. Дистанционные данные используются не только для анализа археологических объектов и территорий, но и находят применение в оценке цифровых моделей рельефа (ЦМР) с целью поиска и определения перспективных участков археологических раскопок. Спутниковая археология меняет методологию проведения археологических работ. В зарубежной археологии при планировании работ выделяется отдельный полноценный исследовательский этап, который называют предиктивным. Он предполагает предварительный анализ перспективной территории с использованием данных дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования. В качестве объектов исследования рассмотрены археологические памятники «Станция Красавка» и «Ахматское городище», расположенные в Аткарском и Красноармейском муниципальных районах Саратовской области. На выбранных участках была применена технология анализа ЦМР, в частности технология Хилшейд (аналитическая светотеневая отмычка рельефа), позволяющая обнаружить неучтенные ранее формы рельефа. На основе полученных результатов были оценены возможности использования данной технологии для поиска отдельных археологических объектов. На участках ранее выполненных археологических исследований была экспериментально определена оптимальная дискретность ЦМР для идентификации и анализа археологических объектов.

**Ключевые слова:** лазерное сканирование, ЦМР, ГИС, предполевой этап, предиктивный поиск, Хилшейд, «Ахматское городище», «Станция Красавка».

**Цитирование.** 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. Т. 23, № 2. С. 5–24. DOI: <https://doi.org/10.15688/nav.jvolsu.2024.2.1>

## Состояние проблемы

В современной археологии в рамках междисциплинарного подхода все более широко используются геоинформационные технологии (ГИС-технологии) и данные дистанционного зондирования Земли (далее – ДДЗ) [Petrie et al., 1995, p. 45–71]. Их применение позволяет уменьшить затраты средств и времени при проведении археологических работ, облегчает задачу по выявлению древних могильников и поселений [Афанасьев и др., 2004, с. 51–60; Коробов, 2011, с. 55–70; Madry, Crumley, 1990]. Популярным направлением становится спутниковая (космическая) археология. Впервые термин можно встретить с начала 1980-х гг., с тех пор он стал широко применяться для обозначения использования космических технологий в изучении памятников археологии и культуры [Agariou et al., 2013; Parsak, 2009, p. 205–232]. Методы «спутниковой археологии» могут включать различные аналитические подходы, такие как обработка геоизображений, мульти- и гиперспектральный анализ, лидарное зондирование и др., которые используются для обнаружения неизвестных археологических памятников и реконструкции археологических обстановок [Ebert, Kohler, 1988, p. 101–148; Kohler, Parker, 1986, p. 420–450].

За последние 25 лет в мировой «спутниковой археологии» заметен рост интереса к геоинформационному пространственному моделированию. В его рамках активно используется метод предиктивного или предсказывающего моделирования (*predictive modeling*) [Hamilton, 2000, p. 42–71]. Эта методика впервые широко стала применяться в США с начала 1980-х гг. при решении задач управления культурным наследием (*Cultural Resource Management – CRM*) на обширных территориях, в Европе активное использование наблюдается с 2000-х гг. [Van Leusen, 2002, p. 2–9].

Предиктивное (прогностическое) моделирование с использованием ГИС-технологий – это многофакторный анализ территории вероятностного нахождения археологических памятников. Этот анализ позволяет выявить новые археологические объекты и подтвердить уже имеющиеся [Verhagen, Whitley, 2012, p. 49–100].

Сейчас это стало возможным благодаря появлению и широкому распространению

более качественных ДДЗ с высоким пространственным разрешением, полученных при проведении различных видов съемок местности (мульти- и гиперспектральная, лидарная и радарная съемки) с применением беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА). Поэтому ДДЗ вошли в практику современных археологических исследований.

В качестве объектов исследования были выбраны два памятника археологии на территории Саратовской области – «Ахматское городище» и курганная группа «Станция Красавка», расположенная недалеко от поселения эпохи поздней бронзы «Станция Красавка».

На примере курганной группы «Станция Красавка» по данным наземного лазерного сканирования была построена высокоточная цифровая модель рельефа (далее – ЦМР) и применена технология Хилшейд (*hillshade*), являющийся одним из инструментов ГИС. Технология Хилшейд представляет собой аналитическую отмыску рельефа, с подобранными параметрами угла и высоты источника освещения [Востокова и др., 2002, с. 169–186], что позволяет более детально выявлять неровности рельефа.

ЦМР позволила на крупномасштабном уровне реализовать технологию «предиктивного моделирования» местоположения археологических объектов (курганов), где сначала была подтверждена фиксация уже поставленных на охрану курганов, и выявлены новые потенциальные участки с возможным нахождением некрополей (курганов). В данном случае, используя «предиктивное моделирование» на основе технологии Хилшейд, нами были выделены факторы (угол освещения, уклон поверхности, экспозиция, высота «искусственного» источника освещения, расчлененность территории), которые позволили выделить курганы.

Целью данной публикации является оценка релевантности использования цифровых моделей рельефа и их производных, полученных на основе технологии Хилшейд, в рамках предиктивного анализа на основе данных наземного лазерного сканирования.

## Характеристика района археологических исследований

«Ахматское городище» располагается на правом берегу Волги в 4 км к северо-запа-

ду от с. Ахмат (рис. 1,2). Памятник расположен на открытом мысовом плато, образованном двумя оврагами, к востоку от городища сливающимися в балку Елховую. С напольной стороны территория городища защищена системой фортификации, состоящей из двух земляных валов и двух рвов.

Памятник был обнаружен в 1904 г. во время разведочной поездки члена Саратовской ученой архивной комиссии (СУАК) С.А. Щеглова по Камышинскому уезду Саратовской губернии. В 1912 г. на «Ахматском городище» побывал А.А. Спицын, которого сопровождали С.А. Щеглов, В.И. Онезорге, П.Н. Шишкин, Б.В. Зайковский и другие члены СУАК [Лопатин, 2003, с. 10], некоторые исследователи посещали его и позднее [Миронов, 1989, с. 107–121; Лопатин, 2009, с. 38–50]. В 1930-е гг. городище обследовалось П.С. Рыковым [Рыков, 1931], а также И.В. Сеницыным и П.Д. Степановым. Было установлено, что это многослойный памятник, верхний культурный пласт которого содержит материалы золотоордынской эпохи, средний слой, по характеру находок, оставлен представителями городищской культуры, а нижний слой относится к эпохе бронзы.

Ограниченные работы проводились на «Ахматском городище» в 2012 и 2014 годах. Были заложены несколько разведочных шурфов для проверки современного состояния памятника и для выяснения характера культурных отложений [Кузнецова, Лопатин, 2015, с. 161–178]. В результате было подтверждено присутствие здесь культурных слоев эпохи средней и поздней бронзы, раннего железного века и позднего средневековья.

Наибольшая группа керамических находок относится к раннему железному веку. Они имеют выраженный городищско-скифоидный облик и относятся ко времени возведения фортификационных сооружений в VI–V вв. до н.э. Носители городищской культуры жили здесь вплоть до сарматского времени [Кузнецова, Лопатин, 2015, с. 167]. Находки разрозненных костей человека позволяют предполагать наличие здесь грунтового могильника, культурно-хронологическая принадлежность которого пока не установлена.

*Курганная группа «Станция Красавка»* расположена в Аткарском районе Сара-

товской области на второй надпойменной террасе левого берега р. Медведицы, в 2,6 км к востоку от г. Аткарска, расположенного напротив памятника на противоположном, правом берегу реки (рис. 1,1).

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. Сеницына. 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. Массовый керамический материал, обнаруженный в ходе работ, представляет собой фрагменты лепной сероглиняной посуды эпохи поздней бронзы – XIV–XIII вв. до н.э. Орнаментация и морфология сосудов позволяют отнести их к срубной, сусканской и хвалынской археологическим культурам. Была вскрыта часть полуземляночной постройки прямоугольной формы [Лопатин, Тарабрин, 2020, с. 77–80]. В непосредственной близости от поселения зафиксирована курганная группа, раскопки которой планируются в 2024 году. Предполагается, что курганы могут быть родовыми могильниками обитателей поселения «Станция Красавка».

### Исходные данные и метод

Сейчас в предиктивном моделировании можно выделить два основных направления для прогнозирования местоположения археологических объектов:

1. Автоматизированное дешифрирование с обучением.

2. Картографический метод [Van Leusen, 2002, p. 2–10; Balla et al., 2013, p. 590–609].

**Автоматизированное дешифрирование** для определения потенциальных археологических объектов (*supervised classification*) проводится по различным типам данных: спектральные, радарные, лидарные и позволяет автоматически классифицировать новые объекты на основе заранее определенных обу-

чающих данных существующих археологических раскопок [Чандра, Гош, 2008, с. 95–100; Шихов и др., 2020, с. 53–95, 116–138].

В зависимости от целей археологических исследований, используются доступные спутниковые снимки высокого разрешения, такие как World View, Quick Bird, GeoEye, а также открытые данные от NASA, ESA и других организаций. К данным дистанционного зондирования относят и открытые цифровые модели местности (далее – ЦММ) и рельефа (ЦМР), такие как SRTM, Copernicus, ALOS, FABDEM, с пространственным разрешением 30 метров.

В качестве примеров успешного применения ДДЗ в поиске и обнаружении археологических объектов можно упомянуть исследования, проводившиеся в Египте [Помогаев, 2003], Центральной Америке, Азии, Европе [Lasaponara, Masini, 2011] и России [Калашников и др., 2023].

**В картографическом методе** выделяются методы исследований АНР (*Analysis Hierarchy Process* – метод анализа иерархий) и FR (*Frequency Ratio*) [Saaty, Vargas, 1980], которые представляют группу многофакторных анализов территории. В зарубежной археологии они применяются для выявления закономерностей распределения древних поселений.

Картографический метод с применением ГИС-моделирования позволяет выполнить пространственно-временной анализ расположения археологических объектов и выбрать место для раскопок, определить приоритетные объекты для исследования.

Определение мест для проведения раскопок может основываться на различных факторах и критериях. Некоторые из них могут включать крутизну склонов, экспозицию, кривизну склонов, абсолютные и относительные отметки высот, геологическое строение, тип фильтрационного разреза, удаленность от рек и поселений и т. п. [Nsanziyera et al., 2018, p. 1–21; Yang et al., 2012].

На основе применения многофакторного анализа в мировой практике были идентифицированы археологические объекты на территории Марокко, Северо-Восточного Ирана, Нидерландов и ряда других стран [Warren, Asch, 2000, p. 5–30; Chandio et al., 2014, p. 87–93].

Интересные результаты были получены в ходе поиска курганного могильника, исследованного еще в 1926 г. членами Самарского Общества археологии, истории, этнографии и естествознания под общим руководством В.В. Гольмстен. Для его обнаружения были проведены: анализ архивных и современных космических снимков, пространственный анализ, анализ цифровой модели рельефа. Результаты проверены полевой разведкой. Впервые для поиска степных курганов удачно использована тепловизионная съемка с БПЛА [Вальков и др., 2022, с. 419–428].

Эффективное использование предиктивных моделей с высоким пространственным разрешением для обширных территорий было практически невозможно без сокращения размеров выборок и номенклатуры используемых переменных – именно в этот момент оказались востребованы технологические возможности ГИС, позволившие успешно преодолеть ограничения в построении моделей, связанных с обработкой и анализом больших массивов пространственных данных [Green, 1973, p. 280–292] и предоставившие исследователям доступ к значительному объему сведений для анализа и прогнозирования будущих мест раскопок [Антонов и др., 2022, с. 127–140].

Таким образом, применение методов геоинформационного моделирования, в частности технологии Хилшейд, и использование спутниковых снимков могут помочь в выявлении и анализе археологических объектов (в первую очередь, имеющих микрорельеф), таких как курганы и фортификационные сооружения. Эти методы позволяют археологам определить местоположение и форму потенциальных памятников, а также анализировать большие территории для выявления новых археологических объектов.

Однако, прежде чем делать окончательные выводы о наличии археологических объектов на основе данных дистанционного зондирования, требуется проявить осмотрительность и провести дополнительные изыскания.

Существует огромный массив открытых данных по рельефу, однако для создания точных и корректных цифровых моделей нередко используют комплексирование методов полу-

чения точек рельефа. При поиске оптимальной дискретности модели рельефа можно задействовать сразу несколько технологий в рамках одного исследования.

Следует выделить три этапа предиктивного геоинформационного моделирования по ЦМР:

1) получение «облака точек» местности с применением различных технологий;

2) постобработка «облака точек», включающая корректировку, пространственную привязку и фильтрацию данных (отсечение растительного покрова и антропогенных объектов и прочих сооружений современного периода);

3) анализ поверхности с применением технологии геоинформационного моделирования Хилшейд, анализ результатов с точки зрения возможности их практического применения.

ЦМР создается на основе высотных данных, полученных с помощью различных технологий, таких как лазерное сканирование, фотограмметрия, тахеометрическая съемка и др. Морфометрическая информация о рельефе может быть полезна для выявления потенциальных территорий археологической значимости, так как археологические объекты и структуры часто связаны с особенностями рельефа. Древние русла рек, места, где рельефный уровень близок к прошлым водным объектам (террасы, террасные ступени) и формы рельефа создают удобные условия для жизни и деятельности человека (пологие участки у рек или озер). Такие территории могут быть предполагаемыми местами жительство или деятельности древних обществ и могут оказаться потенциально интересными для археологических раскопок.

В данном исследовании актуальная ЦМР на изучаемые памятники получена с применением технологии наземного лазерного сканирования.

**Лазерное сканирование** представляет собой съемку территории посредством активного излучения и выявления разной отражательной способности объектов для получения 2D- и 3D-моделей окружающего пространства. В процессе работы приборов создается облако, включающее в себя от нескольких тысяч до нескольких миллионов точек с пространственными координатами, на основе которого в итоге строит-

ся объемное изображение. Измерения проводятся с точностью до миллиметра.

Археологи используют лазерное сканирование для создания детальных моделей археологических объектов, таких как статуи, здания, пещеры и поселения. Это позволяет увидеть объекты в высоком разрешении и изучать их более тщательно. В качестве примера использования данной технологии можно привести инновационный метод применения лидара, который позволил найти новые объекты цивилизации Майя в джунглях [Kokalj, Mast, 2021, p. 1–11].

Существует три основных типа лазерного сканирования – наземное, воздушное, мобильное [Брынь и др., 2020; Данилов и др., 2019, с. 163–165; Середович, Иванов, 2013, с. 134–140].

Главным преимуществом всех технологий лазерного сканирования является получение максимально точного представления рельефа даже на территории, покрытой растительностью, за счет интенсификации измерений и использования специальных алгоритмов обработки. Плотность измерений отражений от поверхности рельефа является избыточной, что позволяет построить подробную ЦМР с заданным шагом.

В данном исследовании воздушное лазерное сканирование (далее – ВЛС) не выполнялось над изучаемыми территориями, решение было принято в пользу наземного лазерного сканирования (далее – НЛС), что было обусловлено набором факторов, не позволяющих выполнить ВЛС:

1. Законодательные ограничения использования БПЛА над данной территорией (охранная зона объектов критической инфраструктуры, военных объектов и прямые распоряжения региональных властей).

2. Ошибки функционирования координатной привязки БПЛА, осуществляемой по GPS.

Выполненные в работе А.В. Комиссарова [Комиссаров, 2016, с. 112–144] эксперименты показали, что наличие растительности значительно ухудшает детальность сканов, снижает точность обработки данных наземного лазерного сканирования. Для исключения влияния этого фактора следует соответствующим образом изменять высоту установки сканера на станции съемки. Также рекомендуется производить сканирование при отсутствии лиственного покрова, увели-

чить интенсивность или число станций при планировании работ.

Поскольку процесс раскопок связан с необратимым разрушением культурного слоя, всеобъемлющая реконструкция поверхностей представляет собой важнейший этап исследования.

*На первом этапе* съемка выбранных нами памятников выполнялась методом наземного лазерного сканирования с применением сканера Leica Scan Station P20.

Для минимизации влияния растительности лазерное сканирование территории «Ахматского городища» осуществлялось в конце марта [Свидетельство ... № 2023624670], а для курганной группы «Станция Красавка» [Свидетельство ... № 2023624926] – в начале апреля, до активной вегетации, с плотностью точек (шагом) в 1,6 мм на удалении 10 м. Места съемки располагались на локальных возвышениях во избежание «теневых» зон, а удаленность друг от друга соседних точек сканирования не превышала 50–70 м, при дальности измерений до 120 м. На «Ахматском городище» съемка велась с 19 станций на площади сканирования порядка 2,59 га, а на поселении Станция Красавка – с 18 станций на площади сканирования порядка 8,27 га. Разреженность станций для последнего памятника обусловлена тем, что курганные группы расположены на поле, засеянном на момент съемки озимыми, межрядное расстояние посадочных полос составляло 15 см, а высота ростков не превышала 10–15 см, что обеспечивало отсутствие препятствий при сканировании рельефа. Координатная привязка между станциями осуществлялась геодезическим методом «по известной задней точке» с контролем точности по оптической марке и контрольным измерением положения сканера тахеометрическим методом.

*На этапе постобработки* происходит сшивка облака точек лазерного сканирования и идентификация точек рельефа. Ключевым моментом перехода от ЦММ к ЦМР является выделение точек поверхности, отсечение растительности и прочих объектов. Данную задачу решает специализированное программное обеспечение и ГИС-модули, которые используют алгоритмы фильтрации матричного описания процесса обработки данных лазерных отражений (далее – МООД) и метод виртуаль-

ной поверхности (далее – МВП) [Горькавый, 2011, с. 35–50], о которых речь пойдет далее.

В качестве алгоритма оптимизации рельефа предлагается использовать несколько GRID-поверхностей ЦМР [Осенняя, Корчагина, 2013]. Эти поверхности получены с разной степенью оптимизации. В результате использования этого алгоритма исключается возможность появления случайных скачков значений отметок, уменьшается степень влияния отдельно локализованных областей с резко отличающимися значениями высот на общую картину рельефа. Стоит отметить, что при этом происходит «замыливание» рельефа и удаление локальных понижений и повышений рельефа с меньшей размерностью шага.

Метод матричного описания процесса обработки данных лазерных отражений [Горькавый, 2011, с. 35–50] эффективен для задач извлечения и распознавания объектов или структур (земная поверхность, деревья, озера, здания и сооружения), которые отличаются от фона интенсивностью или высотой и представляют собой связанные множества. Списки элементов подмножеств дают его интегральные параметры: площадь, периметр, средние значения высот и яркости и их дисперсию. Сочетание данного метода МООД с МВП [Горькавый, 2011, с. 27–35] позволяет эффективно решить основную задачу классификации трехмерных данных лазерного сканирования: разделения множества точек на подмножества точек отражения от земли, растительности и от зданий.

Создание и обработка ЦМР с применением специальных фильтров реализованы в программном обеспечении (Bentley Micro Station с MDL, Leica Cyclone Model, Terra Scan и пр.). Подобные исследования описаны в ряде работ [Фаворская, 2009; Медведев, Райкова, 2017, с. 11–25].

*На втором этапе исследования* результаты лазерного сканирования были экспортированы и обработаны в ПО LeicaCyclone. Выполнены сшивка, уравнивание и координатная привязка результатов в единое «облако точек» по данным планово-высотной геодезической разбивки. Средняя ошибка уравнивания значения для «Ахматского городища» составила 4 мм, курганной группы «Станция Красавка» – 6 мм. Итоговая плотность точек

для объектов в результате разреживания составила от 300 до 20 измерений отметок высот на метр квадратный.

Извлечение отметок высот для построения ЦМР произвольной дискретности производилось в модуле Cloud Workx ПО Auto Desk Auto CAD с применением функционала поверхностной фильтрации по минимальным отметкам в рамках заданного радиуса. Для создания объективной модели ЦМР к сопоставимым техническим данным основных систем наземного лазерного сканирования шаг дискретности поиска и извлечения отметок высот рельефа был увеличен до 1 м, при технологической возможности построения модели с шагом до 10 см.

*Третий этап – применение технологии Хилшейд и геоинформационного моделирования* для выделения перспективных участков археологических раскопок. На основе цифровых моделей рельефа можно строить модели Хилшейд, которые позволяют создавать визуально объемные изображения ландшафта, где рельефные формы и структуры «подсвечиваются» в соответствии с углами падения и направлениями света. Это создает эффект теней и освещения, что делает более явными неровности рельефа. В археологических исследованиях применение технологии Хилшейд имеет несколько преимуществ.

Во-первых, она помогает выделить курганные группы, валы и другие археологические объекты на основе их формы и структуры. Такие объекты обычно имеют характерные рельефные особенности, что облегчает процесс идентификации и документирования археологических объектов перед полевыми исследованиями.

Во-вторых, использование открытых ДДЗ, таких как SRTM, Copernicus, ALOS, Sentinel и Landsat, в сочетании с технологией Хилшейд, позволяет археологам сократить финансовые и временные затраты на изыскания. Раньше для получения подобных данных требовались специальные выезды и сбор информации непосредственно на месте. Однако благодаря доступности открытых данных спутникового зондирования можно использовать уже существующие модели рельефа для анализа и предиктивного моделирования археологически

значимых мест [Verhagen et al., 2012, p. 379–388; Wansleeben, Verhart, 1997, p. 54–69].

Процесс создания аналитической отмывки рельефа выглядит следующим образом. Сначала вычисляют вектор нормали к поверхности для каждой точки растра, затем направление на источник света и определяют косинус угла между ними. Следует заметить, что для всех точек направление на источник света остается постоянным, а положение нормали меняется.

В большинстве настольных ГИС используется только простейший метод, представляющий собой непосредственную реализацию модели освещенности Ламберта. Параметром здесь является вектор направления на источник освещения, который задается, как правило, с помощью горизонтального (азимут) и вертикального углов. Азимут может отсчитываться либо от направления на север по часовой стрелке (как принято в геодезии), либо от направления на восток против часовой стрелки (как принято в математике). Чаще всего используют значения  $135^\circ$  для азимута и  $45^\circ$  – для вертикального угла [Востокова и др., 2002, с. 169–186].

В данном исследовании ГИС-моделирование проводилось на базе программного комплекса ArcGIS 10.8, в котором использовался программный картографический модуль для анализа поверхностей «Отмывка». На основе детального анализа цифровых моделей рельефа для «Ахматского городища» и курганной группы «Станция Красавка» были построены модели отмывки территории с азимутом  $315^\circ$ , вертикальным углом источника освещения  $15^\circ$  над поверхностью и вертикальным масштабным коэффициентом  $Z = 3$ , которые были установлены экспериментально. Результатом операции является 8-битный растр, где каждому пикселю назначается интенсивность освещенности в зависимости от его положения. Также можно указывать высоту (-alt) солнца над горизонтом  $0-90^\circ$  и угол (-az) освещения солнца  $0-360^\circ$ .

При отвесном освещении, распределение света и тени зависит от крутизны склонов, то есть чем больше угол наклона поверхности к горизонту, тем меньше угол падения луча света и, соответственно, ее освещенность. При угле наклона  $90^\circ$  поверхности полностью закрыты тенью и здесь действует принцип: «чем круче, тем темнее».

Наибольшая пластичность рельефа при северо-западном освещении ( $315^\circ$ ) достига-

ется при высоте источника света около  $30^\circ$ . Однако это не означает, что луч света должен иметь строго установленное направление. Оно может колебаться (иногда даже в диапазоне  $70\text{--}80^\circ$ ) в зависимости от расположения изображаемых форм и их отношения друг к другу, оставаясь в пределах северо-западного направления и не нарушая его закономерного действия на светотень.

Комбинированное освещение основано на применении нескольких направлений света. Оно сочетает в себе принципы отвесного и косоугольного освещения, а также воздушной перспективы. Суть последнего состоит в изменении цвета, понижении четкости и контрастности предмета с его удалением от глаза наблюдателя под влиянием воздушной дымки (мутные среды) [Востокова и др., 2002, с. 169–186].

### Результаты и обсуждение

Для адекватной оценки геоинформационной технологии Хилшейд в предиктивном поиске археологических объектов были построены высокоточные цифровые модели рельефа и модели светотеневой отмывки территорий «Ахматского городища» и курганной группы «Станция Красавка» по данным лазерного сканирования с начальной дискретностью 1 м (рис. 2).

Для анализа моделей использовались различные параметры дискретности шага сетки от 1 до 20 м: азимут освещения  $315^\circ$ , вертикальный угол источника освещения  $15^\circ$  над поверхностью и вертикальный масштабный коэффициент  $Z=3$ , которые были установлены экспериментально, с учетом традиционной видимости и параметров отмывки (рис. 3).

*«Ахматское городище».* Анализируя полученные данные по территории, можно сделать вывод:

- при дискретности ЦМР 10 м и крупнее проявляется расположение линейных защитных сооружений, но их идентификация затруднена;

- при дискретности ЦМР 6–7 м начинается считываться конфигурация защитных валов и рвов, проявляются выделение более низкого и высокого защитного вала;

- при дискретности ЦМР 4 м и крупнее начинают считываться выположенные участки и понижения ранее выполненных археологических раскопок, для валов и рвов стано-

вится возможным определение отдельных морфометрических характеристик;

- при дискретности ЦМР 2 м и крупнее в системе валов и рвов начинается проявляться читаемое понижение, которое может быть заплывшим магистральным проходом широтного направления [Кузнецова, Лопатин, 2015];

- при дискретности ЦМР 1 м проявляются следы параллельных борозд разной глубины, которые, скорее всего, связаны с высадкой противоэрозионных лесопосадок в послевоенный период, а также оконтуриваются приблизительные границы мест засыпки грунта после окончания археологических раскопок (рис. 2).

С западной стороны территория городища ограничена системой фортификации, состоящей из двух земляных валов и двух рвов, расположенных западнее каждого вала. Протяженность городища (по визуальному осмотру) с ЮЗЗ от края внешнего рва до мысового окончания плато на СВВ – 200 м. Максимальная ширина с севера на юг в центральной части памятника – 95 м. Длина внешнего рва – 80 м, максимальная ширина в средней части – 12 м. Длина внешнего вала – 90 м, ширина – 15 м, высота над дневной поверхностью – 2,7 м. Длина внутреннего рва – 83 м, ширина в средней части – 8 м. Длина внутреннего вала – 87 м, ширина в средней части – 18 м, высота над дневной поверхностью – 2,3 м. Расстояние между валами – 30 м.

Выявленные путем лазерного сканирования на «Ахматском городище» фортификационные сооружения уже зафиксированы в результате визуальных осмотров памятников, проведенных в предыдущие годы. При этом по данным обновленной съемки были получены значения, отличающиеся от ранее опубликованных.

Внешний ров: длина 69,6 м, ширина от 10,14 до 13,36 м, глубина от 0,11 до 0,40 м; внутренний ров: длина 74,0 м, ширина 8,1 м, глубина от 0,21 до 1,34 м; внешний вал: длина 71,6 м, ширина от 8,2 до 28,2 м, высота 0,56 м; внутренний вал: длина 79,5 м, ширина 13,7 м, высота 1,61 м.

*Курганная группа «Станция Красавка».* Анализируя полученные данные по территории можно сделать вывод:

- при дискретности ЦМР 10 м и крупнее проявляется расположение крупных курганов (рис. 3);

– при дискретности ЦМР 6–7 м и крупнее проявляется расположение;

– при дискретности ЦМР 2 м считается точная граница и конфигурация, и возможен расчет отдельных морфометрических параметров.

Результаты сплошного сканирования территории курганной группы «Станция Красавка» хорошо согласуются с инструментальным планом расположения курганных насыпей, составленным в результате визуального осмотра памятника и проведения глазомерной съемки. При этом получены более точные данные о местоположении насыпей и морфометрических характеристиках археологических объектов (табл. 1). Параметры насыпей, полученные при анализе ЦМР, отличаются от результатов глазомерной съемки, что неудивительно, так как многолетняя распашка могильника привела к «размыванию» контуров насыпей и сделала их трудноуловимыми для глаза. При дальнейшей работе с полученной новой высокоточной ЦМР возможно полуавтоматическое выявление новых археологических объектов и анализ расположения насыпей, не читающихся из-за растительности и прочих причин при визуальном осмотре рельефа.

В настоящий момент предиктивный этап спутниковой археологии для археологических объектов в общем может служить хорошей основой для полевого этапа и для визуального дешифрирования косвенных (индикационных) признаков по снимкам высокого и среднего разрешения.

Сам тип памятников, характеризующийся слабым антропогенным воздействием на окружающий ландшафт и отсутствием остатков крупных строительных объектов, не предполагает их фиксацию путем анализа спутниковых снимков. Поэтому на этапе предполетных работ рекомендовано применять технологию лазерного сканирования археологических объектов не только мелких и средних размеров, но также и более крупных. При этом в зарубежной и российской практике можно встретить все больше примеров совмещения методов дешифрирования ДДЗ, фотограмметрии лазерного сканирования.

### Заключение

Как показали полевые исследования, лазерное сканирование территории позволяет суще-

ственно облегчить выявление перспективных мест археологических раскопок. Полученные по данным наземного лазерного сканирования ЦМР, а также применение технологии Хилшейд для оценки моделей рельефа на оба участка исследования, упрощенные с дискретностью до 6 м позволяют идентифицировать отдельные археологические объекты, а для объектов до 3 м и менее – проводить оценку отдельных морфометрических параметров. Бесспорным преимуществом данной технологии является возможность установления очень точных морфометрических параметров рельефа, получение которых в ходе визуального осмотра затруднено из-за имеющейся растительности или иных факторов.

Проведенное сплошное сканирование курганной группы «Станция Красавка» и дальнейшая работа с ЦМР показали, что предложенная детализация позволяет выявить дополнительные курганные насыпи, не зафиксированные или вовсе незаметные в ходе визуального осмотра.

В качестве недостатков применения сканеров можно отметить их дороговизну и зависимость от густоты растительного покрова. На территории участка «Ахматского городища» алгоритмы не всегда проявляют себя корректно, что объясняется наличием низкой плотной кустарниковой растительности.

Основным достоинством использованной технологии Хилшейд можно считать тот факт, что в ходе детального анализа, можно выявить потенциальные археологические объекты. Данный метод был апробирован в 2023 г. при полевом выезде, в ходе которого потенциальные курганы, выявленные с помощью данной технологии, были подтверждены (рис. 3).

В результате, можно утверждать, что совмещение полевого и картографического методов дает возможность работать в таком цикле «карты – исходная информация – результат исследования – карты», который позволяет создавать производные цифровые модели по мере накопления баз данных.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки № FSRR-2023-0006.

The study was conducted with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Grant FSRR-2023-0006).

**ПРИЛОЖЕНИЯ****Таблица 1. Морфометрические характеристики насыпей курганного могильника поселения «Станция Красавка», м****Table 1. Morphometric features of surfaces of Stantsiya Krasavka kurgan cemetery, m**

№ кургана	Диаметр			Высота	
	Глазомерная съёмка	Лазерное сканирование		Глазомерная съёмка	Лазерное сканирование
		Размер по длинной стороне	Размер по короткой стороне		
1	24	40,2	36,0	0,20	0,40
2	32	38	25,6	0,30	0,33
3	17	33,3	23,5	0,10	0,22
4	21	28,2	15,4	0,10	0,30
5	28	44,7	26,8	0,20	0,64
6	27	29,97	26,7	0,15	0,35

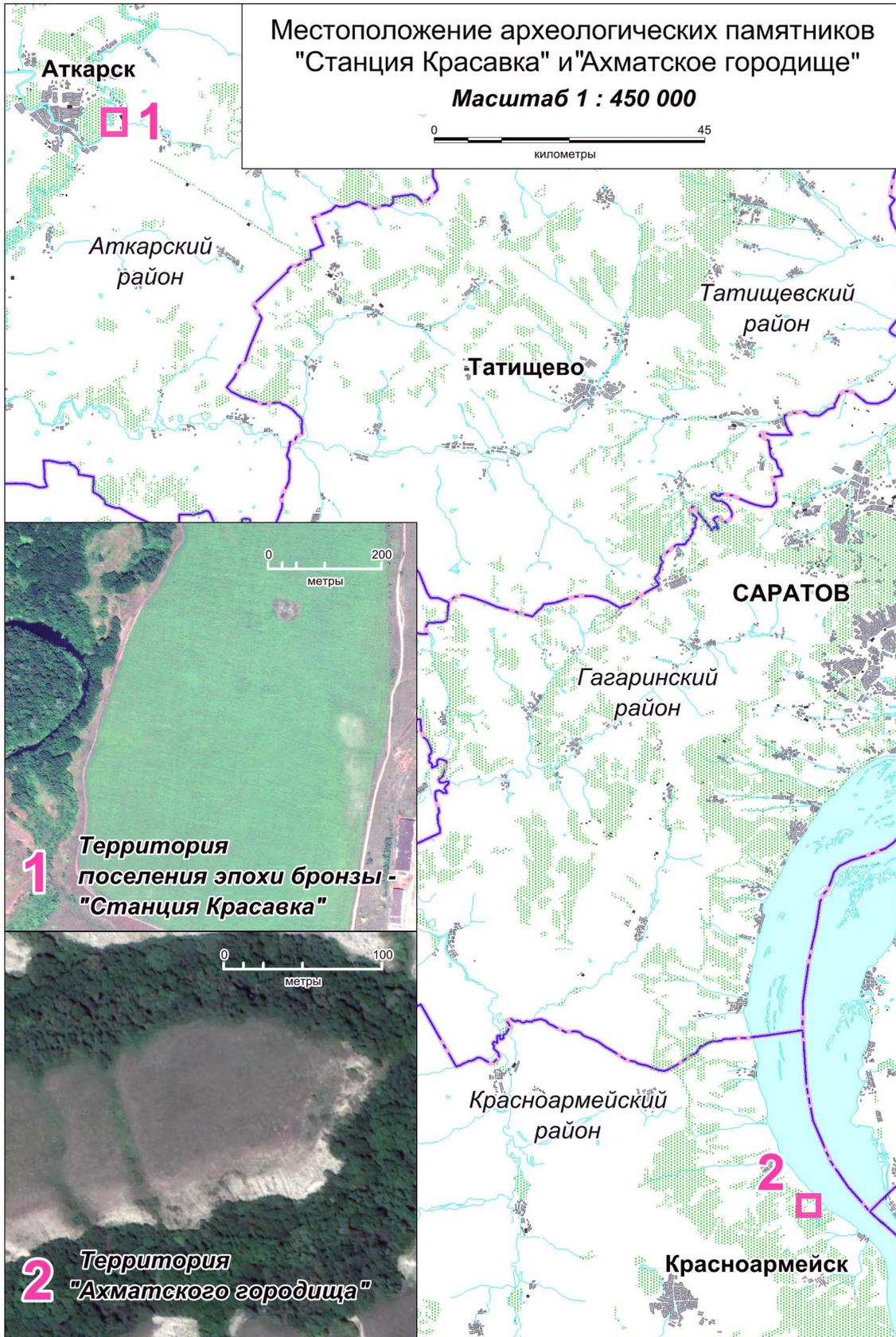


Рис. 1. Карта территории «Ахматского городища» и курганной группы «Станция Красавка»

Fig. 1. Map of Akhmatskoe Gorodische and kurgan group of Stantsiya Krasavka

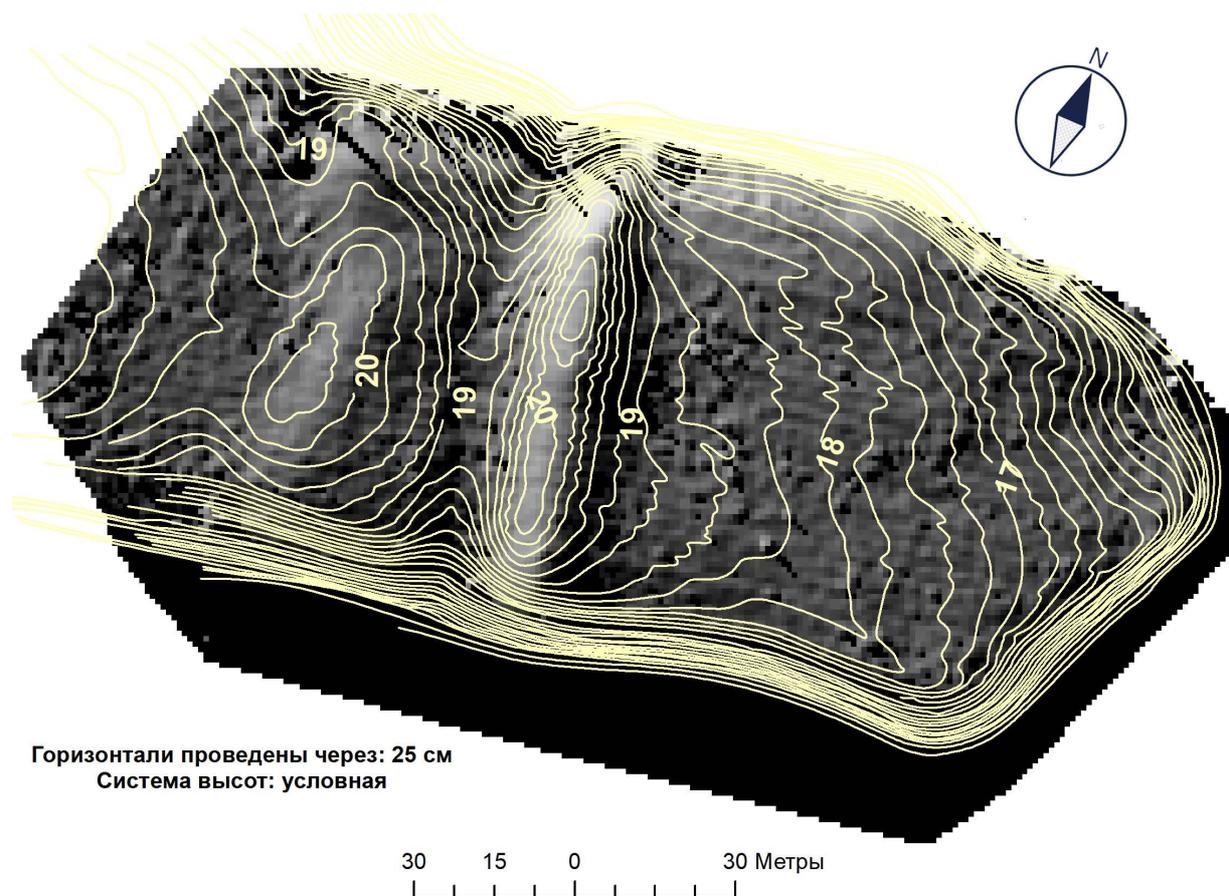
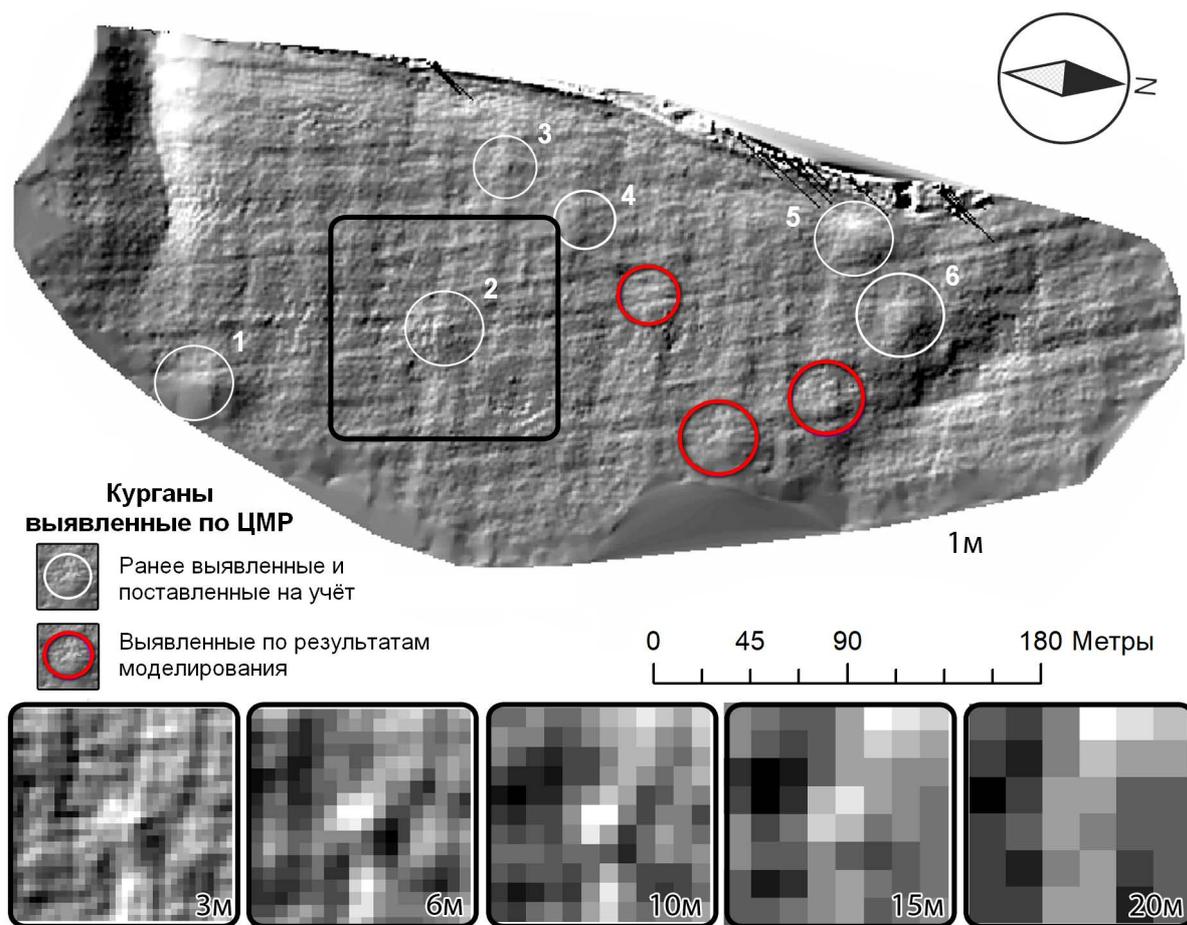


Рис. 2. Светотеневая отмывка рельефа на участок «Ахматского городища» по технологии Хилшейд с отображением смоделированных по ЦМР горизонталей

Fig. 2. Light and hillshading of Akhmatskoe Gorodische using the Hillshade technology with visualization of horizontal lines according to DTM



**Дискретность цифровой модели рельефа**

Рис. 3. Светотеневая отмывка рельефа на территорию курганной группы «Станция Красавка» по технологии Хилшейд (шаг ЦМР 1–20 м)

Fig. 3. Light and shade hillshading of kurgan group Stantsiya Krasavka using Hillshade technology (DTM step 1–20 m)

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Антонов М. А., Горячев А. А., Хисматуллин Р. К., 2022. Тополандшафтные исследования курганов раннего железного века западной части Жетысу Алатау // Археология Казахстана. № 3. С. 126–150. DOI: <http://doi.org/10.52967/akz2022.3.17.126.150>
- Афанасьев Г. Е., Савенко С. Н., Коробов Д. С., 2004. Древности Кисловодской котловины. М. : Науч. мир. 240 с.
- Брынь М. Я., Богомолова Н. Н., Журавлев И. Н., Никитчин А. А., 2020. Возможности применения лазерного сканирования на стадии изысканий при реконструкции искусственных сооружений // Бюллетень результатов научных исследований. Вып. 1. СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. С. 43–53.
- Вальков Д. В., Большакова Н. В., Кошутин Р. А., Пинигин Г. В., 2022. Верификация памятников археологии открытых экспедициями под руководством В.В. Гольмстен (на примере «курганника у села Домашка») // Археология евразийских степей. № 2. С. 418–435. DOI: <http://doi.org/10.24852/2587-6112.2022.2.418.435>
- Востокова А. В., Кошель С. М., Ушакова Л. А., 2002. Оформление карт. Компьютерный дизайн : учебник. М. : Аспект Пресс. 288 с.
- Горькавый И. Н., 2011. Разработка и исследование методики обработки и классификации трехмерных данных лазерного сканирования : дис. ... канд. техн. наук. М. 133 с.
- Данилов В. А., Федоров А. В., Морозова В. А., 2019. Комплексное применение технологии ГИС и наземного лазерного сканирования для исследования оползневых тел (на примере оползня в Октябрьском ущелье города Саратова) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. Т. 19, вып. 3. С. 160–167. DOI: <http://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-160-167>
- Калашников М. Г., Воробьева Е. Е., Сайфутдинова Г. М., 2023. Анализ пространственного распределения археологических памятников Марийского Поволжья на основе ГИС-технологий // Археология Евразийских степей. Вып. 1. С. 78–85. DOI: <http://doi.org/10.24852/2587-6112.2023.1.78.85>
- Комиссаров А. В., 2016. Теория и технология лазерного сканирования для пространственного моделирования территорий : дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск. 278 с.
- Коробов Д. С., 2011. Основы геоинформатики в археологии : учеб. пособие. М. : Изд-во Моск. ун-та. 224 с.
- Кузнецова Е. В., Лопатин В. А., 2015. Исследования на Ахмате // Археология Восточно-Европейской степи. Вып. 11. Саратов : Изд-во СГУ. С. 160–179.
- Лопатин В. А., 2003. Культурно-хронологические комплексы поселения в урочище «Мартышкино» (материалы эпохи поздней бронзы) // Археологическое наследие Саратовского края. Охрана и исследования в 2001 г. Вып. 5. Саратов : Науч. кн. С. 10–32.
- Лопатин В. А., 2009. Исследования поселения Нижняя Красавка в 2008 году // Археологическое наследие Саратовского края. Вып. 9. Саратов : Науч. кн. С. 38–51.
- Лопатин В. А., Тарабрин С. Ю., 2020. Новый памятник финальной бронзы с материалами сусканского типа на севере Волго-Донского междуречья // Волго-Уральский регион от древности до средневековья : материалы VI Нижневолж. Междунар. археол. науч. конф. Волгоград : Изд-во ВолГУ. С. 76–81.
- Медведев В. И., Райкова Л. С., 2017. Программы для обработки данных лазерного сканирования местности // САПР и ГИС автомобильных дорог. № 2 (9). С. 10–31. DOI: <http://doi.org/10.17273/CADGIS.2017.2.2>
- Миронов В. Г., 1989. Очерк истории исследований городицких поселений в Саратовском Поволжье в 1918–1977 годы (Материалы к археологической карте Нижнего Поволжья) // Археология Восточно-Европейской степи. Вып. 1. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та. С. 106–122.
- Осенняя А. В., Корчагина Е. В., 2013. Технология оптимизации цифровой модели рельефа, полученной по данным воздушного лазерного сканирования // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). № 4. С. 85–86.
- Помогаев О. Н., 2003. Применение GPS аппаратуры Trimble для археологических исследований // Геопрофи. № 1. М. : ИП Романчикова М.С. С. 31–34.
- Рыков П. С., 1931. Отчет об археологических работах 1930 года, произведенных в Нижне-Волжском крае проф. П.С. Рыковым // Архив ЛОИА. Д. 795.

- Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624670 Российская Федерация. Цифровая модель рельефа территории археологического памятника «Ахматское городище», расположенного в Красноармейском муниципальном районе Саратовской области : № 2023624418 : заявл. 03.12.2023 : опубл. 18.12.2023 / 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». 4 с.
- 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». 4 с.
- Середович В. А., Иванов А. В., 2013. Исследования точности измерений, выполняемых наземным лазерным сканером // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. Т. 1, № 3. С. 134–143.
- Фаворская М. Н., 2009. Распознавание динамических образов на основе предсказывающих фильтров // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. Т. 22, № 1. С. 64–68.
- Чандра А. М., Гош С. К., 2008. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М. : Техносфера. 312 с.
- Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И., Перминова Е. С., 2020. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения. Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та. 191 с.
- Agapiou A., Alexakis D. D., Sarris A., Hadjimitsis D. G., 2013. Orthogonal Equations of Multi-Spectral Satellite Imagery for the Identification of Un-Excavated Archaeological Sites // *Remote Sens.* № 5. P. 6560–6586. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs5126560>
- Balla A., Pavlogeorgatos G., Tsiafakis D., Pavlidis G., 2013. Modelling Archaeological and Geospatial Information for Burial Site Prediction, Identification and Management // *International Journal of Heritage in the Digital Era*. № 2. P. 585–609. DOI: <http://doi.org/10.1260/2047-4970.2.4.585>
- Chandio I. A., Matori A. N., Yusof K. W., Talpur M. A., Aminu M., 2014. GIS-Based Land Suitability Analysis of Sustainable Hillside Development // *Procedia Engineering*. Vol. 77. P. 87–94.
- Ebert J. I., Kohler T. A., 1988. The Theoretical Basis of Archaeological Predictive Modeling and a Consideration of Appropriate Data-Collection Methods // *In Quantifying the Present and Predicting the Past : Theory, Method, and Application of Archaeological Predictive Modeling*. Denver : US Department of the Interior, Bureau of Land Management Service Center. P. 97–171.
- Green E. L., 1973. Location Analysis of Prehistoric Maya Sites in Northern British Honduras // *American Antiquity*. Vol. 38. P. 279–293.
- Hamilton S., 2000. Archaeological Predictive Modelling in the Boreal Forest : No Easy Answers // *Canadian Journal of Archaeology*. Vol. 24. P. 41–76.
- Kohler T. A., Parker S. C., 1986. Predictive Models for Archaeological Resource Location // *Advances in Archaeological Method and Theory*. Vol. 9. N. Y. : Academic Press. P. 397–452.
- Kokalj Z., Mast J., 2021. Space Lidar for Archaeology? Reanalyzing GEDI Data for Detection of Ancient Maya Buildings // *Journal of Archaeological Science : Reports*. Vol. 36. P. 1–15. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102811>
- Lasaponara R., Masini N., 2011. Satellite Remote Sensing in Archaeology : Past, Present and Future // *Journal of Archaeological Science*. № 38. P. 1995–2002.
- Madry S. L. H., Crumley C. L., 1990. An Application of Remote Sensing and GIS in Regional Archaeological Settlement Pattern Analysis: The Arroux River Valley, Burgundy, France // *Interpreting Space: GIS and Archaeology*. L. : Taylor&Francis. P. 364–381.
- Nsanziyera A. F., Rhinane H., Oujaa A., Mubea K., 2018. GIS and Remote-Sensing Application in Archaeological Site Mapping in the Awsard Area (Morocco) // *Geosciences*. № 8. P. 1–21. DOI: <http://doi.org/10.3390/geosciences8060207>
- Parcak S. H., 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. L. : Routledge. 320 p.

- Petrie L., Johnson I., Cullen B., Kwamme K., 1995. GIS in Archaeology : An Annotated Bibliography. Sydney : Archaeological Computing Laboratory, University of Sydney. 105 p.
- Saaty T. L., Vargas L. G., 1980. Models, Methods, Concepts and Applications of the AHP. International Series in Operations. Research and Management Science. Vol. 175. Pittsburg : Stanford University. 345 p.
- Van Leusen P. M., 2002. Pattern to Process : Methodological Investigations into the Formation and Interpretation of Spatial Patterns in Archaeological Landscapes : Ph. D. Thesis. Groningen. 25 p.
- Verhagen P., Nuninger L., Tourneux F.-P., Bertoncello F., Jeneson K., 2012. Introducing the Human Factor in Predictive Modelling // Archaeology in the Digital Era : Proceedings of CAA Conference, 40<sup>th</sup> Annual Meeting. Southampton : U.K. Pallas Publications. P. 379–388.
- Verhagen P., Whitley T. G., 2012. Integrating Archaeological Theory and Predictive Modeling // Journal of Archaeological Method and Theory. Vol. 19. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10816-011-9102-7>
- Wansleben M., Verhart L. B. M., 1997. Geographical Information Systems. Methodical Progress and Theoretical Decline // Archaeological Dialogues. Vol. 4. P. 53–70.
- Warren R. E., Asch D. L., 2000. A Predictive Model of Archaeological Site Location in the Eastern Prairie Peninsula // Practical Applications of GIS for Archaeologists. L. : CRC Press. 176 p.
- Yang L., Pei A., Guo N., Liang B., 2012. Spatial Modality of Prehistoric Settlement Sites in Luoyang Area // Scientia Geographical Sinica. Vol. 32. P. 993–999.

#### REFERENCES

- Antonov M.A., Goryachev A.A., Khismatullin R.K., 2022. Topolandshaftnye issledovaniya kurganov rannego zheleznoogo veka zapadnoy chasti Zhetysu Alatau [Topolandscape Research of Early Iron Age Kurgans in the Western Part of Zhetysu Alatau]. *Arkheologiya Kazakhstana* [Archaeology of Kazakhstan], no. 3, pp. 126-150. DOI: <http://doi.org/10.52967/akz2022.3.17.126.150>
- Afanasiev G.E., Savenko S.N., Korobov D.S., 2004. *Drevnosti Kislovodskoy kotloviny* [Antiquities of the Kislovodsk Basin]. Moscow, Nauch. mir Publ. 240 p.
- Bryn M.Ya., Bogomolova N.N., Zhuravlev I.N., Nikitchin A.A., 2020. Vozможности primeneniya lazernogo skanirovaniya na stadii izyskaniy pri rekonstruktsii iskusstvennykh sooruzheniy [Feasibility of Laser Scanning at the Survey Stage in the Reconstruction of Engineering Structures]. *Bulleten' rezultatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of Scientific Research Results], iss. 1. Saint Petersburg, Peterburg. gos. un-t putej soobshheniya Imperatora Aleksandra I, pp. 43-53.
- Valkov D.V., Bolshakova N.V., Koshutin R.A., Pinigin G.V., 2022. Verifikatsiya pam'atnikov arkheologii otkrytykh ekspeditsiyami pod rukovodstvom V.V. Goltmsten (na primere «kurgannika u sela Domashka») [Verification of Archeological Sites Discovered by Expeditions Under the Supervision of V.V. Goltmsten (On the Example of “Kurgannik (Burial Mound) Near Domashka Village”). *Arkheologiya evraziyskikh stepey* [Archaeology of the Eurasian Steppes], no. 2, pp. 418-435. DOI: <http://doi.org/10.24852/2587-6112.2022.2.418.435>
- Vostokova A.V., Koshel S.M., Ushakova L.A., 2002. *Oformlenie kart. Komp'uternyy dizayn: uchebnik* [Map Design. Computer Design: Textbook]. Moscow, Aspect Press Publ. 288 p.
- Gorkavyi I.N., 2011. *Razrabotka i issledovanie metodiki obrabotki i klassifikatsii trekhmernykh dannykh lazernogo skanirovaniya: dis. ... kand. techn. nauk* [Development and Research of a Technique for Processing and Classifying Three-Dimensional Laser Scanning Data. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow. 133 p.
- Danilov V.A., Fedorov A.V., Morozova V.A., 2019. Kompleksnoe primeneniye tekhnologii GIS i nazemnogo lazernogo skanirovaniya dlya issledovaniya opolznevykh tel (na primere opolzn'a v Oktiabrskom ushchele goroda Saratova) [Integrated Application of GIS Technology and Terrestrial Laser Scanning for the Investigation of Landslide Bodies (On the Example of a Landslide in the Oktiabrsky Gorge of the City of Saratov)]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle* [Izvestiya of Saratov University. New Series. Series Earth Sciences], vol. 19, iss. 3, pp. 160-167. DOI: <http://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-3-160-167>
- Kalashnikov M.G., Vorobyeva E.E., Sayfutdinova G.M., 2023. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya arkheologicheskikh pamyatnykh Mariyskogo Povolzhia na osnove GIS-tekhnologii [Spatial Analysis of Bronze Age Settlements of the Mari Volga Region]. *Arkheologiya Evraziyskikh stepey* [Archaeology of Eurasian Steppes], iss. 1, pp. 78-85. DOI: <http://doi.org/10.24852/2587-6112.2023.1.78.85>

- Komissarov A.V., 2016. *Teoriya i tekhnologiya lazernogo skanirovaniya dlya prostranstvennogo modelirovaniya territorii: dis. ... kand. techn. nauk* [Theory and Technology of Laser Scanning for Spatial Modeling of Territories. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk. 278 p.
- Korobov D.C., 2011. *Osnovy geoinformatiki v archeologii: ucheb. posobiye* [Fundamentals of Geoinformatics in Archaeology: Textbook]. Moscow, MSU. 224 p.
- Kuznetsova E.V., Lopatin V.A., 2015. Issledovaniya na Akhmate [Research at Akhmat]. *Arkheologiya Vostochno-Evropeiskoy stepi* [Archaeology of the East European Steppe], iss. 11. Saratov, SSU, pp. 160-179.
- Lopatin V.A., 2003. Kulturno-khronologicheskie komplekсы poseleniya v urochishche «Martynshkino» (materialy epohi pozdney bronzy) [Cultural-Chronological Complexes of the Settlement in the Martynshkino Tract (Late Bronze Age Materials)]. *Arkheologicheskoe nasledie Saratovskogo kraya. Okhrana i issledovaniya v 2001 g.* [Archaeological Heritage of Saratov Region. Conservation and Research in 2001], iss. 5. Saratov, Scientific Book, pp. 10-32.
- Lopatin V.A., 2009. Issledovaniya poseleniya Nizhn'aya Krasavka v 2008 godu [Research on the Nizhn'aya Krasavka Settlement in 2008]. *Arkheologicheskoe nasledie Saratovskogo kraia* [Archaeological Heritage of Saratov Region], iss. 9. Saratov, Scientific Book, pp. 38-51.
- Lopatin V.A., Tarabrin S.Yu., 2020. Novyy pam'atnik finalnoy bronzy s materialami suskanskogo tipa na severe Volgo-Don'skogo mezhdurechya [New Monument of Final Bronze with Suskan Type Materials in the North of the Volga-Don Interfluve]. *Volgo-Uralskiy region ot drevnosti do srednevekoviya: materialy VI Nizhnevolzh. Mezhdunar. arkheolog. nauch. konf.* [Volga-Ural Region from Antiquity to the Middle Ages. Materials of the VI Lower Volga International Archaeological Conference]. Volgograd, VolSU, pp. 76-81.
- Medvedev V.I., Raykova L.S., 2017. Programmy dlya obrabotki dannykh lazernogo skanirovaniya mestnosti [Programs for Processing Terrain Laser Scanning Data]. *SAPR i GIS avtomobilnykh dorog* [CAD and GIS for Highways], vol. 2 (9), pp. 10-31. DOI: <http://doi.org/10.17273/CADGIS.2017.2.2>
- Mironov V.G., 1989. Ocherk istorii issledovaniy gorodetskikh poseleniy v Saratovskom Povolzhe v 1918–1977 gody (Materialy k arkheologicheskoy karte Nizhnego Povolzhia) [Essay on the History of Research on Gorodets Settlements in the Saratov Volga Region in 1918–1977 (Materials for the Archaeological Map of the Lower Volga Region)]. *Arkheologiya Vostochno-Evropeiskoy stepi* [Archaeology of the East European Steppe]. Saratov, SSU, pp. 106-122.
- Osenyaya A.V., Korchagina E.V., 2013. Tekhnologiya optimizatsii tsifrovoy modeli relyefa, poluchennoy po dannym vozdušnogo lazernogo skanirovaniya [Optimization Technology for Digital Terrain Models Obtained from Airborne Laser Scanning Data]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskii vestnik)* [Industry-Specific Scientific and Applied Research : Information Technology], no. 4, pp. 85-86.
- Pomogaev O.N., 2003. Primenenie GPS apparatury Trimble dl'a arkheologicheskikh issledovaniy [Application of Trimble GPS Equipment for Archaeological Research]. *Geoprofi*, no. 1. Moscow, IP Romanchikova M.S. Publ, pp. 31-34.
- Rykov P.S., 1931. Otchet ob arkheologicheskikh rabotakh 1930 goda, proizvedennykh v Nizhne-Volzhskom krae prof. P. S. Rykovym [Report on Archaeological Works of 1930 Carried Out in the Lower Volga Region by Prof. P.S. Rykov]. *Arhiv LOIA* [Archive of LOIA], d. 795.
- Monahov S.Yu., Rastegaeva M.N., Lopatin V.A., Danilov V.A., Fedorov A.V., Morozova V.A. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2023624670 Rossiyskaya Federatsiya. Tsifrovaya model reliefa territorii arkheologicheskogo pamyatnika «Akhmat'skoe gorodishche», raspolozhennogo v Krasnoarmeyskom munitsipalnom rayone Saratovskoy oblasti. № 2023624418: zayavl. 03.12.2023: opubl. 18.12.2023* [Certificate of State Registration of the Database № 2023624670 RF. A Digital Terrain Model of the Archaeological Monument «Akhmat Settlement» Located in the Krasnoarmeysky Municipal District of Saratov Region: № 2023624418: declared 03.12.2023: published 18.12.2023]. The Applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SSU Named After N.G. Chernyshevsky». 4 p.
- Monahov S.Yu., Rastegaeva M.N., Lopatin V.A., Danilov V.A., Fedorov A.V., Shlapak P.A. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2023624926 Rossiyskaya Federatsiya. Tsifrovaya model reliefa territorii arkheologicheskogo pamyatnika «Nizhnyaya Krasavka-2», raspolozhennogo v Atkarskom munitsipalnom rayone Saratovskoy oblasti. № 2023624423: zayavl. 03.12.2023: opubl. 22.12.2023* [Certificate of State Registration of the Database № 2023624926 RF. A Digital Terrain Model of the Archaeological Monument «Nizhnyaya Krasavka-2» Located in the Atkarsky Municipal District of Saratov Region] : № 2023624423 : declared 03.12.2023 : published 18.12.2023]. The Applicant is the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «SSU Named After N.G. Chernyshevsky». 4 p.

- Seredovich V.A., Ivanov A.V., 2013. Issledovaniya tochnosti izmereniy, vypolniaemykh nazemnym lazernym skanerom [Research on the Accuracy of Measurements Performed by a Terrestrial Laser Scanner]. *Interekspo Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], vol. 1, no. 3, pp. 134-143.
- Favorskaya M.N., 2009. Raspoznavanie dinamicheskikh obrazov na osnove predskazyvayushchih fil'trov [Dynamic Image Recognition Based on Predictive Filters]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University Named After Academician M.F. Reshetnev], vol. 22, no. 1, pp. 64-68
- Chandra A.M., Gosh S.K., 2008. *Distantstionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* [Digital Sensing and Mathematical Information Systems]. Moscow, Technosphaera Publ. 312 p.
- Shikhov A.N., Gerasimov A.P., Ponomarchuk A.I., Perminova E.S., 2020. *Tematicheskoe deshifrirovaniye i interpretatsiya kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo prostranstvennogo razresheniya* [Thematic Interpretation and Analysis of Medium and High Spatial Resolution Satellite Imagery]. Perm, PSU. 191 p.
- Agapiou A., Alexakis D.D., Sarris A., Hadjimitsis D.G., 2013. Orthogonal Equations of Multi-Spectral Satellite Imagery for the Identification of Un-Excavated Archaeological Sites. *Remote Sens*, no. 5, pp. 6560-6586. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs5126560>
- Balla A., Pavlogeorgatos G., Tsiafakis D., Pavlidis G., 2013. Modelling Archaeological and Geospatial Information for Burial Site Prediction, Identification and Management. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, no. 2, pp. 585-609. DOI: <http://doi.org/10.1260/2047-4970.2.4.585>
- Chandio I.A., Matori A.N., Yusof K.W., Talpur M.A., Aminu M., 2014. GIS-Based Land Suitability Analysis of Sustainable Hillside Development. *Procedia Engineering*, vol. 77, pp. 87-94.
- Ebert J.I., Kohler T.A., 1988. The Theoretical Basis of Archaeological Predictive Modeling and a Consideration of Appropriate Data-Collection Methods. In *Quantifying the Present and Predicting the Past: Theory, Method, and Application of Archaeological Predictive Modeling*. Denver, US Department of the Interior, Bureau of Land Management Service Center, pp. 97-171.
- Green E.L., 1973. Location Analysis of Prehistoric Maya Sites in Northern British Honduras. *American Antiquity*, vol. 38, pp. 279-293.
- Hamilton S., 2000. Archaeological Predictive Modelling in the Boreal Forest: No Easy Answers. *Canadian Journal of Archaeology*, vol. 24, pp. 41-76.
- Kohler T.A., Parker S.C., 1986. Predictive Models for Archaeological Resource Location. *Advances in Archaeological Method and Theory*, vol. 9. New York, Academic Press, pp. 397-452.
- Kokalj Z., Mast J., 2021. Space Lidar for Archaeology? Reanalyzing GEDI Data for Detection of Ancient Maya Buildings. *Journal of Archaeological Science: Reports*, vol. 36, pp. 1-15. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.102811>
- Lasaponara R., Masini N., 2011. Satellite Remote Sensing in Archaeology: Past, Present and Future. *Journal of Archaeological Science*, no. 38, pp. 1995-2002.
- Madry S.L.H., Crumley C.L., 1990. An Application of Remote Sensing and GIS in Regional Archaeological Settlement Pattern Analysis: The Arroux River Valley, Burgundy, France. *Interpreting Space: GIS and Archaeology*. London, Taylor & Francis, pp. 364-381.
- Nsanziyera A.F., Rhinane H., Oujaa A., Mubea K., 2018. GIS and Remote-Sensing Application in Archaeological Site Mapping in the Awsard Area (Morocco). *Geosciences*, no. 8, pp. 1-21. DOI: <http://doi.org/10.3390/geosciences8060207>
- Parcak S.H., 2009. *Satellite Remote Sensing for Archaeology*. London, Routledge. 320 p.
- Petrie L., Johnson I., Cullen B., Kwamme K., 1995. *GIS in Archaeology: An Annotated Bibliography*. Sydney, Archaeological Computing Laboratory, University of Sydney. 105 p.
- Saaty T.L., Vargas L.G., 1980. *Models, Methods, Concepts and Applications of the AHP*. International Series in Operations. Research and Management Science, vol. 175. Pittsburg, Stanford University. 345 p.
- Van Leusen P.M., 2002. Pattern to Process: Methodological Investigations into the Formation and Interpretation of Spatial Patterns in Archaeological Landscapes: Ph.D. Thesis. Groningen. 25 p.
- Verhagen P., Nuninger L., Tourneux F.-P., Bertonecello F., Jeneson K., 2012. Introducing the Human Factor in Predictive Modelling. *Archaeology in the Digital Era, Proceedings of CAA Conference, 40<sup>th</sup> Annual Meeting*. Southampton, U.K. Pallas Publications, pp. 379-388.

- Verhagen P., Whitley T.G., 2012. Integrating Archaeological Theory and Predictive Modeling. *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 19. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10816-011-9102-7>
- Wansleeben M., Verhart L.B.M., 1997. Geographical Information Systems. Methodical Progress and Theoretical Decline. *Archaeological Dialogues*, vol. 4, pp. 53-70.
- Warren R.E., Asch D.L., 2000. A Predictive Model of Archaeological Site Location in the Eastern Prairie Peninsula. *Practical Applications of GIS for Archaeologists*. London, CRC Press. 176 p.
- Yang L., Pei A., Guo N., Liang B., 2012. Spatial Modality of Prehistoric Settlement Sites in Luoyang Area. *Scientia Geographica Sinica*, vol. 32, pp. 993-999.

### Information About the Authors

**Vladimir A. Danilov**, Candidate of Sciences (Geography), Associate Professor, Department of Geomorphology and Geoecology, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Astrakhanskaya St, 83, 410012 Saratov, Russian Federation, [kohavi@yandex.ru](mailto:kohavi@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

**Vladimir A. Lopatin**, Candidate of Sciences (History), Associate Professor, Department of Historiography, Regional History and Archaeology, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Astrakhanskaya St, 83, 410012 Saratov, Russian Federation, [srubnik@yandex.ru](mailto:srubnik@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8055-6778>

**Valeriya A. Morozova**, Senior Lecturer, Department of Geomorphology and Geoecology, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Astrakhanskaya St, 83, 410012 Saratov, Russian Federation, [riukarin@gmail.com](mailto:riukarin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

**Alexey V. Fedorov**, Head of the Laboratory of Geoinformatics and Thematic Mapping, Geographical Faculty, Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Astrakhanskaya St, 83, 410012 Saratov, Russian Federation, [alexeivf@gmail.com](mailto:alexeivf@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8999-6398>

### Информация об авторах

**Владимир Анатольевич Данилов**, кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, 410012 г. Саратов, Российская Федерация, [kohavi@yandex.ru](mailto:kohavi@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

**Владимир Анатольевич Лопатин**, кандидат исторических наук, доцент кафедры историографии, региональной истории и археологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, 410012 г. Саратов, Российская Федерация, [srubnik@yandex.ru](mailto:srubnik@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8055-6778>

**Валерия Андреевна Морозова**, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, 410012 г. Саратов, Российская Федерация, [riukarin@gmail.com](mailto:riukarin@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

**Алексей Васильевич Федоров**, заведующий лабораторией геоинформатики и тематического картографирования географического факультета, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, ул. Астраханская, 83, 410012 г. Саратов, Российская Федерация, [alexeivf@gmail.com](mailto:alexeivf@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8999-6398>