



ГЕОГРАФИЯ

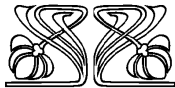
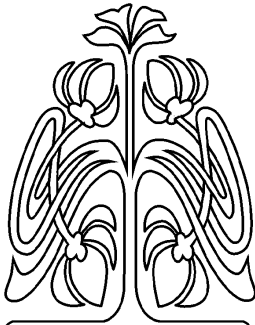
Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 150–158

Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 150–158

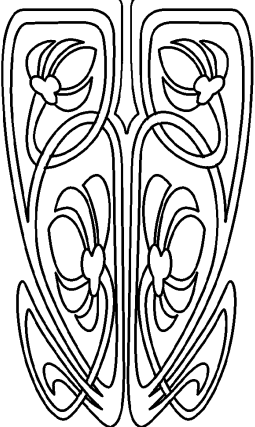
<https://geo.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-3-150-158>, EDN: AQYZTX

Научная статья

УДК [902:528](470.44)



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ



Открытые данные дистанционного зондирования для выявления археологических объектов

В. А. Данилов, В. А. Морозова, А. В. Фёдоров[✉], П. А. Шлапак

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Данилов Владимир Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, kohavi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

Морозова Валерия Андреевна, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, riukarin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>

Фёдоров Алексей Васильевич, заведующий лабораторией геоинформатики и тематического картографирования, alexeivf@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6398>

Шлапак Павел Александрович, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, henryxiv@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-8749>

Аннотация. Археология как наука постоянно развивается и привлекает различные междисциплинарные методы. В настоящее время геоинформационные технологии и аэрокосмическое зондирование наряду с другими дистанционными методами становятся одними из основных инструментов на различных этапах археологических исследований. В связи с этим были рассмотрены возможности использования открытых данных дистанционного зондирования для выявления археологических объектов. Полученные результаты показывают, что данные Sentinel-2, SRTM, ALOS и Copernicus могут быть использованы в качестве дополнительного источника информации для обнаружения и идентификации различных археологических объектов. Стоит отметить, что наиболее качественные результаты на предполевом этапе могут быть получены путем комплексного подхода, заключающегося в комбинировании различных типов данных дистанционного зондирования и способов ГИС моделирования.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, ЦМР, ГИС, предполевой этап, предиктивный поиск, Саратовская область, городище Ахмат, станция Красавка

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (№ FSRR-2023-0006).

Для цитирования: Данилов В. А., Морозова В. А., Фёдоров А. В., Шлапак П. А. Открытые данные дистанционного зондирования для выявления археологических объектов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 150–158. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-3-150-158>, EDN: AQYZTX

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Open remote sensing data for the identification of archaeological sites

V. A. Danilov, V. A. Morozova, A. V. Fedorov[✉], P. A. Shlapak

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Vladimir A. Danilov, kohavi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>

© Данилов В. А., Морозова В. А., Фёдоров А. В., Шлапак П. А., 2024



Valeria A. Morozova, riukarin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5768-1201>
Alexey V. Fedorov, alexeivf@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6398>
Pavel A. Shlapak, henryxiv@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-8749>

Abstract. Archaeology, as a science, is constantly evolving and embracing various interdisciplinary methods. Currently, geoinformation technologies and aerospace remote sensing, along with other remote sensing methods, are becoming some of the primary tools at various stages of archaeological research. This study explores the potential of using open-source remote sensing data to identify archaeological sites. The findings suggest that data from Sentinel-2, SRTM, ALOS, and Copernicus can be used as supplementary information for detecting and identifying different archaeological features. It is worth noting that the best results at the pre-excavation stage can be achieved through a comprehensive approach, which involves combining different types of remote sensing data and GIS modeling techniques.

Keywords: remote sensing data, DEM, GIS, preliminary stage, predictive search, Saratov region, Akhmat settlement, Krasavka Station

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSRR-2023-0006).

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (No. FSRR-2023-0006).

For citation: Danilov V. A., Morozova V. A., Fedorov A. V., Shlapak P. A. Open remote sensing data for the identification of archaeological sites. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 150–158 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-3-150-158>, EDN: AQYZTX

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Постановка проблемы

В последние десятилетия наблюдается заметное возрастание научного интереса к использованию пространственного моделирования в археологии, что обусловлено растущим использованием географических информационных систем (ГИС) в археологических исследованиях совместно с аэро- и космомониторингом. Применяя данные методы, исследователи могут определить наиболее вероятные места нахождения археологических объектов. Кроме того, использование дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и более точных методов обследования может значительно ускорить процесс поиска новых и дальнейшего изучения уже известных памятников археологии, поскольку вместо того чтобы проводить обширные поисковые и затратные полевые изыскания, исследователи могут первоначально сконцентрироваться на наиболее вероятных местах их расположения, выявленных и локализованных при моделировании.

Дистанционное зондирование Земли – изучение нашей планеты с помощью воздушных и космических летательных аппаратов, на которых установлены различные сенсоры, позволяющие получать информацию о характере поверхности Земли, состоянии ее оболочек и геофизических полях [1]. К данным дистанционного зондирования (ДДЗ) относят аэрокосмические данные, включающие в себя как снимки низкого, среднего, высокого и сверхвысокого разрешения, так и цифровые модели рельефа и местности.

Одним из примеров успешного применения космических снимков является исследование качественных признаков средневековых городищ, где выявляются основные этапы работы в археологии совместно с ДДЗ [2]:

- 1) поиск, точная фиксация и мониторинг состояния памятников археологии в быстроизменяющемся современном ландшафте;

- 2) понимание процессов формирования ландшафта;
- 3) выявление и интерпретация экономических, экологических и социальных факторов, на основании которых можно сделать долгосрочный прогноз состояния памятников и расчет моделей землепользования;
- 4) установление взаимосвязи между окружающей средой и человеком.

Кроме того, анализ ДДЗ вместе с геофизическими данными является неотъемлемой частью неразрушающих методов исследований, используемых в изучении памятников археологии и направленных на выявление новых сведений, минимизируя урон, наносимый облику памятников.

Ярким примером открытых и доступных источников данных дистанционного зондирования служат спутниковые снимки космических миссий: Landsat, Sentinel, WorldView, QuickBird, GeoEye, Maxar, распространяемые на порталных и картографических сервисах NASA, ESA, Google и других организаций [3].

Однако стоит учитывать тот факт, что преимущественно все открытые ДДЗ имеют низкое или среднее пространственное разрешение, что является неоспоримым минусом при работе с широким спектром задач. В связи с этим целью данной статьи является анализ эффективности использования открытых данных дистанционного зондирования для применения их в археологических исследованиях на примере открытых глобальных цифровых моделей местности и спутниковых снимков.

Космические снимки

Современные методы анализа данных космоснимков включают различные аналитические подходы, такие как фильтрация и обработка изображений; мульти- и гиперспектральный анализ; лидарное зондирование и др. Эти методы



могут быть использованы для выявления и анализа археологических объектов, реконструкции археологической обстановки и понимания взаимодействия древних культур с окружающей средой.

С помощью космических снимков можно выявить некоторые признаки и показатели, указывающие на расположение потенциальных археологических объектов и первоочередных мест для проведения раскопок. Перечислим некоторые из них.

1. *Различия в растительном покрове.* На некоторых археологических объектах заметны различия в структуре растительного покрова, независимо от их состояния или возраста. Например, на снимках иногда прослеживается не характерная для исследуемой территории мозаика растительного покрова, в которой можно обнаружить геометрические круглые или прямоугольные формы и даже «сложные узоры», возможно указывающие на следы прошлой деятельности человека или скрытые подземные структуры.

Для более чёткого проявления «скрытых» структур проводится классификация растительного покрова с применением различных вегетационных индексов. Наиболее распространёнными являются нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и (или) нормализованный разностный индекс влажности NDMI (Normalized Difference Moisture Index), которые применяются для определения характера растительности и уровня содержания влаги.

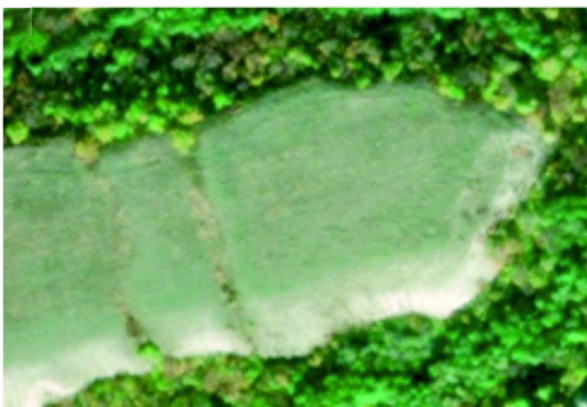
2. *Геоморфологические особенности территории,* которые могут быть связаны с археологическими объектами. Например, старые русла рек, выложенные участки местности, пересохшие озера или прочие не характерные для современной территории морфологические объекты могут являться косвенными признаками для поиска исчезнувших или скрытых археологических объектов.

3. *Аномалии рельефа,* такие как небольшие выпуклости, ямы или неровности, которые могут быть связаны с археологическими структурами. Эти аномалии могут быть связаны с проведением в прошлом различных земляных работ, например по возведению оборонительных сооружений или строительству. Для выявления таких аномалий одних мультиспектральных снимков уже недостаточно, необходимо использовать сочетание различных спектральных каналов и данных цифровых моделей рельефа (ЦМР).

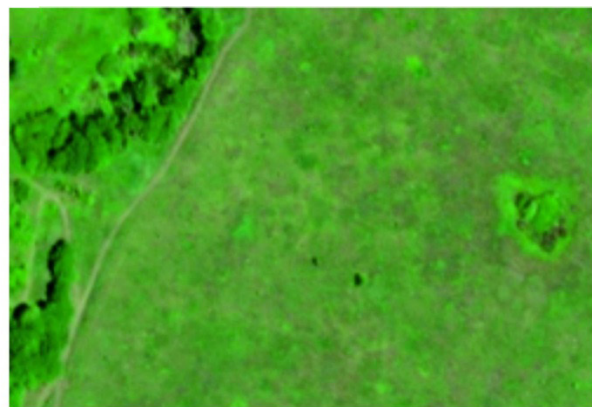
4. *Рисунок структуры землепользования.* Выявление пустующих участков территории, скрытых построек или изменения в характере ориентации «разметки» сельскохозяйственных и садовых угодий, а также наличие старых дорог, насыпей, котлованов и террасирования при отсутствии следов современного использования территории могут указывать на наличие археологических объектов.

Визуальное дешифрирование археологических объектов по снимкам показывает, что благодаря биоиндикации (зависимости типа и характера растительности от микроформ рельефа), а также использованию теневой отмывки часто достаточно легко считывается расположение и конфигурация защитных сооружений (валов и рвов). Однако по снимкам, выполненным в естественных цветах, локальные повышения (курганы) и понижения (следы прошлых раскопок) из-за монотонного характера растительности идентифицировать крайне сложно (рис. 1).

Несмотря на многие трудности и сложности, методы дешифрирования археологических объектов по ДДЗ получили широкое распространение в России. Но, как отмечается в работах многих исследователей, этот метод имеет недостатки, такие как высокая трудозатратность, субъективность оценок при визуальном дешифрировании и ограниченность изучения археологических объектов, скрытых под рельефом,



а



б

Рис. 1. Космические снимки высокого разрешения QuickBird участков городища Ахмат (а) и станции Красавка (б) (цвет онлайн)



покрытых однородной растительностью или следами современной человеческой деятельности.

Широкое распространение получил анализ разновременных снимков, который позволяет проследить динамику изучаемых явлений – форм рельефа, растительного покрова, тальвежной сети и водных объектов, что представляется более репрезентативным и позволяет выявить ареалы изменений для анализа (рис. 2). К примеру, на снимках местности территории памятника «станция Красавка», выполненных в разные годы, видно как изменилась структура землепользования за 15-летний период, а также нехарактерные формы рельефа для данной местности.

Критерии анализа на основе ДДЗ могут включать различные геоморфологические, геологические, гидрологические, и другие характеристики территории, такие как формы рельефа, высота, угол наклона, плотность растительности, тип почвы, близость к водным источникам и населенным пунктам, указывающие на наличие потенциальных мест древних поселений. Эти критерии подбираются на основе предварительных исследований и экспертных знаний о местных условиях и археологических контекстах.

Для анализа археологического потенциала территории с использованием мультиспектральных снимков используются несколько основных каналов.

Инфракрасный (IR) и видимый свет (VIS). Комбинирование IR и VIS каналов позволяет обнаруживать различия в растительном покрове и почвенных свойствах.

Красный (R), зеленый (G) и синий (B). Это стандартная комбинация каналов RGB, используемая в цветных снимках, которая также может

быть полезна для анализа археологических объектов, например для выявления изменений в текстуре почвы или в растительном покрове.

Коротковолновый инфракрасный (SWIR) и длинноволновый инфракрасный (LWIR). Это сочетание инфракрасных каналов позволяет анализировать химический состав почвы и других материалов на поверхности.

Но их может быть и больше. Например, у данных, полученных со спутника Sentinel-2, имеются следующие каналы (таблица).

Сочетание более чем трех каналов, обычно в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом спектральных диапазонах, может предоставить дополнительную информацию о территории археологических объектов, такой как её состав, структура и текстура (рис. 3, 4).

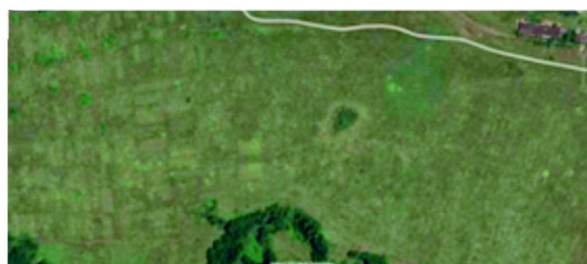
Составленные мультиспектральные комбинации на территорию памятника «станция Красавка» выявили участки, совпавшие с ранее выявленными курганами и курганными группами в результате полевых исследований методом наземного лазерного сканирования [4].

Измерения в коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR) помогают оценить увлажненность растительности и почвы, поскольку данный диапазон активно поглощается водой. Растительность окрашена в оттенки зеленого, почвы и селитбные территории окрашены в различные оттенки коричневого, а чистые водные поверхности кажутся черными. Поскольку горные породы и почвы по-разному отражают коротковолновый инфракрасный свет, это позволяет выявить различные типы подстилающих поверхностей и аномалий среди них.

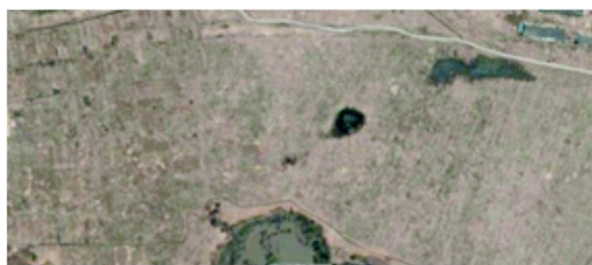
Нормализованный индекс разницы растительности NDVI – это простой, но эффективный



а



б



в



г

Рис. 2. Снимки Махар с GoogleEarthPro территории станции Красавка: а – 2004, б – 2016, в – 2018, г – 2020 гг. [5] (цвет онлайн)



Характеристика спектральных каналов спутника Sentinel-2 [6]

Спектральный канал	Разрешение, м	Длина волны, нм	Описание
B1	60	443	Ультра синий (прибрежный и аэрозольный)
B2	10	490	Синий
B3	10	560	Зеленый
B4	10	665	Красный
B5	20	705	Видимый и ближний инфракрасный (VNIR)
B6	20	740	То же
B7	20	783	»
B8	10	842	»
B8A	20	865	»
B9	60	940	Коротковолновой инфракрасный (SWIR)
B10	60	1375	То же
B11	20	1610	»
B12	20	2190	»

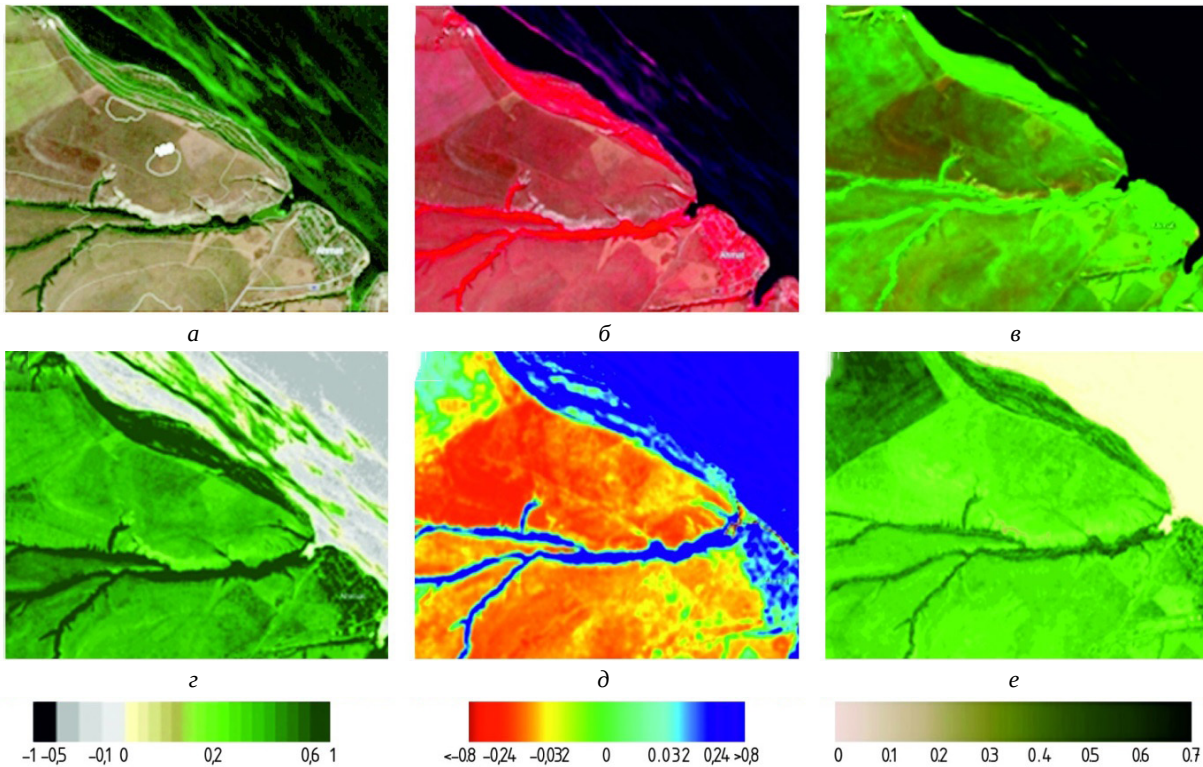


Рис. 3. Примеры применения мультиспектрального анализа для городища Ахмат на основе данных Sentinel-2: а – Truecolor 4-3-2, б – Falsecolor 8-4-3, в – SWIR, з – NDVI (B8 - B4) / (B8 + B4), д – NDMI (B8A - B11) / (B8A + B11), е – EVI2 (2.4 * (B08 - B04) / (B08 + B04 + 1.0)) (цвет онлайн)

индекс для оценки растительного покрова, основанный на том, что растения в зависимости от угнетенности по-разному отражают излучения в определенных длинах волн. Диапазон значений индекса составляет от -1 до 1, где отрицательные величины (приближающиеся к -1) соответствуют водным поверхностям; приближенные к нулю (от -0.1 до 0.1) обычно соответствуют бесплодным участкам почв и грунтов или снежным поверхностям; низкие положительные значения

(приблизительно от 0.2 до 0.4) соответствуют лугам или кустарниковой растительности; высокие значения индекса (значения, приближающиеся к 1) указывают на влажные леса умеренного и тропического поясов.

Нормализованный индекс разницы влажности (NDMI) используется для определения содержания воды в растительности. Диапазон значений NDMI составляет от -1 до 1, где отрицательные значения (приближающиеся к -1)

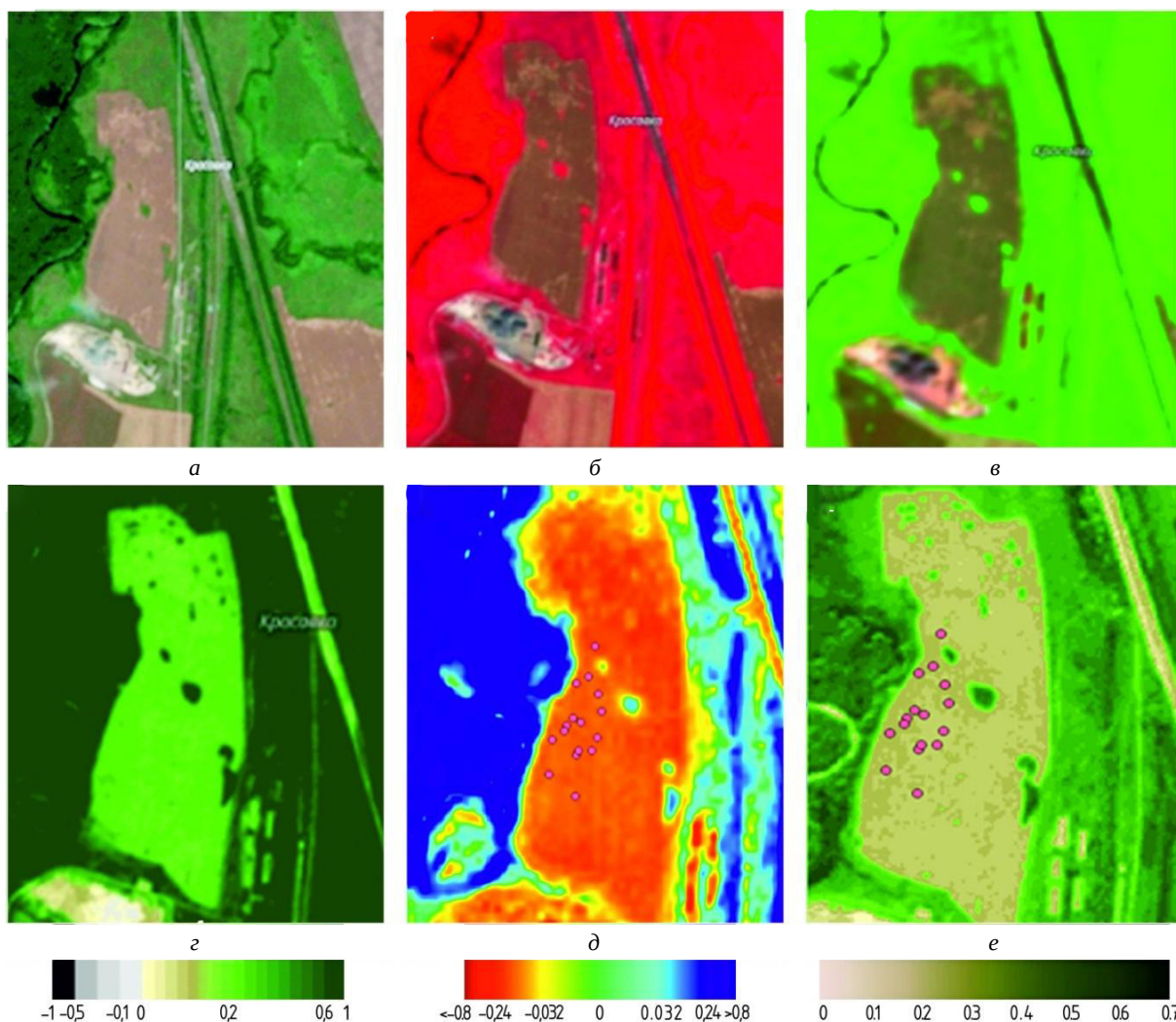


Рис. 4. Примеры применения мультиспектрального анализа для станции Красавка на основе данных Sentinel-2: а – Truecolor 4-3-2, б – Falsecolor 8-4-3, в – SWIR, г – NDVI $(B8 - B4) / (B8 + B4)$, д – NDMI $(B8A - B11) / (B8A + B11)$, е – EVI2 $(2.4 * (B08 - B04) / (B08 + B04 + 1.0))$ (точками обозначены курганные группы, выделенные по разнице спектральных характеристик) (цвет онлайн)

соответствуют бесплодным почвам, диапазон около нуля (от -0.2 до 0.4) обычно соответствует растительности, испытывающей дефицит влаги, в то время как высокие положительные значения (приблизительно от 0.4 до 1) соответствуют высокому растительному покрову без водного стресса [3, 6].

Индекс EVI-2 является улучшенным вегетационным индексом и для выбранной территории при моделировании являлся самым показательным для выделения областей с курганными группами. В областях с густым лесным пологом, где индекс площади листьев (LAI) имеет высокое значение, показатель NDVI может быть улучшен за счет привлечения информации синей длины волны. Информация, извлечённая из данной зоны спектра, может помочь скорректировать фоновые значения воздействия от различных типов почв и атмосферных воздействий в момент съемки [7].

В данном случае многие курганные группы попадают в диапазон от 0 до 0.2 , дополнительные параметры обнаружения можно установить путем классификации изображения и выделения дополнительных признаков, что будет учтено в дальнейших исследованиях. Пока на предварительном этапе важно установить каналы и их сочетания, которые дают наилучшее представление о потенциальных местах расположения археологических объектов и проведения будущих раскопок. Из всех изученных каналов и индексов на разные даты (с марта по сентябрь 2023 г.) лучше всего себя проявил индекс EVI-2.

Выбор сочетания каналов зависит от конкретной задачи и условий исследования и требует профессионального анализа и оценки специалистов в области классической или спутниковой археологии. Более точные прикладные рекомендации по сочетанию каналов или использованию



индексных показателей могут быть представлены на основе определения конкретных целей исследования и специфических условий местности.

Очевидно, что, если задействовать на разведочном предполетном этапе космические снимки и провести анализ территории в разрезе представленных спектров и индексов, то можно выявить потенциальные территории раскопок, уточнить их расположение с помощью цифровых моделей рельефа и местности, что позволит в дальнейшем гораздо проще спланировать полевые работы.

Цифровые модели местности и рельефа

Для решения задач в археологии, связанных с поиском объектов, могут использоваться данные дистанционного зондирования, такие как цифровые модели рельефа (ЦМР) или местности (ЦММ). Анализ этих данных основан на методах и приемах геоинформационных тех-

нологий с использованием специализированного программного обеспечения.

Среди современных открытых глобальных цифровых моделей, отображающих рельеф поверхности Земли, можно выделить: Copernicus DEM30, которая создана в период с 2011 по 2015 г.; ALOS30DEM – 2006 г.; SRTM – февраль 2000 г.; FABDEM (ЦМР на основе ЦММ CopernicusDEM без зданий и растительности). Все перечисленные модели имеют пространственное разрешение в средних широтах порядка 30 м.

В качестве пилотных территорий для нашего исследования были выбраны поселение «Станция Красавка» и его некрополь и городище Ахмат [4, 8]. В программном комплексе QGIS 3.26 на основе вышеперечисленных моделей были выделены участки исследования и построены их цифровые модели местности (рис. 5).

Можно заметить, что открытые данные ЦММ и ЦМР не являются репрезентативными,

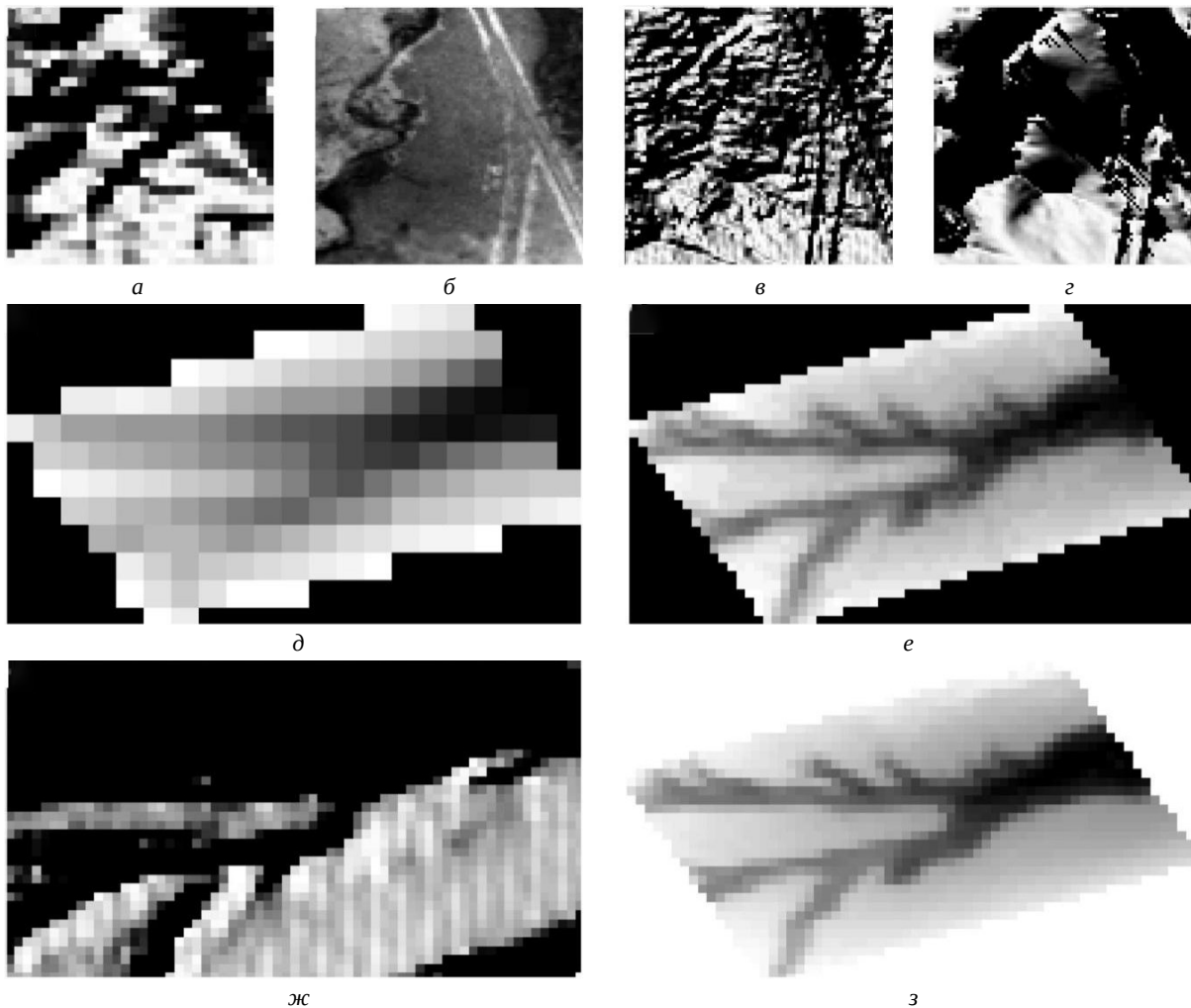


Рис. 5. Цифровые модели местности, построенные по технологии: территории станции Красавка (а – SRTM30, б – ALOS30, в – Copernicus DEM30, г – FABDEM30) и территории городища Ахмат (д – SRTM30, е – ALOS30, ж – Copernicus DEM30, з – FABDEM30)



даже на примере достаточно крупных археологических памятников Саратовской области. Более мелкие объекты и следы прошлых археологических раскопов на них тем более не видны. Следует, однако, подчеркнуть, что из четырёх моделей хорошо проявила себя модель ALOS, имеющая читаемое изображение и наименьшее количество артефактов, а модель SorernicusDEM позволяет детально выделить водные объекты, что также важно при исследовании территории.

Глобальные ЦММ 30-метрового разрешения, такие как системы ALOSDEM и SorernicusDEM, могут предоставить информацию, полезную для археологических исследований, хотя масштаб такой модели может быть недостаточным для обнаружения или детализации некоторых объектов.

С помощью цифровой модели можно выявить:

- формы микрорельефа – выпуклости или впадины;
- геоморфологические особенности – ложа высохших рек, внезапные перепады высот или ступеньки;
- системы дренажа – каналы или русловые системы;
- расстояние до рек;
- особенности рельефа.

Формы микрорельефа, геоморфологические особенности и системы дренажа могут указывать на наличие археологических объектов или структур, связанных с управлением водой в прошлом. Расстояние до водоемов и особенности рельефа являются важными параметрами при выявлении возможного расположения поселенческих структур, которые могут быть укрыты водой или слоем почвы на склонах возвышенностей, что делает их труднодоступными для обнаружения.

Для анализа этих особенностей могут использоваться различные методики, такие как профилирование почвы, отбор образцов и химический анализ, геоморфологические карты и топографические модели. Также можно применять лазерное сканирование для создания точной 3D-модели местности, помогающей исследователям увидеть детали, которые могут быть невидимы на двумерных картах.

ЦМР может показать неравномерности и аномалии в морфологии рельефа, такие как выступы, ямы, впадины, холмы и другие формы, которые могут указывать на присутствие археологических объектов. Захоронения могут быть расположены на холмах или выступах для защиты от наводнений или других естественных процессов. Поселения зачастую также возникали на высоких берегах и террасах с крутыми склонами вследствие безопасности территории при затоплении. Курганы эпохи бронзы часто можно встретить на водоразделах.

Микротопография

Данные открытых глобальных ЦМР способствуют выделению микротопографических особенностей рельефа, таких как небольшие углубления, отмели, низины и другие детали. Однако стоит отметить, что разрешение 30 м ограничивает возможность точно определить и детализировать некоторые аспекты археологических объектов, такие как размер или структура. Их выявлению могут способствовать спутниковые снимки высокого разрешения или лазерное сканирование рельефа [9].

Использование глобальных моделей в археологических исследованиях служит предварительным инструментом для обнаружения потенциально интересных областей, но всегда рекомендуется подтверждать данные на месте с помощью наземных исследований и раскопок.

В качестве альтернативного анализа территории по выявлению археологических объектов используют метод светотеневой пластики (отмывку рельефа hillshade), который позволяет проявить изменения мельчайших морфоструктур за счет контраста света и тени. Эффект отмывки, примененный к открытым моделям местности и рельефа, не дает нужного результата за счет несоизмеримо большой ячейки 30×30 м, но этот эффект хорошо проявляет себя при работе с ЦММ, полученной путем лазерного сканирования.

Выводы

Использование открытых данных дистанционного зондирования для выявления археологических объектов является перспективным направлением в археологии. Данные позволяют выявить на предполевом этапе потенциальные археологические объекты, которые сложно обнаружить в полевых исследованиях, а также изучить их структуру и вычислить различные характеристики.

Анализ ДДЗ на примере территории городища Ахмат показал, что имеющиеся открытые данные позволяют визуально по биоиндикационным признакам выявить особенности рельефа местности, а также отдельные крупные сооружения (рвы, валы), в то время как прочие рукотворные объекты, такие как места прошлых археологических раскопок, явно читающихся на поверхности памятника, не выделяются. По открытым ЦМР и ЦММ не выделяются даже защитные сооружения (рвы, валы), что указывает на необходимость получения данных с более высоким пространственным разрешением, например путем лидарной (лазерной) съемки.

Анализ спектральных каналов и индексных моделей открытых данных на примере памятника эпохи бронзы «станция Красавка» позволил выявить общие структурные особенности местоположения курганных групп, однако это



потребовало дополнительного анализа и классификации изображений на примере объектов-аналогов (ранее выявленных и поставленных на учет курганов на данной территории).

Как показали исследования, комплексное использование индексов NDMI и EVI-2 (относительной влажности и вегетационной массы) хорошо детектируют потенциальные места для археологических раскопок объектов (в частности, курганов), связанных с микрорельефом местности. Они позволили локализовать участки с меньшей влажностью, которые характерны для локальных возвышений с более быстрым режимом стока и высыхания. Важно отметить, что выявление таких областей корректно только в случае однородной подстилающей поверхности (характер растительности, гидрогеологические условия и т. д.). На территорию исследуемого памятника были подобраны такие снимки, на которых она была представлена со скошенной растительностью (стерней) и после обильных осадков. Это позволило применить данные методы и получить наилучшие результаты, так как местность была представлена однородной по текстуре растительностью и увлажнена. Данная модель может быть дополнена анализом гидрографической сети, рисунок водотоков которой дает представление о расположении и виде отдельных курганов и курганных групп.

Комплексный анализ открытых ДДЗ на предполетном этапе археологических исследований показал, что отдельные методы позволяют выявить потенциальные области будущих археологических раскопок с высокой точностью до этапа наиболее затратных полевых работ.

Отметим, что наиболее полным исследованием будет считаться комбинирование всех типов данных на предварительном этапе.

Библиографический список

1. Жаворонкин О. В., Трезуб А. И. Дистанционное зондирование земли при геологических исследованиях :

учебное пособие для вузов. Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2012. 46 с.

2. Гайнуллин И. И., Хомяков П. В., Ситдииков А. Г., Усманов Б. М. Качественная оценка состояния средневековых городищ Республики Татарстан по данным дистанционного зондирования // Поволжская археология. 2017. № 2 (20). С. 303–320. <https://doi.org/10.24852/pa2017.2.20.303.320>, EDN: ZBHKND
3. Sentinel-Hub: EO Browser. URL: Sentinel Hub EO Browser (sentinel-hub.com) (дата обращения: 01.02.2024).
4. Цифровая модель рельефа территории археологического памятника «Нижняя Красавка-2», расположенного в Аткарском муниципальном районе Саратовской области. Монахов С. Ю., Растегаева М. Н., Лопатин В. А., Данилов В. А., Федоров А. В., Шлапак П. А. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023624926, 22.12.2023. Заявка от 03.12.2023. EDN: KIALMQ
5. Google: Google Earth Pro. URL: <https://earth.google.com/static/multi-threaded/versions/10.45.0.3/index.html?> (дата обращения: 01.02.2024).
6. Sentinel каналы и комбинации: GIS geography. URL: Sentinel 2 Bands and Combinations – GIS Geography (дата обращения: 01.02.2024).
7. EVI2: Sentinel bands and index. URL: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/evi2/> (дата обращения: 01.02.2024).
8. Цифровая модель рельефа территории археологического памятника «Ахматское городище» расположенного в Красноармейском муниципальном районе Саратовской области. Монахов С. Ю., Растегаева М. Н., Лопатин В. А., Данилов В. А., Федоров А. В., Морозова В. А. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2023624670, 03.12.2023. Заявка от 03.12.2023. EDN: CICCZV
9. Безвершенко Л. С., Данилов В. А., Федоров А. В. Методика реконструкции палеорельефа Увекского массива в XIII веке с использованием ГИС-технологий // Современные проблемы территориального развития : электрон. журн. 2018. № 3.

Поступила в редакцию 18.04.2024; одобрена после рецензирования 28.05.2024; принята к публикации 08.08.2024; опубликована 30.09.2024

The article was submitted 18.04.2024; approved after reviewing 28.05.2024; accepted for publication 08.08.2024; published 30.09.2024