

Использование нейронных сетей для поиска археологических памятников скифского времени (VII–III вв. до н. э.) в Юго-Западной Туве

Анастасия Б. Глебова, Игорь С. Сергеев

Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация



В статье представлен новый подход для поиска неисследованных археологических памятников скифского времени (VII–III вв. до н. э.) на территории Юго-Западной Тувы на основе использования современных методов исследования — нейронных сетей. Для решения поставленной цели была создана база данных археологических памятников скифского периода, расположенных на территории исследования. База собиралась как по литературным данным, так и собственным полевым исследованиям авторов. В проведенном анализе участвовало 639 объектов скифского времени.

На основе цифровой модели рельефа SRTM в программе ArcGIS 10.2 с использованием модуля пространственного анализа Spatial Analyst, а также в среде Python 3.7 проведен геоинформационный анализ распределения археологических памятников по девяти ландшафтным признакам: абсолютной высоте, крутизне склонов, экспозиции склонов, положению относительно водотоков, высоте над урезом близлежащего водотока, интенсивности солнечной радиации за декабрь и июнь, наличию видимости горных вершин и удаленности от горных вершин. Выбор признаков основан на выявленных закономерностях распределения археологических памятников в ландшафтах Юго-Западной Тувы и Юго-Восточного Алтая в ходе полевых экспедиционных исследований.

В дальнейшем на основе дисперсного анализа определена важность каждого признака. На основе полученных данных была обучена нейронная сеть прямого распространения и построена прогнозная модель возможных местонахождений еще неисследованных археологических памятников. Верификация прогнозной модели проводилась по космическим изображениям с использованием ресурса World Imagery, который предоставляет изображения Земли из космоса в рамках ПО ArcGIS-Online. Визуально было обследовано около 150 спрогнозированных участков размером каждый 250×250 метров. В 48-х случаях были обнаружены новые ранее не известные археологические объекты (курганы).

В заключение, учитывая все полученные данные, создана картосхема ареала расселения народов в скифское время.

Ключевые слова: Тува; Юго-Западная Тува; скифское время; археологический памятник; геоинформационный анализ; нейронная сеть

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-27-00068 «Ландшафтная геоархеология Северо-Запада Внутренней Азии с построением нейросетевых моделей пространственно-временных закономерностей расселения древних народов» <https://rscf.ru/project/24-27-00068/>.



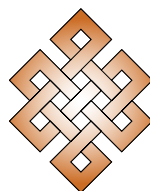
Для цитирования:

Глебова А. Б., Сергеев И. С. Использование нейронных сетей для поиска археологических памятников скифского времени (VII–III вв. до н. э.) в Юго-Западной Туве // Новые исследования Тувы. 2025. № 4. С. 254–266. DOI: <https://doi.org/10.25178/nit.2025.4.14>



Глебова Анастасия Борисовна — кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры физической географии и ландшафтного планирования института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета. Адрес: 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9. Эл. адреса: a.glebova@spbu.ru; a_glebova@mail.ru

Сергеев Игорь Сергеевич — кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета. Адрес: 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9. Эл. адреса: i.sergeev@spbu.ru; igorsergeev.spb@gmail.com



The use of neural networks for the search of archaeological sites from the Scythian period (7th – 3rd centuries BC) in Southwestern Tuva

Anastasia B. Glebova, Igor S. Sergeev
Saint Petersburg State University, Russian Federation

The article presents a new approach for identifying previously unexplored archaeological sites of the Scythian period (7th–3rd centuries BC) in the territory of Southwestern Tuva through the application of modern research methods, namely neural networks. To achieve this objective, a database was created comprising archaeological sites of the Scythian era located within the study area. The database was compiled both from literature sources and from the authors' own field research. The analysis involved 639 Scythian-period sites.

Based on the SRTM digital elevation model in ArcGIS 10.2, using the Spatial Analyst extension, as well as in the Python 3.7 environment, a geoinformation analysis was carried out to assess the distribution of archaeological sites across nine landscape parameters: absolute elevation, slope gradient, slope aspect, proximity to watercourses, elevation above the nearest watercourse, solar radiation intensity in December and June, visibility of mountain peaks, and distance from mountain peaks. The choice of parameters was informed by patterns of archaeological site distribution observed in the landscapes of Southwestern Tuva and Southeastern Altai during field expeditions.

Subsequently, variance analysis was performed to determine the significance of each parameter. Based on the obtained data, a feedforward neural network was trained, and a predictive model of potential locations of previously unexplored archaeological sites was constructed. Verification of the predictive model was conducted using satellite imagery provided by the World Imagery resource within ArcGIS Online. Approximately 150 predicted areas, each measuring 250×250 meters, were visually inspected. In 48 cases, previously unknown archaeological objects (kurgans) were discovered.

In conclusion, considering all the acquired data, a cartographic scheme of the settlement area of populations during the Scythian period was developed.

Keywords: Tuva; Southwestern Tuva; Scythian period; archaeological site; geoinformation analysis; neural network

Financing

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation within the framework of the scientific project No. 24-27-00068 "Landscape geoarchaeology of the North-West of Inner Asia with the construction of neural network models of spatial and temporal patterns of settlement of ancient peoples", <https://rscf.ru/project/24-27-00068/>



For citation:

Glebova A. B. and Sergeev I. S. The use of neural networks for the search of archaeological sites from the Scythian period (7th – 3rd centuries BC) in Southwestern Tuva. *New Research of Tuva*, 2025, no. 4, pp. 254–266. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25178/nit.2025.4.14>

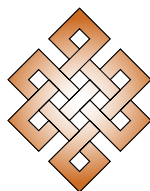


GLEBOVA, Anastasia Borisovna, Candidate of Geographical Sciences, Senior Lecturer, Department of Physical Geography and Landscape Planning, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University. Postal address: 7-9 Universitetskaya Emb., 199034, Russia, Saint Petersburg. E-mail addresses: a.glebova@spbu.ru; a.glebova@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1086-3574

SERGEEV, Igor Sergeevich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Geomorphology, Institute of Geosciences, St. Petersburg State University. Postal address: 7-9 Universitetskaya Emb., 199034, Russia, Saint Petersburg. E-mail addresses: i.sergeev@spbu.ru; igorsergeev.spb@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8341-7159



Введение

Юго-Западная Тува — это горный регион, который отличается суровым климатом, но несмотря на это с древнейших времен эта территория была заселена. Здесь проживали разные культурные общности, которые на протяжении истории сменяли друг друга. Следы, существовавших на этой территории культур, сохранились в ландшафтах в виде самых разных археологических памятников: курганов, поминальных сооружений, балбалов, петроглифов, поселений и др. Количество оставленных памятников разными культурами неодинаковое: одни оставили много памятников, другие единицы. Скорее всего, это было связано с численностью населения, можно предположить, что чем больше оставленных древним населением археологических объектов, тем больше была численность населения. Период, в который население оставило много памятников, относится к скифскому времени (VII–III вв. до н. э.). Многие памятники этого периода уже изучены и описаны археологами, но остается еще та часть археологических объектов, которая еще не зафиксирована учеными.

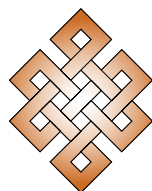
В скифское время (VII — до III вв. до н. э.) на территории Тувы формируются новые культурные общности. Л. Р. Кызласов и М. Х. Маннай-оол считают, что в этот период существовала одна культура — уюкская (Кызласов, 1979; Маннай-оол, 1964, 1970). С. И. Вайнштейн называет эту культуру кызылганской (Вайнштейн, 1958). А. Д. Грач вместо одной уюкской культуры выделяет несколько культур: алды-бельскую (подразделяемую на два этапа — аржанский VIII–VII вв. до н. э. и усть-хемчикский VII–VI вв. до н. э.), саглыную (подразделяемую также на два этапа — саглынский V–IV вв. до н. э. и озен-ала-белигский IV–III вв. до н. э.) и улуг-хемскую (Грач, 1980). Д. Г. Савинов выделяет две культуры, существовавшие в Туве в это время: алды-бельскую VIII в. до н. э. — VI в. до н. э. и уюкско-саглыную V в. до н. э. — III в. до н. э. (Савинов, 1994). В конце III в. до н. э. уюкская культура прекратила свое существование, уступив место шурмакской культуре. На более высоком уровне уюкцы входили в ареал распространения Саяно-Алтайской культурной общности, охватывающей, кроме Тувы еще и Горный Алтай, Северо-Запад Монголии и Восточный Казахстан (Суразаков, 1989).

Территория Юго-Западной Тувы в скифский период была хорошо освоена. Подобный вывод можно сделать, основываясь на том, что население оставило довольно много археологических памятников, причем значительно больше, чем в другой какой-либо исторический период. Этому могли способствовать и более благоприятные в климатическом условия по сравнению с другими периодами. Археологические памятники скифского времени встречаются по долинам крупных рек и их притоков. Много археологических объектов в долине р. Хемчик и ее притоков: р. Барлык, р. Алаш, р. Чадан и др. В горных районах они встречаются по долинам рек Моген-Бурен, Дуруг-Суг, Каргы, Мугур, Бугу-зун, Аг-Суг и др.

Существует много способов поиска древних культовых сооружений по данным дистанционного зондирования. Одним из современных методов является использование методов глубокого машинного обучения — нейронных сетей для построения прогнозных моделей в зависимости от ландшафтного окружения и характеристик местоположений археологических памятников.

За рубежом используют сверточные нейронные сети, основанные на визуальном поиске археологических объектов. Такие исследования как правило проводят на небольшие территории, т. к. для этого требуются космические снимки высокого качества. Такие исследования проводились в Нижней Саксонии в регионе Грац, где высокая концентрация археологических памятников¹ (Kazimi et al., 2018); в Южных Нидерландах в районе Мидден-Лимбург, где с помощью алгоритмов глубокого обучения (использован автоматизированный инструмент WODAN) были обнаружены курганы и кельтские поля (Verschoof-van der Vaart, 2021); в Иракском Курдистане на равнине Эрбиль, где для автоматического дистанционного обнаружения археологических объектов были использованы спутниковые снимки CORONA (Soroush et al., 2020) и др. Для соседних регионов Юго-Западной Тувы в Юго-Восточного Алтае и прилегающий территории Монголии учеными из Бельгии и Китая проводилось автоматическое обнаружение каменных курганов с использованием метода глубокой сверточной нейронной сети (CNN) (Chen et al., 2021). Коллективом из Малайзии был опубликован обзор приложения глубокого обучения для обнаружения археологических структур, в которой освещаются статьи из баз данных

¹ Kazimi B., Thiemann F., Malek K., Sester M. Archaeological Object Detection in Airborne Laser Scanning Data Using Convolutional Neural Networks (Presentation) / Conference: CAA 18 [Электронный ресурс] // ResearchGate. net. URL: https://www.researchgate.net/publication/328198957_Archaeological_Object_Detection_in_Airborne_Laser_Scanning_Data_Using_Convolutional_Neural_Networks (дата обращения: 14.04.2025).



Scopus, Web of Science и IEEE Xplore, относящиеся к использованию методов на основе сверточной нейронной сети для обнаружения археологических объектов (Hanani, 2022).

Впервые метод глубокого машинного обучения для прогноза местонахождения археологических памятников на территории Юго-Восточного Алтая был применен нами в 2022 г. (Глебова, Сергеев, Быков, 2022). Для проводимого нами исследования информация по археологическим памятникам была собрана по литературным источникам и собственным полевым исследованиям. Анализ проводился без разбивки на исторические периоды. В дальнейшем методика была усовершенствована и прогнозные модели возможного местонахождения археологических объектов на основе нейронной сети были построены для восьми исторических периодов, выделенных археологами для территории Юго-Восточного Алтая (Глебова и др., 2024). Модели были заверены по космическим изображениям и в ходе полевых экспедиционных исследований в Юго-Восточном Алтае. По результатам верификации модели дали хорошую прогнозную силу.

В данной работе нейронные сети применяются для поиска еще неисследованных археологических объектов скифского периода (VII–III вв. до н. э.).

Целью настоящего исследования является поиск новых неисследованных археологических объектов скифского времени VII–III вв. до н. э.), расположенных на территории Юго-Западной Тувы, на основе использования современных методов исследования — нейронных сетей.

Задачами исследования является проведение геоинформационного анализа на основе имеющихся археологических данных и цифровой модели рельефа, обучение нейронной сети, построение прогнозной карты возможных местонахождений археологических памятников скифского времени, верификация полученных результатов и построение карты мест потенциального расселения древних народов на территории Юго-Западной Тувы.

Объектом исследования являются ландшафтные признаки местоположений археологических памятников скифского времени в пределах Юго-Западной Тувы. Предметом исследования является пространственные закономерности расположения археологических памятников скифского времени.

Проведенное исследование можно рассматривать как методическое объединение аналитических инструментов географических информационных систем (ГИС) и современных информационных технологий — нейронных сетей в историко-географических исследованиях.

Результатами такого подхода становится прогноз местонахождений новых археологических памятников скифского периода в ландшафтах Юго-Западной Тувы.

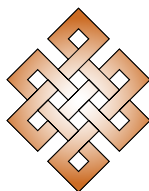
Обзор литературы

В Туве исследования археологических памятников и выявления новых проводились с помощью современных методов исследования: дистанционного зондирования; ГИС-технологий; аэрофотосъемки; 3D-моделирования и др. В «Долине царей» для обновления планиграфии¹ уже изученных археологических объектов и открытия новых использовался метод фотограмметрии на основе БПЛА². Полученные данные обрабатывались с использованием программного обеспечения ГИС. Результатом исследования было обнаружение 1000 археологических объектов, в том числе еще неисследованных. Недостатком данного метода является, то, что его можно применять только на открытых пространствах и высокая стоимость (Vavulin et al., 2021).

В «Долине царей» на северной стороне речной террасы реки Уюк с использованием панхроматических фотоматериалов WorldView-2 высокого разрешения (до 0,46) ученым из Института археологических наук Бернского университета Дж. Каспари было проведено картографирование «царских» курганов и оценены условия их сохранности. Из поиска были исключены все области с углом наклона более 15°, для этого использовалась цифровая модель рельефа из Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). Результатом проведенного исследования стало обнаружение 716 курганов самых разных размеров. На карту были нанесены не только большие курганы, но и курганы размером 5–20 м (Caspari, 2020).

¹ Планиграфия — способ описания и представления результатов измерений или данных в трехмерном пространстве как относящихся к определенному моменту или периоду времени.

² БПЛА — беспилотный летательный аппарат.



Учеными из Института археологии Ягеллонского университета (Краков) и Института археологических наук Бернского университета (Берн) в долине реки Уюк (территория исследования охватывает горные долины к северу от Чкаловки и Аржана) с помощью метода дистанционного зондирования и наземных исследований были исследованы шесть памятников: Желвак 1, 2, 3, 5, 8 и Сандакин. Наземные исследования показали, что на памятнике Желвак 5 фрагменты керамики, которые представляли бронзовый век, скифский период, кокзельскую культуру и, возможно, уйгурский период (Zhogova et al., 2023).

В 2015 г. в Москве прошла конференция «Археология и Геоинформатика». На конференции рассматривались различные современные методы, используемые в археологических исследованиях, в том числе и в Туве. Одна из статей в сборнике материалов данной конференции посвящена исследованию, которое проводилось в 2012–2014 гг. отрядом Тувинской экспедиции ИА РАН по изучению каменных курганов скифского времени в Турано-Уюкской котловине (в зоне расположения Кенкольского, Чинге-Тэййского и Аржанских курганных полей) с использованием низковысотной аэрофотосъемки (с применением гелиевого аэростата «АСГ-10» и мотопараплана) и геофизических методов (георадиолокационное исследование структуры курганных насыпей с применением георадара «Лоза-V»). Результатом исследования стало уточнение планиграфии курганных могильников и погребально-поминальных комплексов данного региона в зоне расположения Кенкольского, Чинге-Тэййского и Аржанских курганных полей (Рукавишников, Рукавишников, Морозов, 2015). Еще один доклад конференции был посвящен 3D-реконструкции комплекса Пор-Бажын (Аржанцева и др., 2015).

В настоящей работе описывается методика прогнозирования местоположений неисследованных археологических памятников, основанная на создании алгоритма обучения глубокой нейронной сети по ландшафтным признакам, характерным для местоположений уже известных археологических объектов скифского периода. Используемый метод не только позволяет решать задачу оптимизации и целенаправленности полевых поисков новых мест древних сооружений, но и решает научные задачи ретроспективного моделирования географического расселения народов для разных исторических эпох с учетом ландшафтных предпочтений людей в ведении хозяйства.

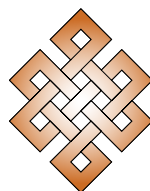
Материалы и методы исследования

Анализ проводится для территории Юго-Западной Тувы. На основе имеющихся археологических данных и цифровой модели рельефа SRTM¹ в программе ArcGIS 10.2 с использованием модуля пространственного анализа Spatial Analyst, а также в среде Python 3.7 (Шолле, 2018; Дэвидсон-Пайлон, 2019). Выполнен геоинформационный анализ распределения археологических объектов по девяти ландшафтным признакам: абсолютной высоте, крутизне склонов, экспозиции склонов, положению относительно водотоков, высоте над урезом близлежащего водотока, интенсивности солнечной радиации за декабрь и июнь, наличию видимости горных вершин и удаленности от горных вершин. На следующем этапе проведен дисперсный анализ и на основе статистических закономерностей определена важность каждого из рассматриваемого признака. Выбор ландшафтных признаков не случайный, он обусловлен многолетними ландшафтно-археологическими исследованиями, проведенными нами в Юго-Восточном Алтае и Юго-Западной Тувы. В дальнейшем можно рассматривать и другие признаки при наличии достаточного обоснования.

На основе полученных данных геоинформационного и дисперсного анализов была обучена нейронная сеть и построена прогнозная модель возможных местонахождений еще неисследованных археологических памятников. Результатом проведенного исследования было построение картосхемы ареала расселения народов в скифское время на территории Юго-Западной Тувы.

В наших исследованиях мы используем нейронные сети прямого распространения. В отличие от сверточных нейронных сетей, нейронные сети прямого распространения могут работать не только с визуальной информацией, но и со сложными данными имеющих глобальный характер, например, ландшафтными метриками. Под глобальностью мы понимаем крупные, охватывающие всю изучаемую территорию взаимодействия признаков. Такой подход построения нейронной сети заведомо снижает точность прогнозирования, но позволяет лучше проследивать пространственные закономерности искомых объектов.

¹ USGS. Science for a changing world. Главная страница [Электронный ресурс] // USGS. Science for a changing world. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 03.02.2025).



Данные по археологическим объектам скифского времени, расположенных в Юго-Западной Туве собирались по литературным источникам (Маннай-оол, 1964, 1970; Грач, 1980; Самбу, 1994; Мандельштам, 1992; Семенов, 1999; и др.) и собственным полевым исследованиям авторов (Глебова, Сергеев, 2024). В ходе полевых исследований были определены точные координаты археологических объектов, приблизительное время сооружения, типы и ландшафты в которых расположены памятники. Время сооружения археологических объектов указывалось приблизительно на основе внешних признаков и в дальнейшем требует уточнения. Для некоторых объектов, которые ранее были описаны археологами, время их сооружения уточнялось по имеющимся данным ученых. Для памятников, собранных по литературным источникам в базе данных приведены те же сведения, что и по тем, что зафиксированы в полевых условиях. В итоге в проведенном анализе участвовало 639 объектов скифского времени.

Территория исследования

Районом исследования является юго-западная часть республики Тыва (рис. 1). В пределах рассматриваемого региона расположены горные хребты: Цаган-Шибэту, юго-западная часть хребта Танну-Ола, отроги Шапшальского хребта, а также отдельно стоящий горный массив Монгун-Тайга (3976 м), достаточно большую часть территории занимает Хемчикская котловина. В высокогорных частях хребтов и в горном массиве Монгун-Тайга имеют альпинотипный рельеф с современными ледниками и снежниками, а также следы древнего оледенения.

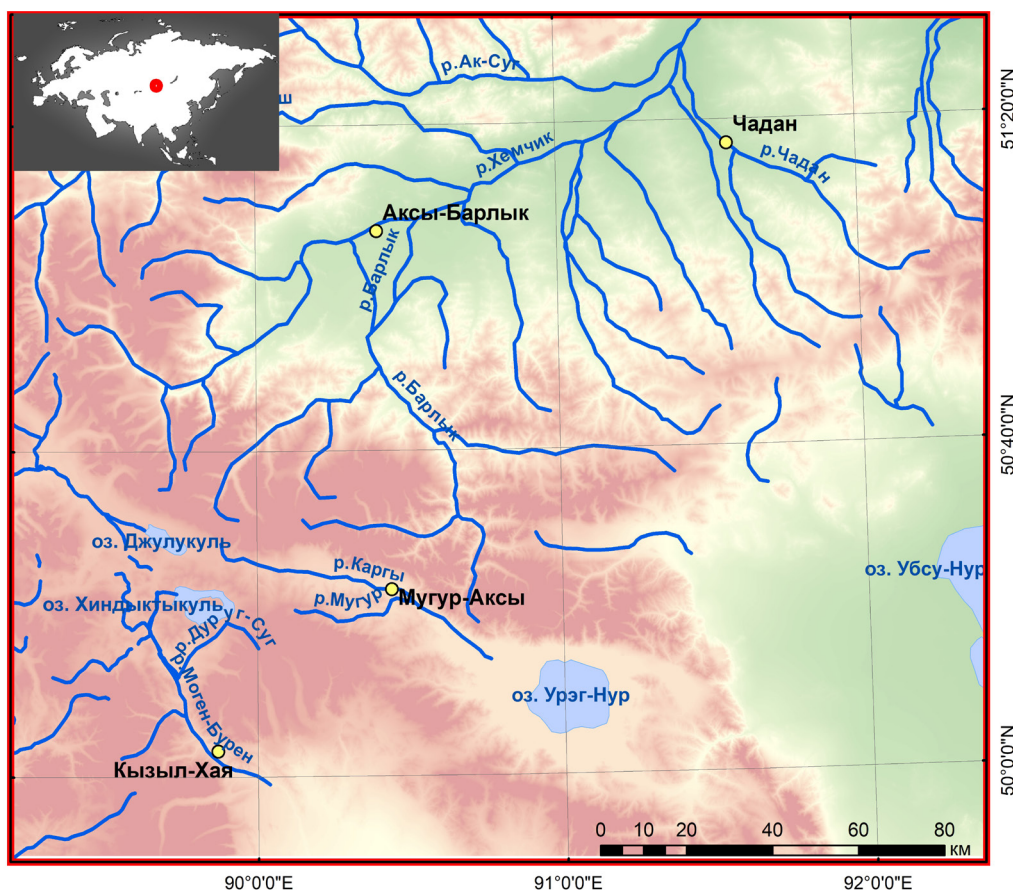
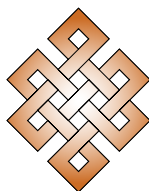


Рис. 1. Территория исследования Юго-Западной Тувы. Составлена авторами на основе Цифровой Модели Рельефа SRTM¹.

Fig. 1. The research area of Southwestern Tuva. Compiled by the authors on the basis of the Digital Relief Model SRTM.

¹ USGS. Science for a changing world. Главная страница [Электронный ресурс] // USGS. Science for a changing world. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения 03.02.2025).



Геоинформационный анализ

Среди оставленных населением археологических памятников большинство представляют собой цепочки и комплексы каменных курганов. Цепочки обычно ориентированы на восток и состоят из трех — шести, иногда и более курганов. Иногда от центрального кургана в восточном направлении установлен ряд балбалов (каменных необработанных столбиков), о предназначении которых среди археологов нет единого мнения. Иногда рядом с цепочками курганов расположены поминальные сооружения, представляющие собой выложенные из камней круги диаметром 1–1,5 м. Как правило такой круг выложен из 8 камней, но не все сохранились до нашего времени.

Геоинформационный анализ распределения археологических памятников скифского периода по девяти ландшафтным признакам показывает, что большинство памятников находится в диапазоне абсолютных высот от 1500 до 2250 м, средние значения 1882 (рис. 2а). Такое расположение памятников связано с хозяйственным укладом племен, основной отраслью которого было кочевое скотоводство. Скот выпасали на древних речных террасах и по склонам горных хребтов. Когда растительность выгорала скот перегоняли в более высокие области, где за счет таяния ледников и более холодного климата формировались хорошие пастбищные условия.

Для сооружения археологических объектов скифы выбирали в основном плоские поверхности или склоны с уклонами до 5 градусов (рис. 2б). Встречаются и памятники и по более крутым склонам, часть из них изначально была расположена на речных террасах, но в результате подмыва берега рекой, оказалась на склонах речных террас и сейчас «оползает». Огромное значение в жизни древнего общества играла вода. Во-первых, в поймах некоторых рек расположены заливные луга, которые служили кормовой базой для домашнего скота, во-вторых, вода служила источником питьевой воды, значение имело, чтобы вода была чистая, в-третьих в некоторых случаях строительный материал для курганов брали из реки, такие камни имели окатанный вид и были легко доступны. Поэтому большинство памятников расположено на расстоянии до 450 м от реки (рис. 2в). Значение имела и высота древней речной террасы, на которой сооружали культовые сооружения. Основная масса находится на высоте до 45 м над урезом воды, средние значения составляют 17,3 м над урезом воды (рис. 2г). Высокие речные террасы способствовали лучшей сохранности культовых объектов, и как правило с мест культовых объектов открывался красивый вид на долину реки.

Распределение археологических памятников по склонам разных экспозиций показывает, что большинство расположено по склонам южной и северной экспозиций (рис. 2д). Расположение культовых объектов по склонам южной экспозиции связано с тем, что эти склоны хорошо прогреваются, особенно в весенний и летний период, сезонная мерзлота оттаивает на большую глубину, что позволяло выкапывать ямы достаточной глубины для погребения умерших. Это подтверждают и данные приход солнечной радиации в июне. Большинство памятников расположены в местоположениях, где приход солнечной радиации составил от 181 до 200 мДж/м², среднее значение — 190 мДж/м² (рис. 2е). В зимний период поступление солнечной радиации было незначительным и в среднем составило 9,6 мДж/м² (рис. 2ж). Расположение культовых объектов по склонам северной экспозиции связано со строением речной долины, речные террасы, примыкающие к склонам северной экспозиции значительно шире, чем речные террасы, примыкающие к склонам южной экспозиции.

Нами было также установлено, что при выборе мест создания культовых объектов в ряде случаев играл такой показатель, как наличие видимости горной вершины или вершин, особенно если эта вершина была заснеженной. В большинстве случаев в тех местах, где хорошо видна горная вершина или вершины концентрация археологических объектов велика, и наоборот, где вершина или вершины не видны, их либо немного, либо нет совсем. На основе полученной статистики для среднегорной части территории Юго-Западной Тувы этот показатель является важным. Но для людей, проживавших в Хемчикской котловине, по всей видимости, этот параметр значения не имел (рис. 2з). Еще один признак, который мы рассматривали, является удаленность археологических объектов от горных вершин (рис. 2и). Этот показатель в среднем составил около 21 км. Но большинство объектов расположены на расстоянии около 10–15 км.

В дальнейшем на основе дисперсного анализа была определена важность каждого из рассматриваемых признаков. Наиболее важное значение при выборе местоположений создания археологических объектов играли удаленность от водотока и наличие видимости горной вершины или горных вершин в горных районах. Немного меньшую роль играла высота над урезом близлежащего

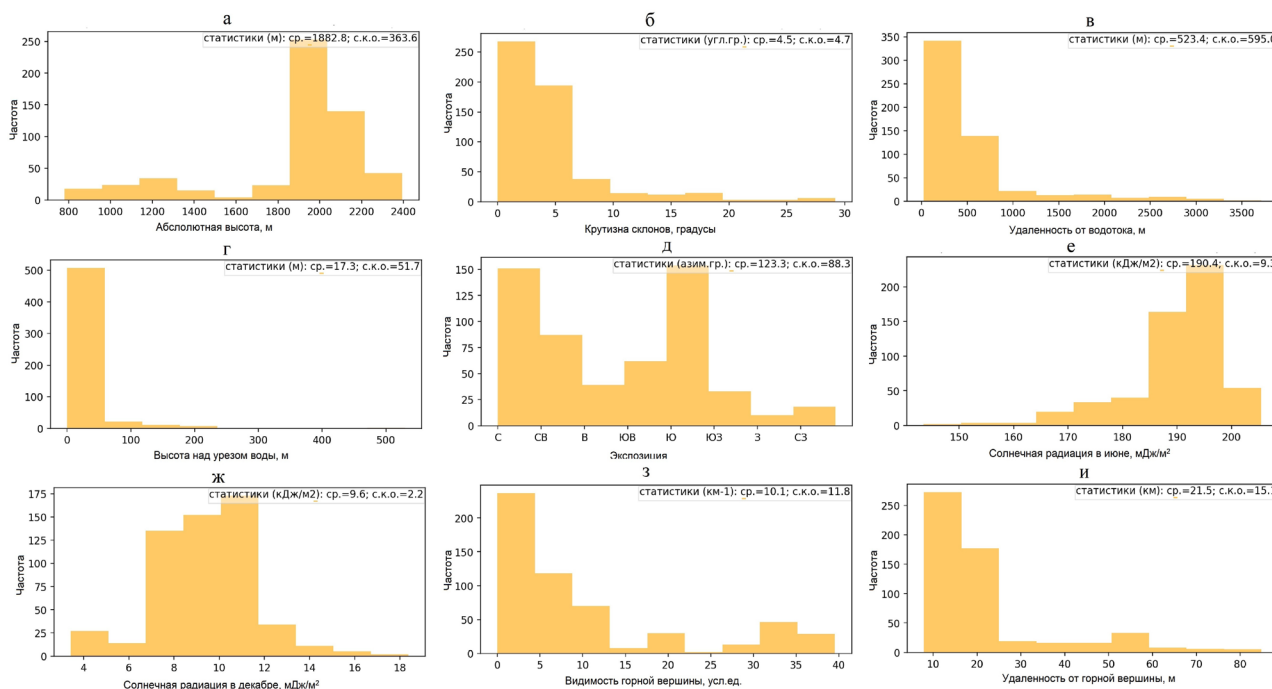
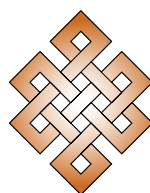


Рис. 2. Распределение археологических памятников скифского времени Юго-Западной Тувы по ландшафтным признакам: а — абсолютной высоте; б — склонам разной крутизны; в — удаленности от водотока; г — высоте над урезом близлежащего водотока; д — склонам разной экспозиции; е — интенсивности солнечной радиации в июне; ж — интенсивности солнечной радиации в декабре; з — наличию видимости горных вершин; и — удаленности археологических памятников от горных вершин.

Fig. 2. Distribution of archaeological sites of the Scythian period of Southwestern Tuva by landscape features: а — absolute height; б — slopes of different steepness; в — distance from the watercourse; г — height above the edge of a nearby watercourse; д — slopes of different exposure; е — intensity of solar radiation in June; ж — intensity of solar radiation in December; з — the visibility of mountain peaks; и — the remoteness of archaeological sites from mountain peaks.

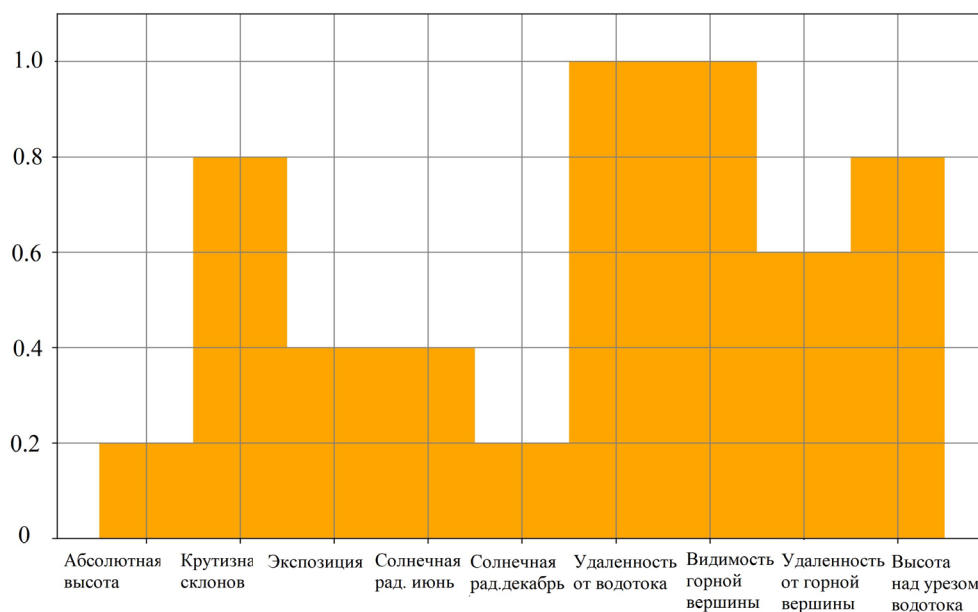
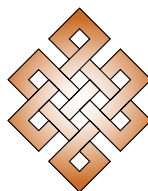


Рис. 3. Важность ландшафтных признаков в Юго-Западной Туве.

Fig. 3. The importance of landscape features in Southwestern Tuva.



водотока и крутизна склонов (рис. 3). Самую незначительную роль играли абсолютная высота и приход солнечной радиации в декабре. В основу анализа положен статистический критерий распределения Фишера отношения внутривыборочной и межвыборочной изменчивостей, вычисляемых в ходе статистической процедуры известной под термином ANOVA (Дэвидсон-Пайлон, 2019).

Построение прогнозной модели и картосхемы расселения

На основе полученных данных геоинформационного и дисперсного анализов была обучена нейронная сеть с тестовой точностью 92% и построена прогнозная карта возможных местонахождений еще неисследованных археологических объектов скифского времени на территории Юго-Западной Тувы (рис. 4). Спрогнозировано более 4500 местоположений, где возможно обнаружение новых археологических объектов скифского времени. Некоторые участки расположены на территории Монголии. Неисследованные памятники можно обнаружить по долинам крупных рек и их притоков, например, в Хемчикской котловине по долинам рек Хемчик, Барлык, Чадан, Большие Аянгаты, Угуг-Чыргакы, Шеми, Алаш, Хонделен. В горных районах — в долинах рек Моген-Бурен, Каргы, Мугур, Бугузун и др.

Верификация прогнозных участков проводилась по космическим изображениям, нами использовался ресурс World Imagery, который предоставляет изображения Земли из космоса в рамках ПО ArcGIS-Online из источников: Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, GIS User Community. Визуально было обследовано около 150 спрогнозированных участков размером каждый 250×250 метров.

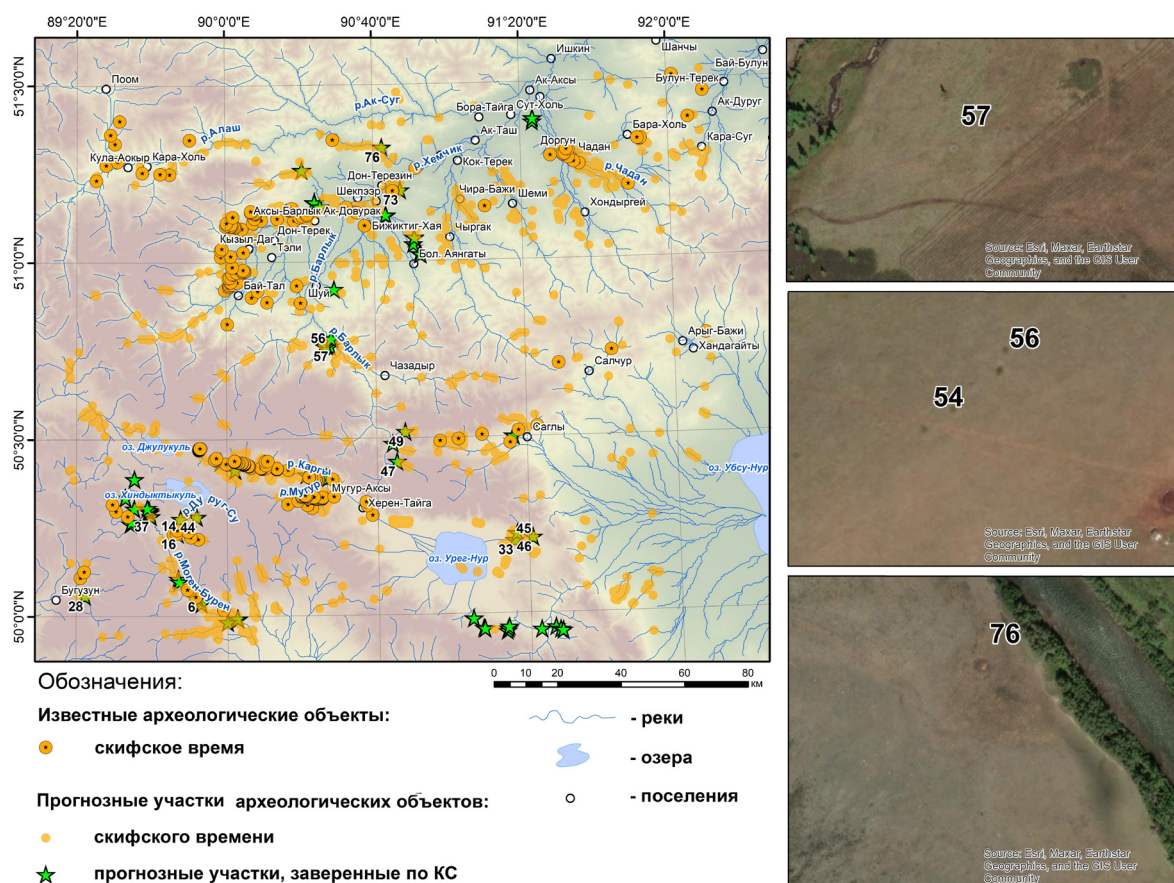


Рис. 4. Прогнозная карта возможных местонахождений археологических памятников скифского времени на основе нейросетевой модели на территории Юго-Западной Тувы и примеры результатов верификации прогноза по космическим снимкам высокого разрешения: 54, 56, 57 — р. Барлык; 76 — р. Алаш.

Fig. 4. Forecast map of possible locations of archaeological sites of the Scythian period based on a neural network model in the territory of Southwestern Tuva and examples of forecast verification results from high-resolution satellite images: 54, 56, 57 — Barlyk River; 76 — Alash River.

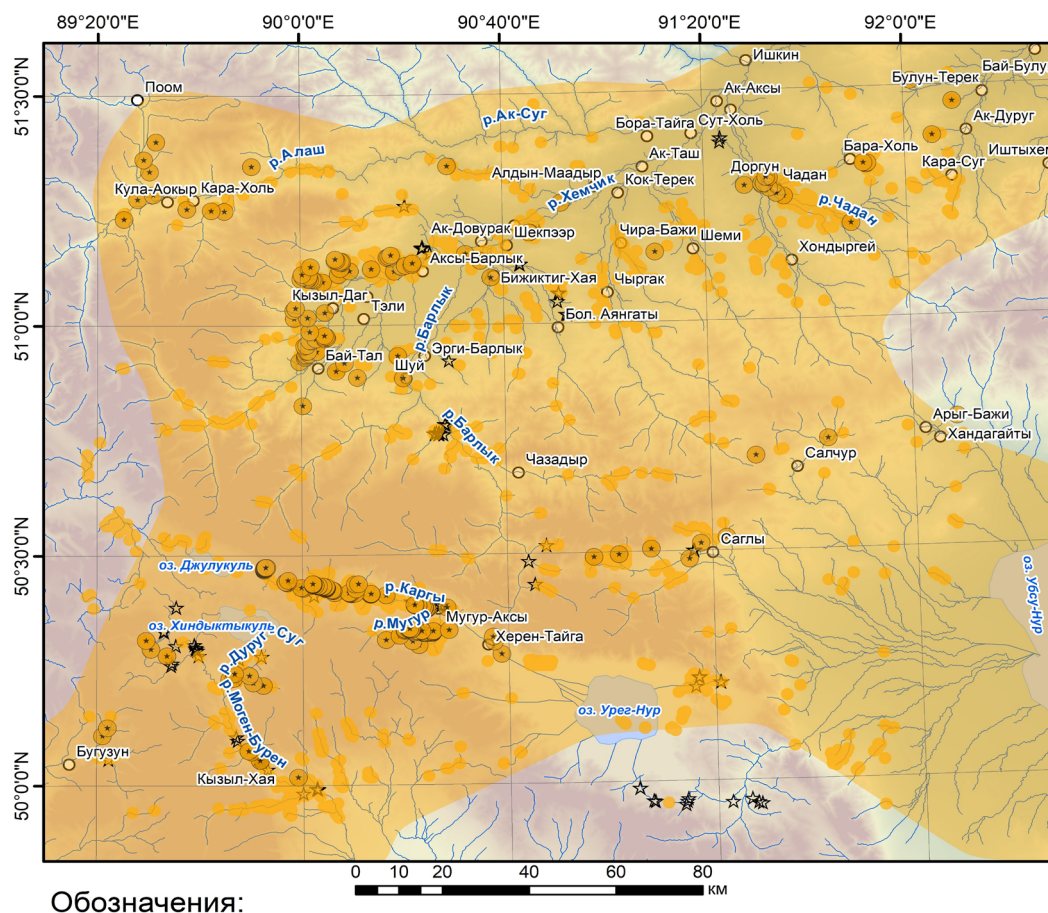
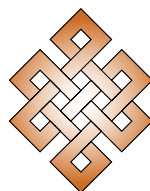
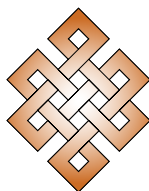


Рис 5. Схема района расселения древних народов по данным нейросетевого моделирования в скифское время на территории Юго-Западной Тувы. Составлена на основе Цифровой Модели Рельефа SRTM и данным полевых исследований авторов.
Fig. 5. The scheme of the area of settlement of ancient peoples according to neural network modeling in the Scythian period on the territory of Southwestern Tuva. Compiled based on the SRTM Digital Relief Model and the authors' field research data.

В 48-х случаях были обнаружены новые ранее неизвестные археологические объекты (курганы). Небольшое количество обследованных участков связано с отсутствием, в ряде случаев, хорошего качества космических изображений. Неисследованные археологические объекты, предположительно скифского периода, были обнаружены по долинам рек Барлык, Хемчик, Большие Аянгаты, Хонделен, Алаш, Моген-Бурен, Каргы, Мугур. Некоторые примеры приведены на рисунке 4. Прогнозная карта показала также участки, где могут находиться археологические объекты скифского времени в долинах рек Мугур и Каргы, где нами ранее были проведены детальные ландшафтно-археологические экспедиционные исследования, в ходе которых было обнаружено много памятников скифского периода (Глебова, Сергеев, 2024). Верификация прогнозных участков подтвердила полученные результаты, и фактическая прогнозная сила как отношение обнаруженных объектов на снимках к количеству просмотренных сцен, подсказанных нейросетью составила около 0.32, для сравнения (из опыта дешифрирования): прогнозная сила при дешифрировании космических снимков без ландшафтных модельных предположений составляет 0.02–0.1.



Основываясь на полученных данных составлена картосхема расселения древних народов, проживающих на территории Юго-Западной Тувы в скифское время (рис. 5). Карта составлена путем вычисления пространственной плотности фактических и спрогнозированных участков археологических объектов, аппроксимированных полиномом пятого порядка. Ареал расселения людей говорит о том, что люди осваивали, как горные, так и котловинные ландшафты, и рассмотренная территория в целом была хорошо освоена.

Заключение

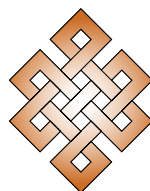
Проведенное научное исследование позволило выявлять местоположения с характерным набором ландшафтных характеристик присущих археологическим памятникам скифского периода. На основе полученных данных была создана и обучена искусственная нейронная сеть и построена прогнозная модель, которая позволила обнаружить новые археологические объекты.

Используя полученные данные в дальнейшем можно более обоснованно планировать экспедиционные маршруты в места наибольшего скопления археологических памятников и проводить детальные ландшафтно-археологические исследования. На основе пространственного анализа расположения прогнозных объектов возможно определять какие районы, и в какое историческое время были наиболее освоены, какие менее, при условии проверки результатов независимым способом и получения достаточной прогнозной силы. Независимые данные, полученные в ходе дешифрирования космических изображений легли в основу проверки работоспособности модели. Верификация прогнозных данных показала хороший результат, позволивший обобщить полученные данные в виде карты тренда плотности спрогнозированных участков, которая легла в основу схемы потенциального расселения человека по территории Юго-Западной Тувы в скифское время.

Таким образом, методы глубокого машинного обучения могут стать эффективным инструментом в историко-географических исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аржанцева, И. А., Вафеев, Р. А., Шуберт А., Харке Г. (2015) 3D-реконструкции комплекса Пор-Бажын (Тува) // Археология и геоинформатика. Вторая Международная конференция. Тезисы докладов. / отв. ред. Д. С. Коробов. М. : ИА РАН. 52 с. С. 9.
- Вайнштейн, С. И. (1958) Некоторые итоги работ археологической экспедиции Тувинского НИИЯЛИ в 1956–1957 гг. // Ученые записки ТНИИЯЛИ. Вып. 6 / отв. ред. Н. А. Сердобов Кызыл : Тув. кн. изд-во. 307 с. С. 217–237.
- Глебова, А. Б., Сергеев, И. С., Быков, Н. И. (2022) Геоинформационный анализ с построением модели нейронной сети для прогноза размещения археологических объектов в ландшафтах Юго-Восточного Алтая // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Т. 67. № 3. С. 491–514. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.306>
- Глебова, А. Б., Сергеев, И. С. (2024) Ландшафтная приуроченность археологических памятников в долинах р. Мугур и р. Каргы (Юго-Западная Тува) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Вып. 4. С. 695–715. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.405>
- Глебова, А. Б., Сергеев, И. С. И. С., Капкина, А. С., Паутова, Е. М. (2024) Прогнозирование местонахождений археологических объектов в ландшафтах Юго-Восточного Алтая на основе алгоритма нейронной сети // LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования. Материалы Международной научно-практической конференции : в 2-х т. / отв. ред. Д. А. Суббето, Ю. Л. Войтеховский, А. Н. Паранина. СПб. : Изд-во: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена Т. 1. 304 с. С. 99–103.
- Грач, А. Д. (1980) Древние кочевники в центре Азии. М. : Наука. 256 с.
- Дэвидсон-Пайлон, К. (2019) Вероятностное программирование на Python: байесовский вывод и алгоритмы. СПб. : Питер. 256 с.
- Кызласов, Л. Р. (1979) Древняя Тува (от палеолита до IX в.). М. : Изд-во Московского ун-та. 207 с.
- Мандельштам, А. М. (1992) Ранние кочевники скифского периода на территории Тувы // Степная полоса Азиатской части СССР в скифо-сарматское время. Археология СССР / отв. ред. М. Г. Мошкова М. : Наука. 494 с. С. 178–196.
- Маннай-оол, М. Х. (1964) Археологические памятники Тувы. Кызыл : Тувкнигоиздат. 46 с.
- Маннай-оол, М. Х. (1970) Тува в скифское время (уюкская культура). М. : Наука. 117 с.



Рукавишников, И. В., Рукавишников, Д. В., Морозов, П. А. (2015). Применение низковысотной аэрофотосъемки и геофизических методов при исследовании каменных курганов скифского времени в Турано-Уюкской котловине (Тува) // Археология и геоинформатика. Вторая Международная конференция. Тезисы докладов / отв. ред. Д. С. Коробов. М. : ИА РАН. 52 с. С. 30.

Савинов, Д. Г. (1994) Тува раннескифского времени «на перекрестке» культурных традиций (алды-бельская культура) // Культурные трансляции и исторический процесс: палеолит — средневековье / отв. ред. Д. Г. Савинов. СПб. : . Изд-во Санкт-Петербургского университета. 172 с. С. 76–89.

Самбу, И. У. (1994) Свод археологических памятников Республики Тыва. Кызыл : Респипография. 192 с.

Семенов, Вл. А. (1999) Синхронизация и хронология памятников алды-бельского типа в Туве // Итоги изучения скифской эпохи Алтая и сопредельных территорий / отв. ред. Ю. Ф. Кирюшин, А. А. Тишкин. Барнаул : Алтайский государственный университет. 284 с. С. 165–169.

Суразаков, А. С (1989) Об этнической интерпретации памятников пазырыкской культуры // Проблемы археологии скифо-сибирского мира: социальная структура и общественные отношения : в 2 ч. / отв. ред. В. Н. Добжанский. Кемерово : Кемеровский государственный университет (КемГУ). Ч. 2. 148 с. С. 44–47.

Шолле, Ф. (2018) Глубокое обучение на Python. СПб. : Питер. 400 с.

Caspari, G. (2020) Mapping and Damage Assessment of “Royal” Burial Mounds in the Siberian Valley of the Kings // *Remote Sensing*. Vol. 12(5). Article 773. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050773>

Chen, F., Zhou, R., Van de Voorde, T., Chen, X., Bourgeois, J., Gheyle, W., Yang, J., Xu, W. (2021) Automatic detection of burial mounds (kurgans) in the Altai Mountains // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 177. P. 217–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.010>

Hanani, A., Yakub, F., Azizan, A., Roslan, S., Shairatul, A. R., Ahmad, S. A., Muhammad, S. A. A. (2022) Review on Deep Learning Application for Detection of Archaeological Structures // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. Vol. 26, Issue 1. P. 7–14.

Soroush, M., Mehrtash, A., Khazraee, E., Jason, Ur A. (2020) Deep Learning in Archaeological Remote Sensing: Automated Qanat Detection in the Kurdistan Region of Iraq // *Remote Sensing*. Vol. 12:500. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030500>.

Vavulin, M. V., Chugunov, K. V., Zaitceva, O. V., Vodyasov, E. V. Pushkarev, A. A. (2021) UAV-based photogrammetry: Assessing the application potential and effectiveness for archaeological monitoring and surveying in the research on the ‘valley of the kings’ (Tuva, Russia) // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. Vol. 20. Article e00172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00172>

Verschoof-van der Vaart, L., K. (2021) Applying automated object detection in archaeological practice: A case study from the southern Netherlands. // *Archaeological Prospection*. Vol. 29 (341). P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1002/arp.1833>

Zhogova, A., Oleszczak, L., Michalczewski K., Pienkos I., Caspari, G. (2023) Identifying seasonal settlement sites and land use continuity in the prehistoric southern Siberian steppe — Zhelvak 5 (Tuva) // *Archaeological Research in Asia*. Vol. 35. Article 100467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ara.2023.100467>

Дата поступления: 14.04.2025 г.

Дата принятия: 21.05.2025 г.

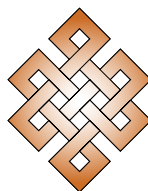
REFERENCES

Arzhantseva, I. A., Vafeev, R. A., Schubert, A. and Harke, G. (2015) 3D reconstructions of the Por-Bazhyn complex (Tuva). In: Korobov, D. S. (ed.) *Archaeology and Geoinformatics. Second International Conference. Abstracts of Papers*. Moscow, Institute of Archaeology RAS. 52 p. P. 9. (In Russ.)

Vainshtein, S. I. (1958) Some results of the archaeological expedition of the Tuvan Research Institute of Language, Literature and History in 1956–1957. In: Serdobov, N. A. (ed.) *Scholarly Notes of the Tuvan Research Institute of Language, Literature and History*. Issue 6. Kyzyl, Tuvan Book Publishing House. 307 p. Pp. 217–237. (In Russ.)

Glebova, A. B., Sergeev, I. S. and Bykov, N. I. (2022) Geoinformation analysis with the construction of a neural network model for predicting location of archaeological monuments in the landscapes of South-Eastern Altai. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, vol. 67, no. 3, pp. 491–514. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.306>

Glebova, A. B. and Sergeev, I. S. (2024) The landscape indication of archaeological sites in the valleys of the rivers Mugur and Kargy (Southwestern Tuva). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, no. 4, pp. 695–715. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.405>



Glebova, A. B., Sergeev, I. S., Kapkina, A. S. and Pautova, E. M. (2024) Predicting the location of archaeological sites in the landscapes of Southeastern Altai based on a neural network algorithm. In: Subbeto, D. A., Voitekhovskiy, Yu. L. and Paranina, A. N. (eds.) *LXXVII Herzen Readings. Geography: Development of Science and Education*. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: in 2 vols. St. Petersburg, Herzen State Pedagogical University of Russia. Vol. 1. 304 p. Pp. 99–103. (In Russ.)

Grach, A. D. (1980) *Ancient Nomads in the Center of Asia*. Moscow, Nauka. 256 p. (In Russ.)

Davidson-Pilon, C. (2019) *Probabilistic Programming in Python: Bayesian Inference and Algorithms*. St. Petersburg, Piter. 256 p. (In Russ.)

Kyzlasov, L. R. (1979) *Ancient Tuva (from the Paleolithic to the 9th century)*. Moscow, Moscow University Press. 207 p. (In Russ.)

Mandelshtam, A. M. (1992) Early nomads of the Scythian period in the territory of Tuva. In: Moshkova, M. G. (ed.) *The Steppe Zone of the Asian Part of the USSR in the Scythian-Sarmatian Period. Archaeology of the USSR*. Moscow, Nauka. 494 p. Pp. 178–196. (In Russ.)

Mannai-ool, M. Kh. (1964) *Archaeological Sites of Tuva*. Kyzyl, Tuvknigoizdat. 46 p. (In Russ.)

Mannai-ool, M. Kh. (1970) *Tuva in the Scythian Period (Uyuk Culture)*. Moscow, Nauka. 117 p. (In Russ.)

Rukavishnikova, I. V., Rukavishnikov, D. V. and Morozov, P. A. (2015) Application of low-altitude aerial photography and geophysical methods in the study of stone kurgans of the Scythian period in the Turano-Uyuk Basin (Tuva). In: Korobov, D. S. (ed.) *Archaeology and Geoinformatics*. Second International Conference. Abstracts of Papers. Moscow, Institute of Archaeology RAS. 52 p. P. 30. (In Russ.)

Savinov, D. G. (1994) Tuva of the Early Scythian period “at the crossroads” of cultural traditions (Aldy-Bel culture). In: Savinov, D. G. (ed.) *Cultural Translations and the Historical Process: Paleolithic–Middle Ages*. St. Petersburg, St Petersburg University Press, 172 p. Pp. 76–89. (In Russ.)

Sambu, I. U. (1994) *Corpus of Archaeological Sites of the Republic of Tuva*. Kyzyl, Restipografia. 192 p. (In Russ.)

Semenov, Vl. A. (1999) Synchronization and chronology of Aldy-Bel type sites in Tuva. In: Kiryushin, Yu. F. and Tishkin, A. A. (eds.) *Results of the Study of the Scythian Epoch of Altai and Adjacent Territories*. Barnaul, Altai State University. 284 p. Pp. 165–169. (In Russ.)

Surazakov, A. S. (1989) On the ethnic interpretation of the monuments of the Pazyryk culture. In: Dobzhansky, V. N. (ed.) *Problems of the Archaeology of the Scythian-Siberian World: Social Structure and Social Relations*: in 2 parts. Kemerovo, Kemerovo State University. Part 2. 148 p. Pp. 44–47. (In Russ.)

Chollet, F. (2018) *Deep Learning with Python*. St. Petersburg, Piter. 400 p. (In Russ.)

Caspari, G. (2020) Mapping and Damage Assessment of “Royal” Burial Mounds in the Siberian Valley of the Kings. *Remote Sensing*, vol. 12(5), article 773. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12050773>

Chen, F., Zhou, R., Van de Voorde, T., Chen, X., Bourgeois, J., Gheyle, W., Yang, J., Xu, W. (2021) Automatic detection of burial mounds (kurgans) in the Altai Mountains. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 177, pp. 217–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.010>

Hanani, A., Yakub, F., Azizan, A., Roslan, S., Shairatul, A. R., Ahmad, S. A., Muhammad, S. A. A. (2022) A Review on Deep Learning Application for Detection of Archaeological Structures. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 26, issue 1, pp. 7–14.

Soroush, M., Mehrtash, A., Khazraee, E., Jason, Ur A. (2020) Deep Learning in Archaeological Remote Sensing: Automated Qanat Detection in the Kurdistan Region of Iraq. *Remote Sensing*, vol. 12 (3), article 500, pp. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030500>

Vavulin, M. V., Chugunov, K. V., Zaitceva, O. V., Vodyasov, E. V. Pushkarev, A. A. (2021) UAV-based photogrammetry: Assessing the application potential and effectiveness for archaeological monitoring and surveying in the research on the ‘valley of the kings’ (Tuva, Russia). *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 20, article e00172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00172>

Verschoof-van der Vaart, L., K. (2021) Applying automated object detection in archaeological practice: A case study from the southern Netherlands. *Archaeological Prospection*, vol. 29 (341), pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1002/arp.1833>

Zhogova, A., Oleszczak, L., Michalczewski K., Pienkos I., Caspari, G. (2023) Identifying seasonal settlement sites and land use continuity in the prehistoric southern Siberian steppe — Zhelvak 5 (Tuva). *Archaeological Research in Asia*, vol. 35, article 100467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ara.2023.100467>

Submission date: 14.04.2025.

Acceptance date: 21.05.2025.