ИНФОРМАЦИОННЫЙ ОТЧЕТ

Наименование грантового проекта: «Поиск раннеславянских археологических памятников в бассейне Дона с помощью геоинформационных технологий и искусственного интеллекта».

Грантополучатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет».
Дата создания: 21.07.1994 г.
ОГРН 1023601560510
ИНН 3666029505
КПП 366601001
Юридический адрес: 394018, Воронежская область, город Воронеж, Университетская пл., д. 1
Фактический адрес: 394018, Воронежская область, город Воронеж, Университетская пл., д. 1
Ректор Ендовицкий Дмитрий Александрович.

Отчет о реализации проекта за период с «15» июня 2022 г. по «15» мая 2023 г., осуществленного за счет средств, полученных от Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» в рамках гранта Договору 14/2022-Р о предоставлении гранта от «08» июня 2022 г.

Научная новизна проекта *(согласно ТЗ проекта)***:**

Методика предиктивного моделирования широко используется в археологии специалистами США, Нидерландов, Германии для поиска древних поселений (GIS and archaeological site location modeling, 2006), однако, в России подобные исследования пока носят исключительный характер. В данном проекте впервые для российской археологии и регионов бассейна Верхнего Дона будет проведено предиктивное моделирование для поиска археологических памятников раннеславянского круга с использованием наиболее современных технологий искусственного интеллекта, апробированных в данной сфере – метода максимальной энтропии (MaxEnt) и свёрточных нейронных сетей (CNN). Предиктивное моделирование методом максимальной энтропии в археологию впервые было введено в 2019 г. (Wachtel et al., 2019). Опыт применения свёрточных нейронных сетей известен на примере выявления скифских курганов в степях Центральной Азии (Caspari et al., 2019).

По результатам проекта с большой вероятностью будут открыты новые места раннеславянских поселений III-V вв. н. э. (памятники типа Каширки-Седелок и типа Чертовицкое-Замятино). При этом для бассейна Верхнего Дона будет впервые сделана ГИС-реконструкция ландшафтов, существовавших 1400-1800 лет назад.

Социальная и/или экономическая значимость проекта *(согласно ТЗ проекта)***:**

Результаты проекта дадут возможность органам власти, землепользователям, строительным и другим организациям учитывать наличие археологических памятников в зоне их хозяйственного освоения и планировать свою деятельность, соблюдая закон №73-ФЗ от 25.06.2002 «Об объектах культурного наследия ...». Проект может быть масштабирован на другие регионы и археологические культуры. Немаловажно участие молодежи в исследовательской деятельности.

Цель (цели) проекта *(согласно ТЗ проекта)***:**

выявление наиболее вероятных местоположений поселений раннеславянского населения III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона по палеогеографическим условиям ландшафта с помощью геоинформационных технологий, машинного обучения и глубоких нейронных сетей.

Задачи проекта *(согласно ТЗ проекта)***:**

1. Создание географической базы данных известных археологических памятников середины III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона, а также ГИС-слоев, характеризующих

палеогеографические условия этой территории (по данным геологических, почвенных и ландшафтных карт, мультиспектральной и радиолокационной космической съемки).

2. Разработка и внедрение в археологию методик предиктивного моделирования на основе алгоритмов искусственного интеллекта, в частности метода максимальной энтропии и свёрточных нейронных сетей. Моделирование с их помощью потенциального размещения поселений III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона.
3. Проведение полевых археологических разведочных работ на местах наиболее вероятного расположения раннеславянских поселений, выявленных путем моделирования. Создание документации для внесения памятников в список выявленных для последующей постановки на государственную охрану.

I. Мероприятия и работы, выполненные в рамках проекта:

Подготовительный (камеральный) этап		
Плановый срок реализации:	15.06.2022–31.07.2022	
Фактический срок реализации:	14.06.2022–30.07.2022	
Место:		
Работы в рамках этапа:	Сбор, обработка и систематизация пространственных данных по известным в бассейне Верхнего Дона памятникам III-V вв. н.э. и палеогеографическим факторам среды.	
	Ответственные лица:	*Сарычев Д.В., Земцов Г.Л.*
	Участники:	*Сарычев Д.В., Земцов Г.Л., Горбунов А.С., Нестеров Ю.А.*
	Партнеры:	
	Результаты работ:	
	Даты работ или мероприятий:	
Задачи проекта, решенные в ходе работ или мероприятий этапа:	Создана географическая база данных «Памятники археологии середины III-V вв. н.э. бассейна Верхнего Дона», включившая сведения о 169 археологических памятника на основе данных Архива ИА РАН, архива государственной дирекции по культурному наследию Липецкой области и архива ЛГПУ имени П.П. Семенова-Тян-Шанского. Создана географическая база данных «Палеогеографические условия бассейна Верхнего Дона» на основе цифровых моделей рельефа, палеоклиматических данных PaleoClim, почвенных данных SoilGrids и геологических карт.	
Примечания:		
Этап моделирования		
Плановый срок реализации:	31.07.2022–31.08.2022	
Фактический срок реализации:	30.07.2022–30.08.2022	
Место:		
Работы в рамках этапа:	Разработка и тестирование методик предиктивного моделирования размещения раннеславянских поселений в зависимости от палеогеографических факторов среды.	
	Ответственные лица:	*Сарычев Д.В.*
	Участники:	*Сарычев Д.В., Земцов Г.Л., Горбунов А.С., Нестеров Ю.А.*
	Партнеры:	
	Результаты работ:	
	Даты работ или мероприятий:	

<table>
<tr><td>Задачи проекта, решенные в ходе работ или мероприятий этапа:</td><td>Разработаны и протестированы методики предиктивного моделирования размещения раннеславянских поселений в зависимости от палеогеографических факторов среды. Описана методика предиктивного моделирования археологических памятников на основе технологий искусственного интеллекта – методом машинного обучения по алгоритму MaxEnt и методом глубокого обучения с помощью свёрточных нейронных сетей Mask R-CNN.
Подготовлены 2 карты, отражающие потенциальные места расположения поселений III-V вв. н. э., полученные по результатам предиктивного моделирования.</td></tr>
<tr><td>Примечания:</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Экспедиционный этап</td></tr>
<tr><td>Плановый срок реализации:</td><td>01.09.2022–31.10.2022</td></tr>
<tr><td>Фактический срок реализации:</td><td>31.08.2022–30.10.2022</td></tr>
<tr><td>Место:</td><td>Липецкая область</td></tr>
<tr><td>Работы в рамках этапа:</td><td>Проведение полевых ландшафтно-археологических обследований наиболее вероятных мест расположения памятников III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона. Открытый лист будет заказан на участки территории Липецкой области, максимально интересные с позиции проверки результатов ГИС-моделирования.
<table>
<tr><td>Ответственные лица:</td><td>Земцов Г.Л.</td></tr>
<tr><td>Участники:</td><td>Земцов Г.Л., Сарычев Д.В., 8 волонтеров из числа студентов Воронежского государственного университета и Липецкого государственного педагогического университета им. П.П. Семенова-Тян-Шанского.</td></tr>
<tr><td>Партнеры:</td><td></td></tr>
<tr><td>Результаты работ:</td><td></td></tr>
<tr><td>Даты работ или мероприятий:</td><td></td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>Задачи проекта, решенные в ходе работ или мероприятий этапа:</td><td>Проведены полевые ландшафтно-археологические обследования наиболее вероятных мест расположения памятников III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона (Открытый лист оформлен на Земцова Г.Л., форма Открытого листа - проведение археологических разведок в целях выявления объектов археологического наследия, уточнения сведений о них при планировании мероприятий по обеспечению их сохранности с проведением локальных земляных работ (до 20 кв. м. на каждом выявленном объекте археологического наследия).
Выполнены фото и аэрофото-материалы в ходе полевых археологических обследований, съемка ГНСС-приемником.
Составлена карта бассейна Верхнего Дона с отмеченными на ней потенциальными местами размещения археологических памятников III-V вв. н. э. и местами проведения полевых обследований.</td></tr>
<tr><td>Примечания:</td><td>Внесли правки в Научный отчет: на странице 18 указано место сброса материалов разведки. Шурфы вскрывались пластами по 20 см. На странице 18 вставлено уточнение что почвенные слои фиксируются при изучении стратиграфии шурфов, они имеют разную толщину, природное или антропологическое происхождение. Исправленный файл пдф-копии научного отчета размещен в файлообменном облаке и доступен для просмотра и скачивания по ссылке - https://disk.yandex.ru/d/H4QY1m0GKOHcsg.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Отчетный этап</td></tr>
<tr><td>Плановый срок</td><td>01.11.2022–15.05.2023</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>реализации:</td><td></td></tr>
<tr><td>Фактический срок реализации:</td><td>31.10.2022–14.05.2023</td></tr>
<tr><td>Место:</td><td></td></tr>
<tr><td>Работы в рамках этапа:</td><td>Подготовка научных публикаций, интерактивных и бумажных карт, отчетов.
Ответственные лица: Сарычев Д.В., Земцов Г.Л., Горбунов А.С., Нестеров Ю.А.
Участники: Сарычев Д.В., Земцов Г.Л., Горбунов А.С., Нестеров Ю.А.
Партнеры:
Результаты работ:
Даты работ или мероприятий:</td></tr>
<tr><td>Задачи проекта, решенные в ходе работ или мероприятий этапа:</td><td>Создана интерактивная карта «Археологические памятники Верхнего Дона III-V вв. н.э.»
Подготовлено 5 научных статей.
Подготовлен научный отчет об археологических исследованиях для предоставления в Институт археологии РАН.
Подготовлен информационный отчет по проекту.
Подготовлена презентация проекта.</td></tr>
<tr><td>Примечания:</td><td>Географическая база данных (ГБД) "Памятники археологии середины III-V вв. н.э. бассейна Верхнего Дона" выполнена в формате GeoPackage - для повышения ее универсальности и читаемости мы продублировали содержащуюся в данной ГБД информацию об археологических памятниках в формат шейп-файла, читаемый большинством современных геоинформационных систем (работоспособность проверена в ГИС QGIS 3.30, ArcGIS Pro 3.2 и SAGA GIS 7.8), а также выгрузили ее содержание в электронную таблицу формата xlsx - данные доступны для просмотра и скачивания по ссылке - https://disk.yandex.ru/d/N3tWiE6j2CTvlw Также выполнено полное переформатирование созданной ГБД "Палеогеографические условия бассейна Верхнего Дона" для повышения ее универсальности и читаемости - вместо проприетарного формата реляционной БД *.gdb все ГИС-слои извлечены из БД и сконвертированы в формат GeoTIf, который может быть открыт любой современной географической информационной системой (работоспособность проверена в ГИС QGIS 3.30, ArcGIS Pro 3.2 и SAGA GIS 7.8), содержание всех ГИС-слоев подробно описано в сопровождающем файле электронной таблицы xlsx, согласно требованиям подготовки отчетной документации по грантам РГО. ГБД «Палеогеографические условия бассейна Верхнего Дона» с описаниями слоев доступна для просмотра и скачивания по ссылке</td></tr>
</table>

II. <u>Анализ результатов осуществления проекта:</u>

II.1. <u>Анализ соответствия проекта уставным Целям и Задачам Русского географического общества:</u>

Реализованный проект полностью соответствует уставным целям и задачам РГО в сфере исследования этнокультурной и исторической самобытности России, а также сохранения ее историко-культурного наследия (Раздел II, статья 2; статья 3, пункты 1, 3, 5, 7 устава РГО), в особенности пункту 3 – «Сохранение, использование и популяризация географического, исторического и культурного наследия России …» и 7 – «Содействие сохранению природного и культурного наследия …».

II.2. Анализ хода реализации и достижения целей проекта:

Рабочий план проекта выполнен полностью. Цель состояла в выявлении наиболее вероятных местоположений поселений раннеславянских археологических культур середины III-V вв. н. э. в бассейне Верхнего Дона по палеогеографическим условиям ландшафта с помощью геоинформационных технологий, машинного обучения и глубоких нейронных сетей. В ходе реализации проекта были решены следующие задачи:

1. Создана географическая база данных известных археологических памятников середины III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона, а также подготовлены ГИС-слои, характеризующие палеогеографические условия этой территории.

2. Разработана методика предиктивного археологического моделирования на основе технологий искусственного интеллекта (алгоритмы максимальной энтропии и свёрточных нейронных сетей), с апробацией на примере поиска археологических памятников типа Каширки-Седелок в бассейне Верхнего Дона.

3. Проведены полевые археологические разведочные работы на местах наиболее вероятного расположения раннеславянских поселений, выявленных путем моделирования.

Поставленные цель и задачи проекта выполнены, ход их реализации и полученные результаты изложены в научных статьях и научном отчете об археологических исследованиях, основные положения представлены далее.

Методы и подходы:

Методика предиктивного моделирования широко используется в археологии специалистами США, Нидерландов, Германии для поиска древних поселений, однако, в России подобные исследования пока носят исключительный характер. В данном проекте впервые для российской археологии и регионов бассейна Верхнего Дона было проведено предиктивное моделирование для поиска археологических памятников раннеславянского круга с использованием наиболее современных технологий искусственного интеллекта, апробированных в данной сфере – метода максимальной энтропии (MaxEnt) и свёрточных нейронных сетей (CNN).

Путем анализа археологических отчетов и публикаций, а также специальных полевых работ, нами были собраны в географическую базу данных сведения о местоположениях 169 археологических памятников III-V вв. н. э., известных в бассейне Верхнего Дона. Для каждого памятника указывали класс точности определения его координат: 1 – «точно», определены по ГНСС-навигатору, проверено авторами на местности (51 памятник); 2 – «точно», координаты взяты из отчетов, без проверки на местности (27 памятников); 3 – «приблизительно», по описаниям местоположения из отчетов, без проверки на местности (76 памятников); 4 – «не точно», местоположение в отчете описано неясно (15 памятников). Для обучения предиктивных моделей искусственного интеллекта использовали выборку 78 памятников, координаты которых определили с наибольшей точностью (классы 1, 2), остальные точки с менее надежной географической привязкой – 91 памятник (классы 3, 4) – использовали в целях тестирования моделей.

В качестве географических предикторов для моделей мы сформировали 23 ГИС-слоя на бассейн Верхнего Дона, прямо или косвенно отражающие палеогеографические условия ландшафта в исследуемый период: геоморфологические и гидрографические предикторы подготовили на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) MERIT DEM; геологические предикторы – по картам четвертичных отложений; климатические предикторы – по палеоклиматическим данным PaleoClim; почвенные предикторы – по данным SoilGrids. ЦМР в исходном виде с разрешением 90 м/пикс использовали как предиктор «абсолютная высота», а также получили на ее основе растры уклона, экспозиции и профильной кривизны местности по алгоритму Зевенбергена-Торна. Для классификации рельефа по формам применили индекс топографической позиции (TPI), а также выделение «геоморфонов». Дополнительно рассчитали топографический индекс влажности (TWI), индекс тепловой обеспеченности (HLI), индекс ветровой экспозиции (WEI). Также с помощью инструментов гидрологического моделирования был построен векторный слой палеогидрографической сети, по которому рассчитаны производные растры-предикторы: «близость водотока», «близость места слияния водотоков» и

«высота над ближайшим водотоком». В дополнение к описанным предикторам учитывали геологические, климатические и почвенные факторы. Так, ареалы подстилающих пород на бассейн Верхнего Дона были оцифрованы по геологическим картам четвертичных отложений областей ЦФО масштаба 1:500000. На их основе сгенерировано два растра-предиктора: «генетический тип четвертичных отложений» и «близость выходов дочетвертичных отложений». Возможные палеоклиматические факторы размещения исследуемых поселений учитывали по данным PaleoClim «Anthropocene, v1.2b» – было выбрано 5 основных биоклиматических переменных в максимальном разрешении: «среднегодовая температура», «температурная сезонность», «годовая амплитуда температур», «годовые осадки» и «сезонность осадков». Почвенные факторы внесли в модели с помощью данных SoilGrids, из которых взяли наиболее стабильные во времени показатели по мелкозёмной фракции: «доля глинистых частиц», «доля частиц песка», «доля илистых частиц», а также «содержание органического углерода почвы» – при этом использовали показатели с глубины 30-60 см, соответствующей средней глубине концентрации находок интересующего времени в исследуемом регионе. Все полученные таким образом 23 слоя-предиктора были приведены к единому пространственному охвату и растеризованы по сети ячеек, соответствующей основе ЦМР, затем объединены в композитный растр. При подготовке геоданных применяли ГИС: QGIS 3.26, SAGA GIS 7.8.2 и ArcGIS Pro 3.0.3.

Моделирование по подготовленным данным выполнялось с помощью двух технологий искусственного интеллекта – методом максимальной энтропии (MaxEnt) и с помощью сверточных нейронных сетей (CNN):

1. Моделирование методом максимальной энтропии выполняли в программе MaxEnt 3.4.4. Отладку модели производили итеративно (до достижения порога сходимости 10-5 или ограничения в 500 итераций) с бутстрэп-генерацией новых обучающих и тестовых выборок. В качестве мест «псевдоотсутствия» использовали 25000 случайных фоновых точек в 5-километровой буферной зоне от точек известных памятников. Наилучшую с технической точки зрения комбинации настроек модель подбирали по минимальному скорректированному информационному критерию Акаике (AICc) с помощью ENMeval 2.0.4 в среде R. В частности, определяли наилучший коэффициент регуляризации и комбинацию числовых признаков — линейных, квадратичных, их производных и нелинейных — для аппроксимации связей с предикторами. Оценку прогностической способности моделей проводили по стандартному критерию AUC (площадь под ROC-кривой). На основе обучающего и тестового наборов точек рассчитывали, соответственно, AUCtrain и AUCtest. Дополнительную оценку качества модели проводили по непрерывному индексу Бойса (CBI) в ENMeval 2.0.4. Значимость предикторов в построении модели определяли по показателю «важность при пермутации» и методом «складного ножа». Результаты моделирования выводили в формате «Cloglog» (комплементарная лог-лог модель), при котором пиксели выходного растра выражают потенциальную пригодность местности для размещения поселений исследуемого типа в континуальной вероятностной шкале от 0 до 1. Пересчет этих значений в бинарную форму, с целью выделения условно пригодных территорий и расчета метрик эффективности моделирования, выполняли по порогу 10-го процентиля. На основе полученной бинарной формы прогноза рассчитали основную метрику эффективности предиктивного археологического моделирования — «Прирост Квамме» (Kvamme’s Gain — KG).

2. В качестве нейросетевых моделей глубокого обучения использовали свёрточные нейронные сети RetinaNet, SSD, YOLO, Mask RCNN для объектной и инстанс-сегментации изображений. Для их обучения создали специальный «тренировочный» набор данных: разметили многоканальный растр-предиктор с помощью 78 точек археологических памятников первого и второго классов точности и разбили его на тайлы 512x512 мультипикселей, при этом сохранив тайлы, в которые попали памятники, в форматы соответствующих нейросетевых фреймворков. Аналогичным образом был создан «тестовый» набор данных – по выборке точек третьего и четвертого классов точности (91 памятник). Подготовку данных, обучение и тестирование моделей выполняли с помощью модуля arcgis.learn пакета arcpy в среде Python. Из-за использования критически малых выборок объектов, при обучении каждой модели следили за

метрикой ошибки (Loss) по тренировочной и тестовой выборкам во избежание переобучения моделей: обучение останавливали, если метрика ошибки по тестовой выборке начинала существенно расти при стабильной или снижающейся ошибке по тренировочной выборке. Также обучение завершали, если показатели модели не улучшались более пяти эпох подряд, не дожидаясь переобучения. Использовался мультиспектральный режим анализа, для учета моделью всех 23 каналов (изображений-предикторов) в каждом тайле. Наилучшую из моделей выбирали по метрике средневзвешенной точности (average precision - AP). По результатам обучения на имеющихся данных лучшие показатели были получены с использованием Mask RCNN при 180 эпохах обучения модели – AP достигла 81,9 %. Обученную таким образом модель Mask RCNN использовали для анализа многоканального растра-предиктора на весь бассейн Верхнего Дона. В результате модель выявила местоположения известных памятников и более 120 дополнительных похожих мест, около 50 из которых, по экспертной оценке, наиболее вероятно могли быть использованы для размещения поселений типа Каширки-Седелок.

Археологическое исследование проводилось с целью проверки результатов, полученных с помощью ИИ. По результатам моделирования были выбраны участки с наибольшей вероятностью обнаружения археологических памятников в Лебедянском, Тербунском и Задонском районах Липецкой области на основе модели MaxEnt. Обследование проводилось в границах небольших участков, выявленных нейросетью Mask RCNN. Археологические исследования выполняли в соответствии с Положением о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчетной документации, утверждённым постановлением Бюро Отделения историко-филологических наук Российской академии наук от 20.06.2018 г. №32. Осуществлялся визуальный осмотр местности на предмет читаемых в рельефе объектов археологического наследия – курганов, валов, рвов, площадок и т.п. После изучения рельефа тщательно осматривались имеющиеся нарушения дневной поверхности – пашня, обнажения и разрытия как антропогенного, так и естественного характера. Осмотр сопровождался фотофиксацией. Границы обнаруженных археологических памятников устанавливали шурфами. Шурфы ориентировали по сторонам света. Их вскрытие велось горизонтальными пластами, глубиной 20 см. Гумусный горизонт тщательно просматривался на предмет наличия археологического материала. При расчистке гумусного слоя велся полевой дневник для фиксации всех необходимых наблюдений. Площадь заложенных шурфов определялась с учетом методической рекомендации минимального вскрытия культурного слоя при производстве разведочных археологических работ. Все этапы разработки шурфов фиксировались фотографически. Фотографировались места заложения шурфов, дневная поверхность на месте заложения с разметкой, виды шурфа после вскрытия гумусового горизонта и зачистки по материку, стенки шурфа и контрольный прокоп. В случае отсутствия признаков объекта археологического наследия фиксировалась одна, наиболее выразительная с точки зрения стратиграфии стенка шурфа. После окончания работ шурфы были засыпаны. Выявленные археологические материалы были очищены, зашифрованы. Координатная привязка шурфов и границ выявленных объектов археологического наследия выполнялась в системах WGS-84 и МСК-48 с помощью GNSS-станции Stonex S800A. Работы выполнялись на основании Открытого листа № 2450-2022 выданного Министерством культуры РФ на имя Земцова Григория Леонидовича (срок действия с 8 сентября по 31 декабря 2022 г.).

Научные мероприятия:

Полученные в ходе реализации проекта научные результаты были защищены на XIV Международной ландшафтной конференции «Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии» 17-21 мая 2023 г., Воронеж – 2 устных доклада, публикация 2 статей.

Всего по итогам проведенных исследований подготовлено 5 научных статей, в том числе статья в журнал перечня ВАК и 4 статьи в сборники научных трудов (библиографические ссылки приведены в разделе «Научные результаты»).

Степень реализации рабочего плана:

Рабочий план проекта выполнен полностью, его реализация проходила без изменений.

Трудности:

Принципиальных трудностей в ходе исследовательских работ не возникало.

Достаточность ресурсов:

В целом, запланированных на реализацию проекта ресурсов достаточно для реализации поставленных целей и задач.

II.3. Анализ эффективности проекта:

Научный эффект: в сфере исторической географии – разработана и проверена методика выявления потенциальных местоположений древних поселений; в сфере археологии – картографированы памятники III-V вв. н.э. на территории Верхнего Дона и определены закономерности в их расположении.

Социальный эффект: результаты проекта дают дополнительную возможность органам власти, землепользователям, строительным и другим организациям учитывать наличие археологических памятников в зоне их хозяйственного освоения и планировать свою деятельность, соблюдая закон от 25.06.2002 №73-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации».

Образовательный эффект: в проекте приняли участие студенты географических и исторических специальностей, они познакомились с особенностями полевой работы профессиональных археологов и географов, а также внесли свой вклад в изучение родного края.

Полученные в ходе работы фактические сведения и методический опыт способны повысить эффективность подобных проектов в будущем, обеспечить основу для выявления и охраны объектов археологического наследия в регионах России.

II.4. Выводы:

Научные результаты:

1. Систематизированы и уточнены сведения о географии археологических памятников III-V вв. н.э. известных в бассейне Верхнего Дона, при этом создана уникальная база данных, включившая информацию о 169 археологических памятниках исследуемого времени.
2. Проведена геоинформационная реконструкция палеогеографических условий среды на территории бассейна Верхнего Дона, при этом подготовлен уникальный набор из 23 ГИС-слоев, отражающих геологические, геоморфологические, палеоклиматические, палеогидрографические и почвенные характеристики ландшафтов исследуемой территории.
3. Разработана методика предиктивного археологического моделирования с применением технологий искусственного интеллекта (алгоритмы MaxEnt, CNN).
4. Путем моделирования методом MaxEnt в бассейне Верхнего Дона с высокой статистической надежностью (AUC = 0,92, прирост Квамме KG = 0,97) выявлено 29860 га наиболее пригодных участков (менее 1 % от исследуемой территории) для размещения памятников позднеримского времени.
5. Из широко используемых нейросетевых фреймворков эмпирически установлено существенное превосходство архитектуры Mask RCNN по точности в задаче предиктивного археологического моделирования при малой обучающей выборке (средневзвешенная точность AP = 82%). С помощью созданной нейросетевой моделии в бассейне Верхнего Дона было выявлено 50 наиболее вероятных точек размещения еще не открытых поселений позднеримского времени.
6. Полевая проверка выявленных искусственным интеллектом мест возможного расположения древних поселений позволила открыть в бассейне Верхнего Дона 3 ранее неизвестных объекта археологического наследия: всего было обследовано три участка, заложено 12 шурфов, выявлено три памятника типа Каширки-Седелок, середина-конец III – начало IV в. н.э.

Материальные результаты:

В соответствии с техническим заданием проекта, получены следующие основные материальные результаты:

1. Географическая база данных (ГБД) «Памятники археологии середины III-V вв. н.э. бассейна Верхнего Дона». Содержит информацию о 169 памятников археологии середины III-V вв. н.э. в регионах бассейна Верхнего Дона. ГБД имеет поля с описанием для каждого памятника его географического положения и размера (координаты и точность их определения), поля с названием памятника, его типом, поля со сведениями об авторах обследований и иными примечаниями.
2. Географическая база данных «Палеогеографические условия бассейна Верхнего Дона». Содержит 23 ГИС-слоя («Абсолютная высота, м над у. м.», «Уклон местности, °», «Экспозиция склона», «Профильная кривизна», «Индекс топографической позиции», «Топографический индекс влажности», «Индекс тепловой нагрузки», «Индекс ветровой экспозиции», «Форма рельефа», «Близость водотока, м», «Близость места слияния водотоков, м», «Высота над ближайшим водотоком, м», «Генетический тип четвертичных отложений», «Близость выходов дочетвертичных отложений, м», «Среднегодовая температура, °С», «Температурная сезонность», «Годовая амплитуда температур, °С», «Годовые осадки, мм/год», «Сезонность осадков», «Доля глинистых частиц (< 0,002 мм) в мелкоземной фракции, %», «Доля частиц песка (> 0,05 мм) во фракции мелкозема, %», «Доля илистых частиц (≥ 0,002 мм и ≤ 0,05 мм) в мелкоземной фракции, %», «Содержание органического углерода почвы в мелкоземной фракции, г/кг»), реконструирующие условия геоморфологии, гидрографии, почвенного, растительного и ландшафтного покрова в бассейне Верхнего Дона в III-V вв. н.э., с пространственным разрешением карт (растровых ГИС-слоев) 90 м/пиксель.
3. Методика предиктивного моделирования археологических памятников на основе технологий искусственного интеллекта. Описана созданная и апробированная методика выявления потенциальных местоположений древних поселений по комплексу параметров ландшафта с помощью алгоритмов максимальной энтропии (MaxEnt) и свёрточных нейронных сетей (CNN).
4. Интерактивная карта «Археологические памятники Верхнего Дона III-V вв. н.э.». Отражает известные памятники позднеримского времени в бассейне Верхнего Дона и вероятные местонахождения еще не открытых объектов этого времени, спрогнозированные методами искусственного интеллекта.
5. Научные статьи – по результатам реализации проекта подготовлены 5 публикаций:

– Сарычев Д.В., Земцов Г.Л. Предиктивное археологическое моделирование методом максимальной энтропии (на примере поселений позднеримского времени в бассейне Верхнего Дона) // Историко-географический журнал. 2023 Т. 2 № 1 С. 6–23. – DOI: 10.58529/2782-6511-2023-2-1-6-23

– Сарычев Д.В., Земцов Г.Л. Выявление археологических памятников методом ландшафтно-археологического предиктивного моделирования с помощью свёрточных нейронных сетей // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения : материалы XIV Международной ландшафтной конференции. – Издательский дом ВГУ, 2023. – Т.2. – С. 157-159. – DOI:10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-157-159

– Михно В.Б., Быковская О.П., Горбунов А.С. Ландшафтогенез как фактор развития и дифференциации ландшафтов // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения : материалы XIV Международной ландшафтной конференции. – Издательский дом ВГУ, 2023. – Т.1. – С. 90-93. – DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-90-93

– Земцов Г.Л., Сарычев Д.В. Поиск памятников III - IV вв. н.э. на территории Липецкой области // Археологические исследования Центрального Черноземья 2022. – в печати (справка от 22.04.2023, ООО «Экспертиза Черноземья»).

– Земцов Г.Л., Сарычев Д.В. Общественные отношения на верхнем дону в позднеримское время (конец III – начало IV вв.) // Междуречье Днепра и Дона: культурный слой, артефакт, интерпретация. – в печати (справка №003 от 28.04.2023, Курский государственный областной музей Археологии).

6. Научный отчет об археологических исследованиях на основании Открытого листа, представляемый в Институт археологии РАН.

Новые знания и технологии:

В результате реализации проекта получены новые знания в области географии расселения археологических культур раннеславянского круга в III-V вв. н.э. в бассейне Верхнего Дона, а также разработана методика предиктивного археологического моделирования на основе технологий искусственного интеллекта. При этом впервые в практике российской археологии применены алгоритм максимальной энтропии и глубокие свёрточные нейросети. Итогом проведенных работ стали апробированные методики, наборы геоинформационных слоев, детальные электронные карты и база данных по объектам археологического наследия в бассейне Верхнего Дона.

Практическое использование:

Результаты проекта будут использованы при планировании археологических разведок в регионе, а также для проведения полномасштабных археологических раскопок на открытых в ходе проекта местах древних поселений. Информационно-методическая база проекта, заложенная при поддержке РГО, будет использована для исследования и сохранения объектов историко-культурного наследия в регионах бассейна Верхнего Дона, а также для изучения соседних регионов и иных археологических культур.

III. Освещение деятельности по проекту в СМИ:

№	СМИ / сайт / портал	Ссылка	Заголовок	Дата
1	сайт Воронежского государственного университета	http://www.vsu.ru/ru/news/feed/2022/08/15227	Преподаватель ГГиТ ВГУ Дмитрий Сарычев: «Археологические разведки – это поиск научных сокровищ»	15.08.2022
2	газета «Воронежский университет» №10	http://www.vsu.ru/ru/publishing/npvu/docs/vsu_202210.pdf - Приложен скан публикации	Назад в будущее: как искусственный интеллект помогает археологам заглянуть в древние поселения	31.10.2022
3	сайт РГО. Воронежское областное отделение	https://www.rgo.ru/ru/article/iskusstvennyy-intellekt-ishchet-poseleniya-rannih-slavyan-na-donu	Искусственный интеллект ищет поселения ранних славян на Дону	15.12.2022
4	Информационно-справочный портал СМИ Липецкой области «Липецкмедиа»	https://lipetskmedia.ru/news/society/iskusstvennyy-intellekt-ukazal-arkheologam-na-50-drevnikh-dereven-v-lipetskoy-oblasti/	Искусственный интеллект указал археологам на 50 древних деревень в Липецкой области	22.01.2023
5	группа социальной сети Вконтакте	https://vk.com/exped_poisk?w=wall-119951588_1752	«Поиск»: археология и этнография славян»	19.05.2023

IV. Научные публикации по проекту:

1. Сарычев Д.В., Земцов Г.Л. Предиктивное археологическое моделирование методом максимальной энтропии (на примере поселений позднеримского времени в бассейне Верхнего Дона) // Историко-географический журнал. 2023 Т. 2 № 1 С. 6–23. – DOI: 10.58529/2782-6511-2023-2-1-6-23
2. Сарычев Д.В., Земцов Г.Л. Выявление археологических памятников методом ландшафтно-археологического предиктивного моделирования с помощью свёрточных нейронных сетей // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения : материалы XIV Международной ландшафтной конференции. – Издательский дом ВГУ, 2023. – Т.2. – С. 157-159. – DOI:10.17308/978-5-9273-3693-7-2023-157-159
3. Михно В.Б., Быковская О.П., Горбунов А.С. Ландшафтогенез как фактор развития и дифференциации ландшафтов // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения : материалы XIV Международной ландшафтной

конференции. – Издательский дом ВГУ, 2023. – Т.1. – С. 90-93. – DOI:10.17308/978-5-9273-3692-0-2023-90-93

4. Земцов Г.Л., Сарычев Д.В. Поиск памятников III - IV вв. н.э. на территории Липецкой области // Археологические исследования Центрального Черноземья 2022. – в печати (справка от 22.04.2023, ООО «Экспертиза Черноземья»).
5. Земцов Г.Л., Сарычев Д.В. Общественные отношения на верхнем дону в позднеримское время (конец III – начало IV вв.) // Междуречье Днепра и Дона: культурный слой, артефакт, интерпретация. – в печати (справка №003 от 28.04.2023, Курский государственный областной музей Археологии).

V. Приложения:

1. Научный отчет;
2. Электронная презентация проекта;
3. Печатная презентация проекта;
4. Фотоархив;
5. Веб-сайт «Материалы к отчету по гранту РГО Договор № 14_2022-Р».

VI. Считаете ли Вы возможным и необходимым в дальнейшем самостоятельно продолжать работу в поддержанном Русским географическим обществом направлении?

Дальнейшие исследования в поддержанном Русским географическим обществом направлении авторы проекта считают возможными и необходимыми. Для сохранения объектов археологического наследия требуется их предварительное выявление на местности. Разработанные в данном проекте методы предиктивного археологического моделирования были эффективно апробированы на примере поселений археологических культур раннеславянского круга в бассейне Верхнего Дона. Проект показал перспективность разработанных методических подходов и возможность их масштабирования как на другие территории, так и на иные археологические культуры. При поддержке Русского географического общества удалось достичь главного – на основе современных технологий ГИС и ИИ внедрить эффективные методики предиктивного моделирования в практику отечественной археологии. Результаты применения разработанных методик важны в сфере выявления и охраны объектов историко-археологического наследия в первую очередь Липецкой, Воронежской, Орловской и Курской областей. Продолжение данного проекта авторы видят в расширении географии и исследуемых археологических культур. Созданные по результатам работ модели ИИ для предиктивного археологического моделирования, базы данных и интерактивные карты археологических памятников позднеримского времени в бассейне Верхнего Дона будут поддерживаться и обновляться на базе новых полевых данных. Для этих целей авторы планируют проведение нового цикла полевых верификационных работ и последующего дообучения моделей ИИ. Таким образом, авторский коллектив не только считает целесообразным дальнейшее продолжение работ по подержанному РГО проекту, но и уже ведет работы в этом направлении. Грант Русского географического общества позволил реализовать наиболее затратные задачи проекта, что сформировало фундамент для его дальнейшего развития без дополнительного финансирования.

VII. Пожелания:

Русское географическое общество оказало неоценимую помощь в развитии проекта. Вместе с искренней благодарностью, авторы выражают пожелание отслеживать судьбу поддержанных проектов спустя один-два года после официального завершения их грантовой поддержки. Некоторые проекты, подобные данному, за этот срок способны дать результаты, которые не успевают появиться в первый год. Так, благодаря поддержке РГО, по результатам нашего проекта будет проведено несколько десятков полевых археологических разведок, в бассейне Дона будут открыты новые объекты археологического наследия, выйдут несколько обобщающих научных работ.

Подтверждаем, что все указанные в данном отчете сведения нами проверены и являются верными.