

Геоинформационный анализ с построением модели нейронной сети для прогноза размещения археологических объектов в ландшафтах Юго-Восточного Алтая*

А. Б. Глебова¹, И. С. Сергеев¹, Н. И. Быков²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² Институт водных и экологических проблем СО РАН, Российская Федерация, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1

Для цитирования: 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*, 67 (3), 491–514. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.306>

Статья посвящена выявлению ландшафтных закономерностей расположения археологических памятников в Юго-Восточном Алтае с использованием геоинформационной системы (ГИС) и машинного обучения. На основе литературных источников, собственных полевых исследований авторов составлена информационная база данных археологических памятников Юго-Восточного Алтая. С использованием геоинформационного анализа рельефа территории и имеющихся археологических данных созданы схемы распределения археологических объектов по некоторым ландшафтным признакам: абсолютной высоте, положению относительно водотоков, уклонам, экспозиции, интенсивности солнечной радиации за июнь, интенсивности солнечной радиации за декабрь. Полученные статистические закономерности распределения археологических памятников в ландшафтах Юго-Восточного Алтая явились отчасти основой для создания и верификации алгоритма модели машинного обучения — нейронной сети. По результатам составлена прогнозная карта расположения археологических объектов. Наибольшую вероятность обнаружения новых археологических объектов могут обеспечить следующие ландшафтные параметры: не далее чем 500–600 м от реки с крутизной склона до 5°, с высокой интенсивностью летней (июнь) солнечной радиации и с южной, юго-восточной и западной экспозицией склонов. Неисследованные археологические объекты в Юго-Восточном Алтае наиболее вероятно расположены по долинам рек в среднем и нижнем течении, в местах слияния рек, по периферии межгорных котловин или на широких равнинных участках надпойменных террас речных долин. Полученные данные позволяют оценить вклад ландшафтных признаков в простран-

* Сбор материалов осуществлен в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН «Природные и природно-хозяйственные системы Сибири в условиях современных вызовов: диагностика состояний, адаптивные возможности, потенциал экосистемных услуг» (№ 0306-2021-0007). Аналитическая работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ проект № 19-05-00535 «Природные катастрофы и трансформация ландшафтов юго-восточного Алтая и северо-западной Монголии в период с максимума последнего оледенения».

ственном размещении культовых сооружений древних народов и предоставляют возможности для поиска новых археологических объектов.

Ключевые слова: ландшафт, археологические памятники, геоинформационные системы, цифровая модель рельефа, нейронная сеть, Юго-Восточный Алтай.

1. Введение

География расселения человечества, особенно в древнее время, сильно зависела от ландшафтных факторов, так как хозяйственная деятельность населения была неразрывно связана с природными условиями. Особенно это относится к горным территориям, таким как, например, Юго-Восточный Алтай. Несмотря на длительную историю освоения территорий, часто ощущается недостаток прямых письменных свидетельств о событиях прошлого, а нередко есть только косвенная информация, основанная на сопоставлении размещения археологических объектов с природными чертами местности. Поэтому при поиске и анализе мест размещения древних культур можно говорить о наличии ландшафтных предпочтений народов, связанных с ведением хозяйства, коммуникацией и даже эстетическими потребностями людей. Исходя из этого, для поиска закономерностей местоположений необходимо выполнить анализ некоторого набора ландшафтных признаков для уже известных археологических объектов. Предлагаемая методика построения модели нейронной сети для прогноза размещения археологических объектов в ландшафтах Юго-Восточного Алтая включает в себя: составление информационной базы данных археологических памятников и объектов; выявление ландшафтных закономерностей на основе морфометрического анализа цифровой модели рельефа; выполнение статистического ГИС-анализа ландшафтных закономерностей для местоположений археологических памятников в Юго-Восточном Алтае; построение модели расположения археологических памятников на основе алгоритма нейронной сети. Результатом исследования стало создание прогнозной карты расположения археологических объектов.

Юго-Восточный Алтай представляет собой горную территорию с абсолютными высотами от 1500 до 4356 м (Алтайский край..., 1978), сочетающую хребты и межгорные котловины (Чуйская, Курайская, Бертекская).

Юго-Восточный Алтай расположен в зоне континентального климата, характеризуется продолжительной холодной зимой с ясной сухой погодой и коротким летом. Годовая амплитуда температуры воздуха по абсолютным экстремумам может достигать 90 °С. Зима в котловинах Курайской и Чуйской малоснежная и морозная, средняя температура января составляет –28 °С, в Чуйской степи был зафиксирован абсолютный минимум –62.0 °С (табл. 1) (Научно-прикладной справочник..., 1993). Зимой часты ветры, сдувающие незначительный снежный покров в микропонижения. Лето непродолжительное и холодное. Общий период отсутствия мороза составляет около 55–60 дней. Наиболее суровые климатические условия в Чуйской котловине, где температура воздуха в январе может опускаться до –32.1 °С. Кроме того, Юго-Восточный Алтай находится в области недостаточного увлажнения. В Чуйской котловине годовое количество осадков минимальное для всего Алтая и составляет от 70 до 170 мм, на плоскогорье Укок выпадает от 150 до 300 мм, в Курайской котловине — около 200 мм (Михайлов и др., 2013).

Таблица 1. Температура воздуха и годовое количество осадков на метеостанциях Юго-Восточного Алтая

Метеостанция	Абс. высота, м	Температура воздуха, январь, °С	Температура воздуха, июль, °С	Температура среднегодовая, °С	Абс. max, °С	Абс. min, °С	Средняя сумма осадков, мм
Кош-Агач	1759	-32.1	13.8	-6.7	31.0	-62.0	110
Бертек	2251	-23.9	8.0	-8.5	-	-	219

Источник: (Научно-прикладной справочник..., 1993; Михайлов и др., 2013).

Реки Алтайских гор в большинстве принадлежат бассейну Северного Ледовитого океана. Для них характерно смешанное питание за счет снегового покрова, таяния ледников с преобладанием талых и летних дождевых вод. Характерной особенностью на реках рассматриваемой территории являются высокие коэффициенты стока весенне-летнего половодья, обусловленные наличием вечной мерзлоты в высокогорье, глубоким сезонным промерзанием почв, неглубоким залеганием плотных коренных пород и значительными уклонами местности. Исследуемая территория включает верхние части бассейнов рек Аргут и Чуя, относящиеся собственно к Юго-Восточному Алтаю.

В Юго-Восточном Алтае наблюдается огромное разнообразие ландшафтов: от гляциально-нивальных до степных. Гляциально-нивальные ландшафты представлены альпинотипными высокогорьями с экзарационным рельефом, с ледниками, острыми пиками на вершинах, карами, цирками, каменистыми россыпями, снежниками с криопетрофитными группировками, фрагментами тундровой растительности на примитивных горно-тундровых почвах. Они распространены с высоты примерно 3000 м и выше. Среди альпийско-тундровых по площади распространения преобладают тундровые и тундрово-степные ландшафты. Эти ландшафты представлены в основном эквипленизированными глубокорасчлененными высокогорьями с мохово-лишайниковыми, травяными и кустарниковыми тундрами, а также здесь встречается сочетание травяных тундр и альпийских степей. Среди степных преобладают пролювиальные среднегорные ландшафты с сухими степями. Горно-долинные лесные и лугово-степные и лесостепные ландшафты занимают незначительные площади. Встречаются также и горно-таежные ландшафты (Глебова, 2007).

Освоение человеком территории Юго-Восточного Алтая началось еще в палеолите, о чем свидетельствует подъемный материал. Однако заселение постоянным населением произошло в условиях потепления климата в конце IV тысячелетия до н.э., в энеолите, на это указывает незначительное число найденных могильников афанасьевской культуры. Новая массовая волна заселения, вероятно, произошла в развитую бронзу и при переходе от бронзы к раннему железному веку. Этому способствовало то, что в конце II и начале I тыс. до н.э. произошло последнее потепление суббореала. На Алтае оно было отмечено приблизительно в период 1200–1000 гг. до н.э. (Галахов и др., 2005). Средние летние температуры воздуха были примерно на 0.16 °С выше современных (Назаров, 2006). Высотные растительные пояса располагались несколько выше, чем сегодня. Верхняя граница леса была при-

мерно на 100 м выше современной. Ледники существенно отступили. В дальнейшем подобное потепление отмечалось в так называемый средневековый оптимум.

2. Материалы и методы исследования

Впервые подобные исследования проводились авторами для плоскогорья Укок: на основе анализа имеющихся археологических данных и цифровой модели рельефа были выявлены участки возможного местонахождения археологических объектов (Глебова и др., 2016). С появлением общедоступных методов машинного обучения и возможности анализа больших массивов данных (Мюллер и Гвидо, 2019) предложенная нами ранее методика в значительной степени переработана.

Математические модели нейронных сетей и простые способы их реализации появились еще в 1950-х годах, тем не менее об использовании их в информационных системах распознавания образов окружающего мира заговорили только в конце 1990-х годов. Это связано с усовершенствованием алгоритмов нейронных сетей и ростом вычислительных мощностей. На сегодняшний день искусственные нейронные сети в задачах распознавания видео-, звуковой и любой другой информации превзошли биологические нейронные сети. Искусственную нейронную сеть можно представить как множество ячеек — аналогов биологических нейронов (персептронов), собранных в слои. Входной сигнал (информация) параллельно распространяется в направлении от первого слоя до n -конечного. При этом срабатывание каждой ячейки на передачу информации далее в вышележащие слои осуществляется порогово и настраивается так называемыми весами — числовыми коэффициентами. Связи между слоями организованы таким образом, что для каждой ячейки весовой коэффициент меняется итерационно (пошагово) в сторону уменьшения градиента ошибок распознавания на выходе всей системы. Этот процесс настройки весовых коэффициентов называется обучением нейронной сети. Например, в данной работе для решения задачи настройки весовых коэффициентов (обучения) на вход сети подаются более тысячи обучающих записей (точек) с информацией по шести ландшафтным признакам и с контрольными метками бинарной классификации о соответствии каждой точки либо археологическому объекту, либо «пустому объекту». Полученные коэффициенты фиксируются и затем при решении прогнозной задачи, подавая на вход записи без классификационных меток, на выходе нейронной модели будут получены прогнозные метки принадлежности каждой точки данных изучаемой территории к тому или иному классу. В алгоритмы обучения нейронных сетей обычно закладываются методы оценки качества обучения, которые заключаются в перекрестной верификации обучающей выборки с получением коэффициентов соответствия результатов прогноза фактическим классификационным меткам.

Археологическое наследие Юго-Восточного Алтая изучалось учеными разных направлений. Совместной российско-бельгийской экспедицией в 2012 г. были проведены детальные археологические исследования в долине р. Джазатор (Буржуа и др., 2014). Ими определены принципы пространственной организации разнотипных объектов, датируемых энеолитом — этнографическим временем, составлены схемы расположения археологических памятников разных исторических периодов. Археологические исследования в Курайской степи проводились С. В. Кисе-

левым (1951), Л. А. Евтюховой (1952), В. И. Соеновым (1994, 1995), В. И. Соеновым и А. В. Эбелем (1998), В. Д. Кубаревым (1980, 1984, 2001), В. Д. Кубаревым и Е. П. Маточкиным (1992), Ю. Ф. Кирюшиным, А. А. Тишкиным и др. (2003) и др. В 2001–2003 гг. с целью отбора древесины для дендрохронологических исследований И. В. Слюсаренко, Е. С. Богдановым, В. И. Соеновым (2008) были проведены вторичные раскопки большинства ранее исследованных археологических объектов. Археологические памятники плоскогорья Укок подробно изучались группой ученых. Результаты этих исследований опубликованы в монографиях (Молодин и др., 2004; Древние культуры, 1994). Информация о памятниках, расположенных на территории исследования, приведена в монографии «Природные условия Юго-Восточного Алтая и их роль в жизни общества в пазырыкское время» (Быков и Быкова, 2014). Историко-ландшафтные исследования проведены в долине р. Джазатор (Глебова, 2016) и в долине р. Ортолык (Курайская степь) (Глебова и Сергеев, 2019).

Для задач формирования массива входных данных построения нейронной сети и выявления закономерностей расположения археологических памятников в ландшафтах Юго-Восточного Алтая была составлена информационная база данных, как на основе литературных источников (Кирюшин и Тишкин, 2003; Тишкин 2009; Бержуа и др. 2014; Киселев, 1951; Кубарев, 1980; 1984; 1987; 2001; Кубарев и Маточкин, 1992; Слюсаренко и др., 2008; Соёнов, 1994; 1995; Соёнов и Эбель 1998; Евтюхова, 1952; Молодин и др., 2004 и мн. др.), так и на собственных полевых исследованиях авторов (Быкова и Быков, 2014; Глебова и Чистяков, 2014; Быков и Крупочкин, 2015; Глебова, 2016; Глебова и Сергеев, 2019).

Для геоинформационного анализа была сделана выборка археологических памятников из информационной базы данных Юго-Восточного Алтая. Всего было отобрано 1394 археологических объекта, из которых в анализе участвовали 889 памятников, более или менее разнесенных в пространстве. Для каждого объекта в базе данных приведены следующие характеристики: тип памятника, координаты, предположительное время сооружения. При этом 63 % археологических объектов не датированы археологами, 37 % памятников датированы археологами и относятся к разными историческим периодам. Среди памятников абсолютно преобладают курганы самых разных размеров, наиболее часто встречаются курганы диаметром 12–15 м. Распространены как комплексы курганов, так и цепочки. Также в Юго-Восточном Алтае расположены поминальные сооружения, оленные камни, оградки, каменные изваяния, балбалы, херексуры и др. Многие археологические памятники представлены комплексами, которые включают в себя более 20 объектов: здесь могут находиться каменные курганы, поминальные сооружения и др. Встречаются также отдельно стоящие памятники: каменные курганы, тюркские оградки, стелы и т. п.

Наиболее древний археологический памятник — Тархатинский мегалитический комплекс, он расположен в Юго-Восточном Алтае в Чуйской котловине приблизительно в 25 км к юго-западу от села Кош-Агач. Комплекс был открыт и обследован в 1994 г. экспедицией Горно-Алтайского государственного университета под руководством В. И. Соёнова (Соёнов, 1994). По петроглифам на камнях ученые отнесли его к бронзовому веку. Предположительно, памятник является древней обсерваторией (Соёнов и др., 2000). В раннескифское время (приблизительно VIII — середина VI в. до н.э.) на территории Горного Алтая существовали майэмирская

и бийкенская культуры. Начиная со второй половины VI в. до н.э. произошло сложение новых культурных образований, которые просуществовали до начала II в. до н.э. Все исследованные на сегодняшний день археологические объекты Алтая этого периода объединены в рамках пазырыкской культуры, названной по раскопкам больших каменных курганов урочища Пазырык Улаганского района (Грязнов, 1992; Руденко, 1960). В конце III в. до н.э. и в начале II в. н.э. население Горного Алтая смешивается с пришлыми из Центральной Азии хуннскими племенами. По данным китайских летописей, Алтай дважды завоевывался гуннами — в 201 г. до н.э. и в 49 г. до н.э. В конце I в. н.э. племенной союз гуннов распался под ударами динлинов и сяньби. С 391 г. в регионе господствовали жужане (История..., 2019). В середине и второй половине I тысячелетия историческое развитие населения в Алтае было тесно связано с Центральной Азией, где складывались государственные образования тюркоязычных племен. Алтае-телеские тюрки в это время играли ведущую политическую роль (Савинов, 1984). В 742 г. власть перешла к уйгурам, создавшим в 745 г. Уйгурский каганат. В 840 г. древние кыргызы, поддерживаемые племенами Алтая и Тувы, разбили уйгуров. Алтай вошел в состав государства древних кыргызов. В состав монгольской империи территория Алтая вошла в 1207 г. В конце XVI — начале XVII в. алтайские племена оказались под властью Алтынханского княжества, в XVII–XVIII вв. Юго-Восточный Алтай вошел в состав Джунгарского ханства (История..., 2002).

Большинство участвовавших в геоинформационном анализе археологических памятников Юго-Восточного Алтая относятся к тюркскому (46%), скифскому (22%) и раннескифскому времени (15%). Памятников гунно-сарматского времени немного — 2%, так же как и памятников энеолита (2%) и эпохи бронзы (2%). Немного больше памятников относится к монгольскому (6%) и этнографическому времени (5%).

3. Методы исследования

Для проведения исследований применена цифровая модель рельефа ASTER GDEM 2010 (USGS.GOV, 2020). На ее основе при помощи инструментов ГИС-анализа программного обеспечения ArcMap 10.2 (Arcgis.com, 2021) были созданы матрицы (растры) уклонов, экспозиции, поступления солнечной радиации за июнь и декабрь, а также удаленности от водотоков. Эти данные были собраны в пространственную векторную матрицу, где каждая точка равномерной сети с шагом 50 м изучаемой территории содержит шесть признаков (значений) — абсолютная высота, уклон, экспозиция, поступление удельной солнечной радиации (энергии на метр квадратный) в июне и декабре, удаленность от водотоков. Также была сформирована таблица археологических объектов по имеющимся базам данных. Таблица оформлена в виде файла точек, имеющих пространственную привязку. В состав таблицы вошли археологические объекты (889) и «пустые» объекты (330), не несущие археологической информации. Они были выбраны случайным образом через «рандомизацию» координат точек в пределах изучаемой территории. Таким образом, всего в процедуре машинного обучения участвовали 1219 объектов, каждый с шестью выше упомянутыми ландшафтными признаками. Полученный массив обучающей выборки имеет бинарное разбиение с двумя классами объектов по

шесть признаков для каждой точки. Такие процедуры подготовки данных необходимы для построения статистической модели, обучения нейронной сети, проверки качества модели и выполнения прогноза.

Первым, классическим, этапом работы с данными является изучение статистических закономерностей гистограмм распределения археологических объектов по шести признакам и определение дисперсионным анализом степени значимости каждого признака. На данном этапе создается грубая прогнозная модель, где в итоге многомерное пространство признаков разбивается плоскостью на два искомого класса объектов. Такая прогнозная модель, с одной стороны, является отправной точкой исследований, с другой — имеет очень высокую степень обобщения, но низкую предсказательную силу, так как разделить в нашем конкретном случае шестимерное пространство исходных шести признаков одной плоскостью с наилучшим предсказанием (бинарным разбиением на классы) по каждому признаку не представляется возможным. Поэтому следующим этапом явилось машинное обучение, которое было выполнено на упомянутой выборке.

Суть машинного обучения — разделение исходного пространства признаков гиперповерхностью. Геометрически ее можно представить, как изогнутую поверхность, наилучшим образом разделяющую входные данные во всем объеме пространства признаков на искомого классы (Мюллер, Гвидо, 2019). Построение нейронной сети — весьма затратный вычислительный процесс с многочисленными итерациями.

Для контроля итерационного процесса машинного обучения нейронной сети выборка в процессе расчета разбита случайным образом на две части — тренировочную и тестовую. Проверка качества прогнозной модели осуществляется на тестовой выборке. Контроль обучения выполняется с построением матрицы ошибок (Matrix Confusion) и вычислением f1-теста для оценки сбалансированности входных и выходных значений модели, а также оценивается соответствие предсказанных классов фактическим данным тестовой выборки. Далее выполняется прогноз, который заключается в итоговой классификации векторной матрицы на всю изучаемую территорию по критериям, полученным в ходе машинного обучения (Мюллер, Гвидо, 2019). Выходной результат содержит, кроме меток бинарной классификации 1 или 0, значения степени «уверенности» предсказания моделью археологического объекта. Фактически — это значение последнего слоя обученной нейронной сети, получаемое после процедуры прогноза для неразмеченных данных и нормированное на интервале от 0.5 до 1.0. В результате чем оно ближе к значению ранее обученной сети (к 1.0) для данной точки, тем более достоверно предсказание. Это дополнительное значение оценки близости каждой спрогнозированной точки к меткам классов обученной нейронной сети используется для создания прогнозной карты. Для повышения качества прогноза создается несколько вариантов нейронной сети — сходимость получаемых прогнозных результатов обеспечивает дополнительную проверку метода и увеличивает пространственную точность прогноза. Исследование выполнено в программе ArcMap 10.2 (Arcgis.com, 2021) с использованием модуля пространственного анализа Spatial Analyst (Самсонов, 2011) в среде Python 3.7 (Python, 2021) с привлечением библиотек научного анализа Matplotlib, Numpy, Scikit-learn (lfd.uci.edu, 2021).

4. Результаты исследования и обсуждение

Геоинформационный анализ гистограмм позволил выявить ряд особенностей и закономерностей расположения археологических объектов в зависимости от ландшафтных условий (рис. 1, а–г). Гистограмма распределения по абсолютным высотам показывает, что наибольшее количество археологических памятников расположено в диапазоне высот от 1600 до 1700 м и от 2120 до 2480 м (рис. 1, а). На территории Юго-Восточного Алтая большая часть памятников встречается в степных и лесостепных ландшафтах Курайской котловины (абсолютная высота 1500–1600 м), а также по долинам рек в Чуйской котловине (абсолютная высота 1750–1850 м). Практически во все времена древнее население, которое вело вначале кочевой, а начиная со скифского времени полукочевой образ жизни, использовало их для выпаса скота. В зимнее время в котловинах высота снежного покрова была небольшой, что позволяло пасти скот, а в летнее время, когда пастбища выгорали, скот отгоняли в высокогорья, о чем свидетельствует достаточно большое количество археологических памятников, расположенных в том числе на плоскогорье Укок (абсолютная высота 2200–2500 м) (Молодин и др., 2004). Хотя плоскогорье Укок использовали как пастбище и в зимнее время (Быков и Быкова, 2014). Абсолютное большинство памятников сосредоточено в непосредственной близости к реке (на расстоянии, не превышающем одного километра, в среднем 536 м) (рис. 1, б). Идеальным положением для зимних могильников и пастбищ является положение, когда они находятся на стыке двух долин, при этом одна из них уходит на юго-восток, другая — на юго-запад. Такое положение соответствует самому продолжительному солнечному сиянию в течение дня, что ведет к более комфортным температурным условиям для скота и человека и уменьшению толщины снежного покрова (Быков и Быкова, 2014). В летний период древние племена, как правило, выбирали места стоянок у рек, которые не имели ледникового питания, или у рек, которые имели ледниковое питание, но вода в них фильтровалась и не была мутной. Вода в таких реках была чистой, что имело важное значение для жизни людей. Кроме того, местное население, особенно в скифские, гунно-сарматские, тюркские времена, использовало для сооружения археологических памятников камни, взятые из реки. Об этом говорит то, что камни, используемые для строительства, как правило, имеют окатанную форму, что свидетельствует об их длительном пребывании в воде.

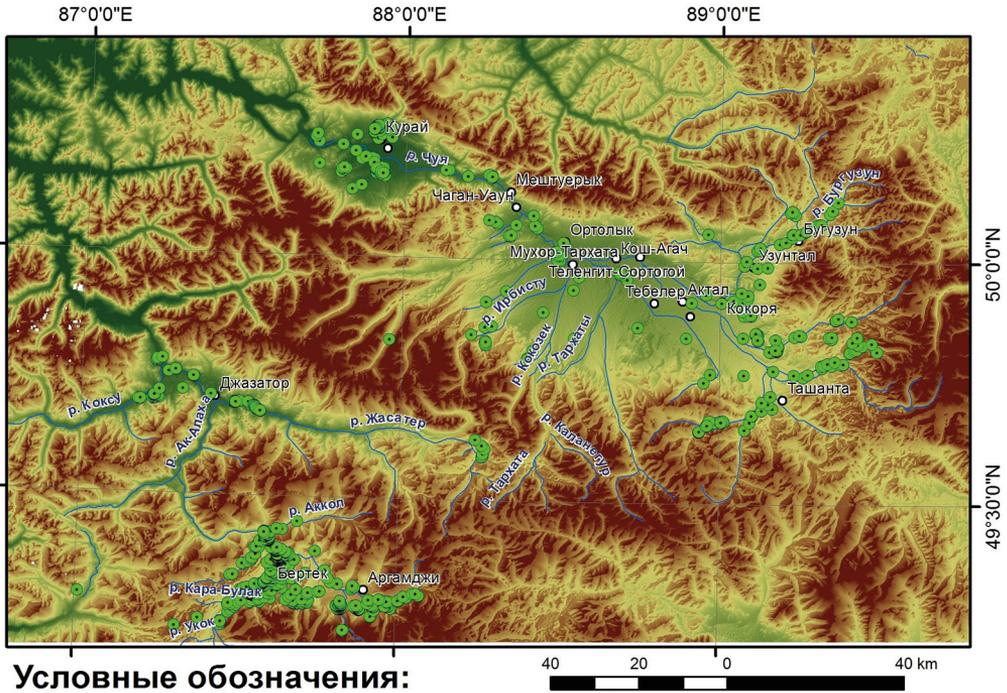
Значительная часть памятников встречается на склонах крутизной до 5° (рис. 1, в). Но, некоторые каменные курганы были сооружены древним населением на достаточно крутых склонах горных хребтов, причем даже не у подножия склона, а в центре. Возможно, памятники сооружались на участках с незначительным уклоном, но в дальнейшем уклоны местоположений из-за эрозионного вреза речной системы могли увеличиться. Предположительно, эти памятники можно отнести к скифскому времени и расположены они в Чуйской котловине. Подавляющее большинство археологических объектов размещается на относительно плоских поверхностях. Преобладающее количество археологических объектов обнаружено на склонах южной, юго-восточной и западной экспозиции (интервал от 90 до 270° с максимумом частот 180°), что было связано с тем, что склоны этих экспозиций хорошо прогреваются в летнее время (рис. 1, г). Это давало возможность древним народам в весенне-летне-осеннее время сооружать здесь курганы, оградки и по-

добные сооружения, так как многолетняя мерзлота оттаивала на большую глубину. По склонам северной экспозиции памятники встречаются, но их количество меньше. Существует предположение, что древние племена даже в летние месяцы старались сооружать могильники в местах зимних стоянок в нижних и средних частях речных долин, тогда как в летнее время площадь пастбищ закономерно возрастала. Таким образом, скотоводы закрепляли за собой наиболее богатые территории (Быков и Быкова, 2014). Отчасти это также объясняет приуроченность археологических объектов к рекам (рис.1, б).

Гистограммы распределения солнечной радиации в декабре и июне имеют более или менее правильную форму Гауссова распределения с максимумами частот 11.1 кДж/м² за месяц и 199 кДж/м² за месяц соответственно (рис. 2, а, б). Летний максимум сдвинут на гистограмме в правую часть графика, что указывает на предпочтения древних племен выбирать в летнее время для сооружения курганов, оградок и других памятников места с хорошей теплообеспеченностью (рис. 2, а). При анализе состояние атмосферы не учитывалось. Гистограмма распределения солнечной радиации в декабре свидетельствует о том, что в зимний период теплообеспеченность ландшафта не имела значения в выборе мест сооружения археологических памятников (рис. 2, б). Возможно, это указывает на то, что в зимнее время умерших не хоронили, поскольку суровые климатические условия не позволяли выкопать мерзлоту на достаточную глубину. Умерших начинали хоронить с наступлением весенней оттепели. В научной среде существует другая точка зрения. Н. И. Быковым, В. А. Быковой, И. П. Панюшкиной, И. Ю. Слюсаренко (Быков и др., 2004) с использованием геодезическо-астрономического метода были установлены сезонные даты захоронений на плоскогорье Укок. Были выявлены три типа объектов: зимние, летние и осенне-весенние. По данным авторов, в зимнее время отмечается максимальное число курганов, так как наибольшая смертность населения происходила именно в холодный период года. Более подробно сезонные захоронения описаны нами в работе «Геоинформационный анализ размещения археологических памятников плоскогорья Укок (Алтай)» (Глебова и др., 2016).

Выполненный дисперсионный анализ значений признаков по уровню значимости позволил определить такую характеристику, как относительную *важность* ландшафтных признаков при размещении археологических объектов (рис. 3). К сожалению, мы не можем использовать термин «значимость» во избежание путаницы, так как этот термин применяется непосредственно в дисперсионном анализе. Относительное значение важности ландшафтных признаков получено следующим способом. Признаки отбираются пороговым образом (признаки отбрасываются) и остаются с наименьшим уровнем значимости последовательно для части от всего количества признаков, состоящей из двух, трех, четырех, пяти и всех шести признаков. Эта процедура выполняется несколько раз для *различных случайных выборок* из исходных данных, затем строится график среднего значения количества выпавших признаков, если признак попадает в отбор по наименьшему уровню значимости каждый раз независимо от исходной выборки — он считается максимально важным и его значение на графике равно 1, остальные могут иметь значения в долях от единицы. Проведенная таким образом оценка важности показала, что наибольшее значение имеет удаленность объектов от водотоков, среднее значение 536 м (рис. 3). Второй по важности ландшафтный признак — средняя

a



Условные обозначения:

- археологические объекты
- поселения
- ~ реки

Высоты:

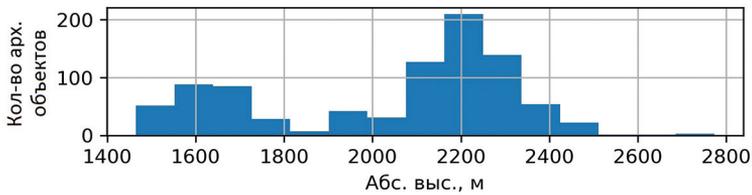
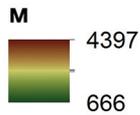
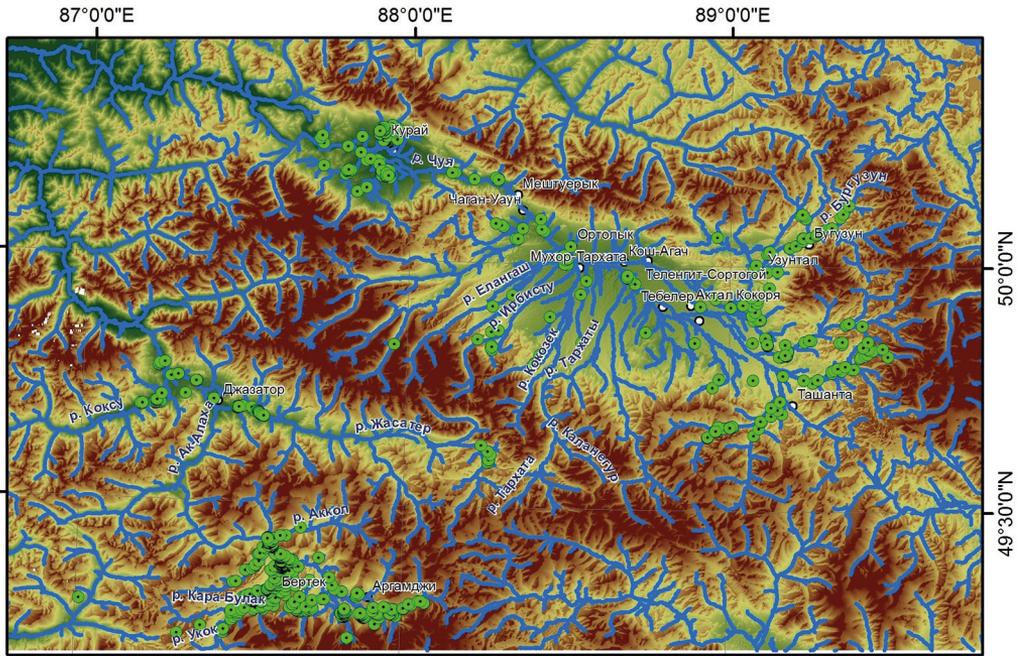


Рис. 1. Распределение археологических памятников Юго-Восточного Алтая по ландшафтным признакам: а — по абсолютной высоте; б — по удаленности от водотока; в — по склонам разной крутизны; г — по склонам разной экспозиции



Условные обозначения:

- археологические объекты
- водно-эрозионная сеть
- поселения

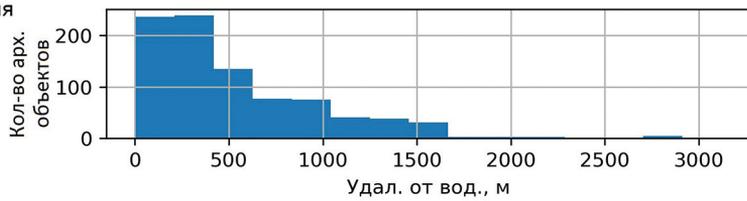
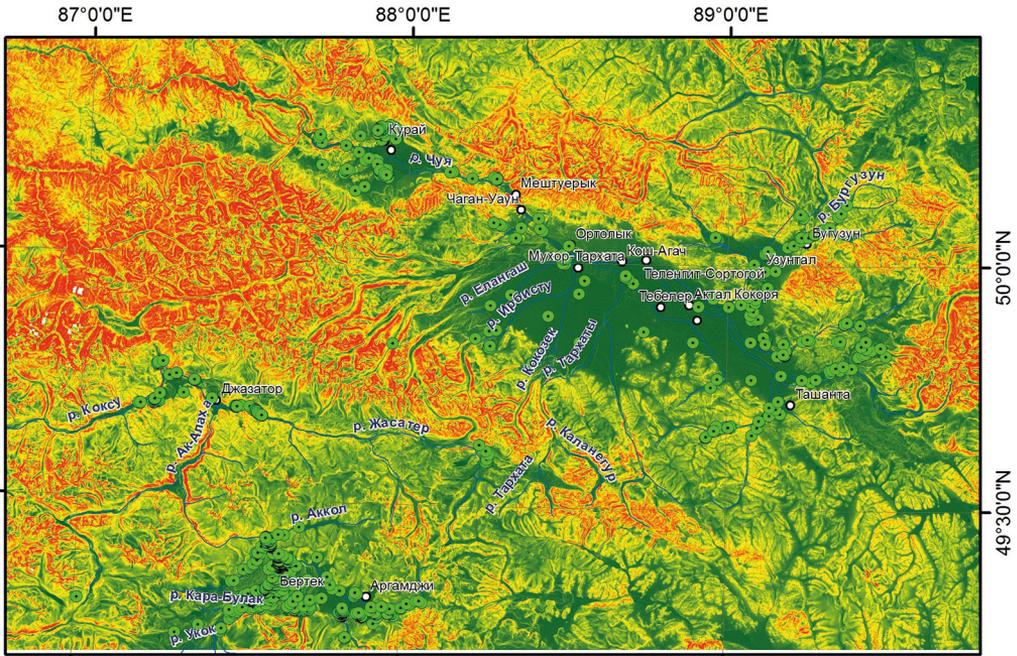


Рис. 1. (Продолжение)



Условные обозначения:

- археологические объекты
- поселения
- ~ реки

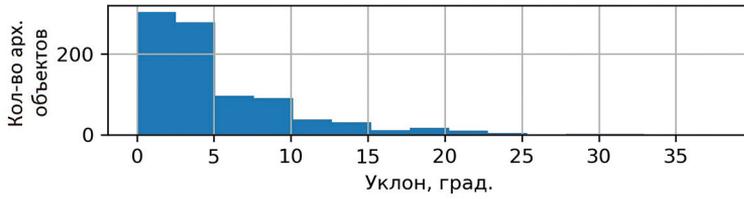
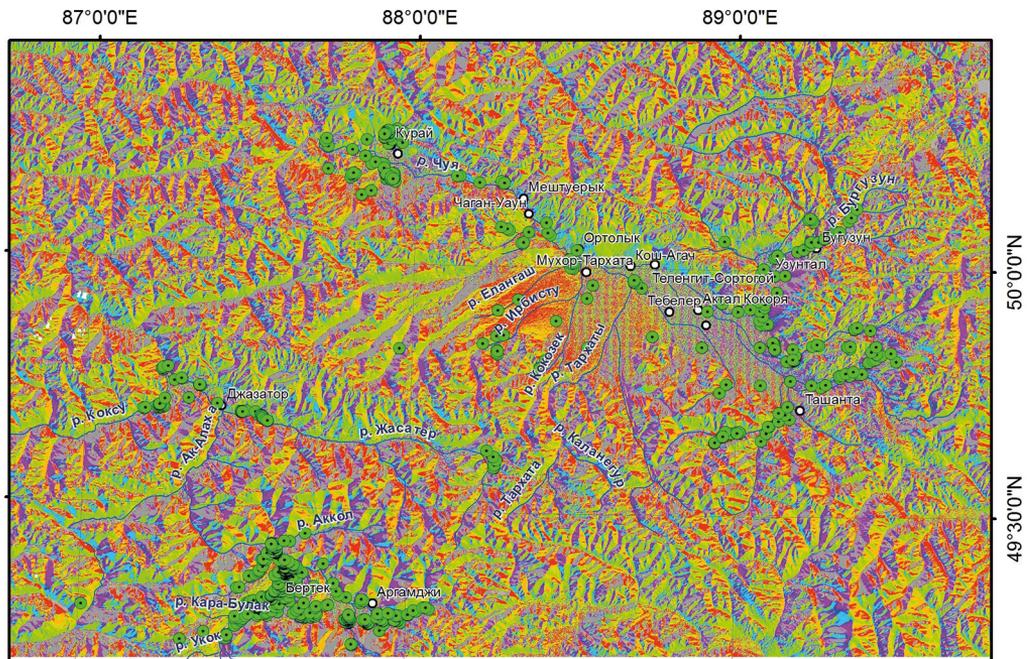


Рис. 1. (Продолжение)



Условные обозначения:

- археологические объекты
- поселения
- ~~~~~ реки

40 20 0 40 km



Экспозиция

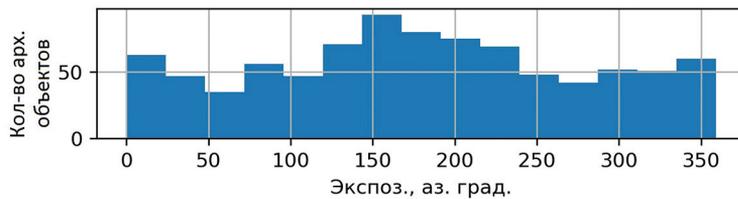
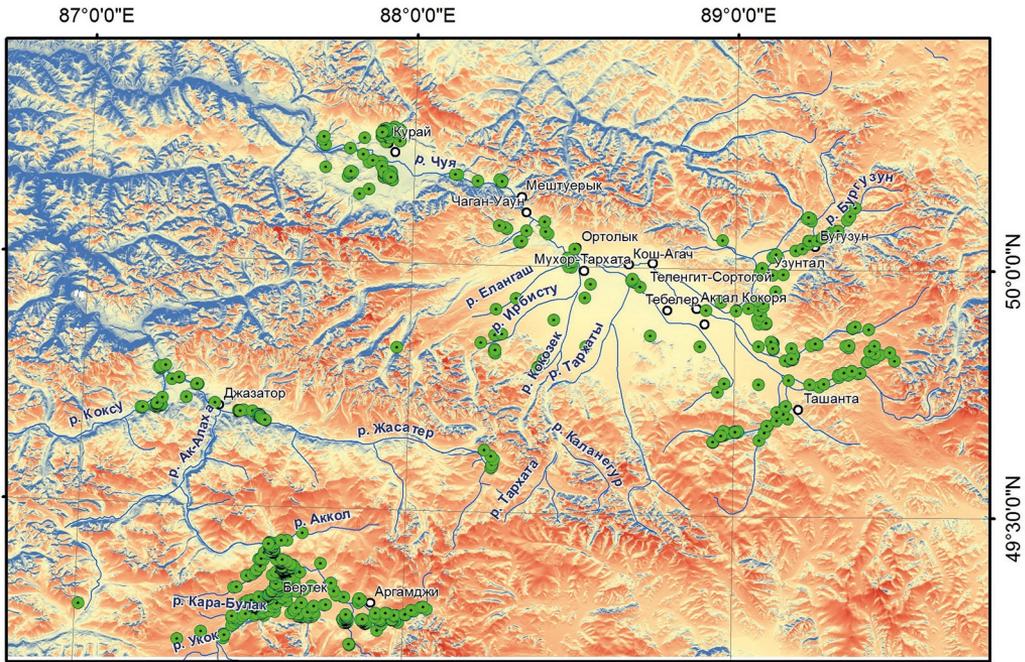


Рис. 1. (Окончание)

а



Условные обозначения:

- археологические объекты
- поселения
- ~~~~~ реки

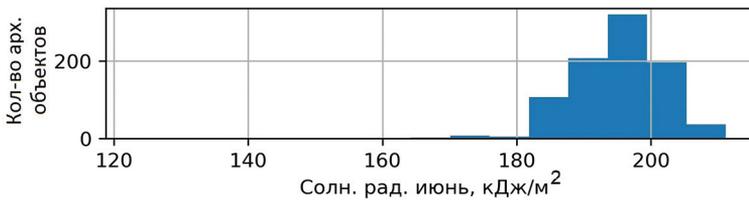
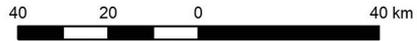
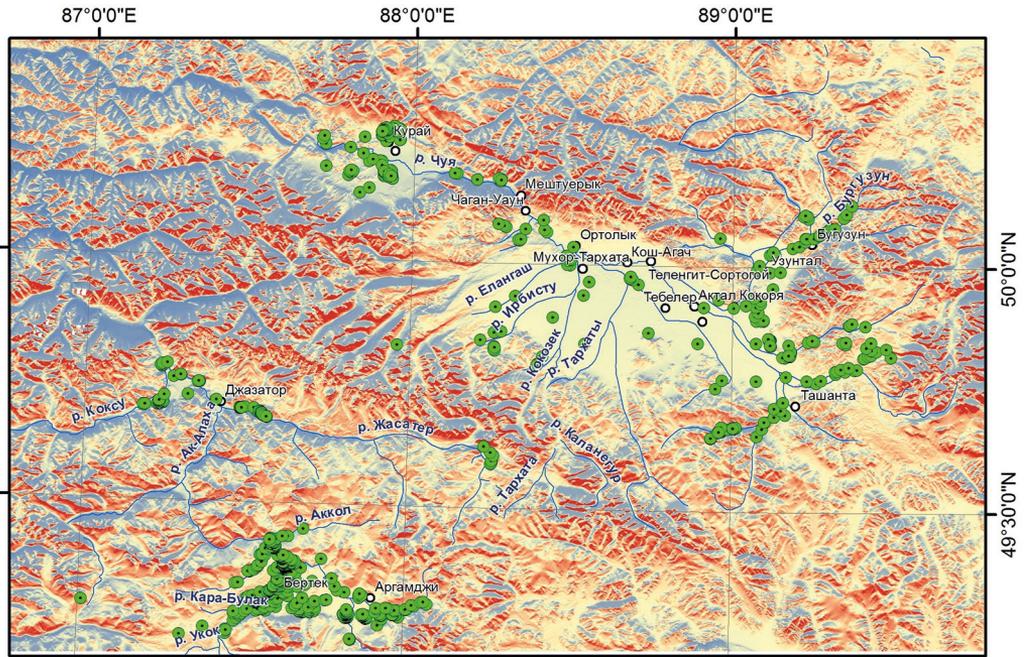


Рис. 2. Распределение интенсивности солнечной радиации в Юго-Восточном Алтае: а — июнь; б — декабрь



Условные обозначения:

- археологические объекты
- поселения
- ~ реки

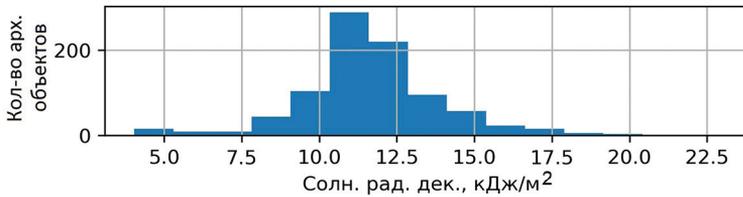


Рис. 2. (Окончание)

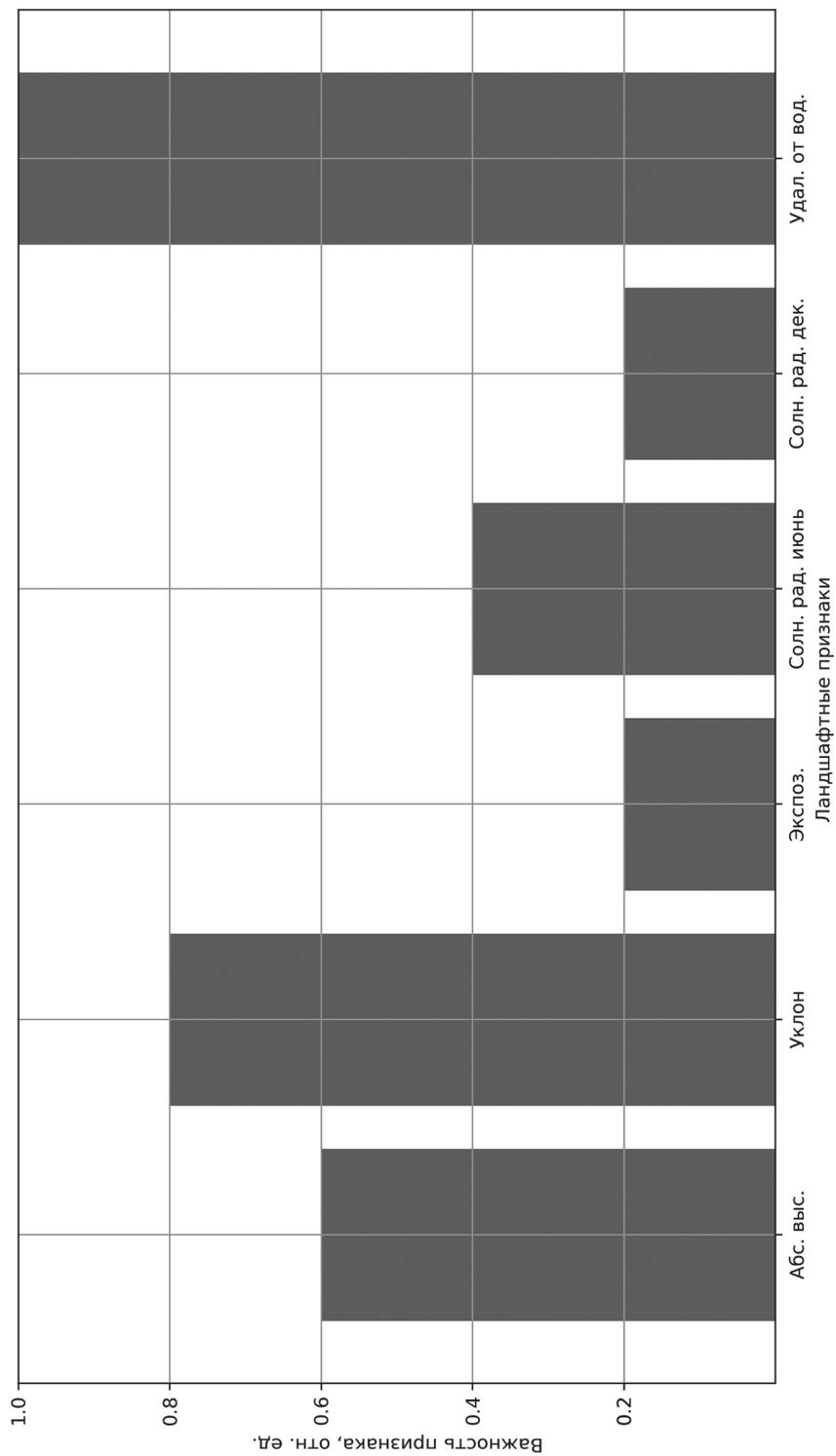


Рис. 3. Важность ландшафтных признаков в распределении археологических объектов в Юго-Восточном Алтае, полученная на основе дисперсионного анализа

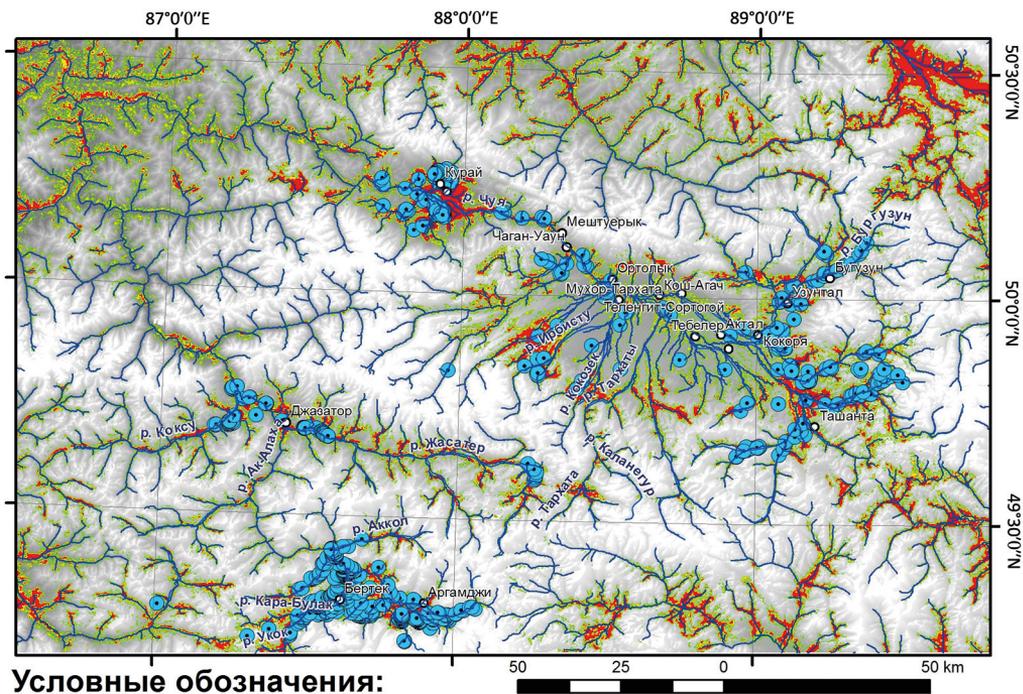
крутизна склонов составляет 5°, третий — среднее значение абсолютной высоты около 2040 м. Относительно значимую роль играет также интенсивность солнечной радиации за июнь ~195 кДж/м².

Результаты дисперсионного анализа также стали формальным обоснованием возможности построения прогнозной модели. Значения попарной взаимной корреляции по шести заявленным ландшафтными признакам для всех местоположений с археологическими объектами составили от 0.05 до 0.3 (Девис, 1990). Невысокие значения корреляции указывают на достаточную независимость признаков. На основании этого и после сравнения с другими методами машинного обучения прогнозным методом был выбран метод построения нейронной сети (Мюллер и Гвидо, 2019). В процессе выбора методов обучения были опробованы: «Деревья решений», «Градиентный спуск», «Логистическая регрессия», «Случайный лес деревьев решений». В отличие от нейронной сети данные методы не прошли проверку по критериям точности прогнозов и f1-теста матрицы ошибок. Точность прогнозов (accuracy — точность, термин применяется в Data Science) на тестовых выборках с возможностью оценки совпадений результатов прогноза (построение матрицы совпадений) была от 60 до 75 %. Тогда как обучение нейронной сети сложностью в 200 × 200 нейронов на произвольной тестовой части исходных данных показало более высокий результат — в среднем точность предсказаний модели составила 88 %. Полученные значения указывают на хорошую предсказательную силу нейронной модели. Таким образом, результаты «обучения с учителем» нейронной сети были применены к исходным ландшафтными характеристикам на всю изучаемую территорию, что позволило выделить участки принадлежности к тому или иному классу. Приводимые значения (score — счет или степень «уверенности» модели, это также часто встречающийся термин в Data Science) на прогнозной карте — это значения, нормированные на интервале от 0.5 до 1.0, которые возникают на выходе последнего слоя обученной нейронной сети после процедуры прогноза по неразмеченным данным для всей исследуемой территории. Чем они ближе к значениям обученной сети, тем более достоверно предсказание в рамках алгоритма. Такого рода оценка на схеме названа нами прогнозным потенциалом. Для удобства восприятия этой информации на карте данный интервал разбит только на три части: показаны участки с низким (0.5–0.8), средним (0.8–0.95) и высоким (0.95–1.0) прогнозным потенциалом обнаружения археологических объектов (рис. 4).

Как следует из анализа прогнозной модели, наибольшая вероятность обнаружения новых археологических объектов в Юго-Восточном Алтае находится по долинам рек в среднем и нижнем течении, в местах слияния рек, по периферии межгорных котловин с наибольшей теплообеспеченностью склонов или на широких равнинных участках надпойменных террас речных долин в нижнем течении.

5. Заключение

Построенная прогнозная модель позволила оценить вклад ландшафтных признаков в пространственные закономерности размещения культовых сооружений древних народов и использовать эти данные для более целенаправленных исследований и поиска новых археологических объектов. Прогноз, выполненный на осно-



Условные обозначения:

- поселения
- археологические объекты
- реки



Прогнозная модель на основе обучения нейронной сети по 6 признакам, прогнозный потенциал:

- низкий (0.5–0.8)
- умеренный (0.8–0.95)
- высокий (0.95–1.0)

Рис. 4. Вероятность обнаружения археологических объектов в Юго-Восточном Алтае согласно модели на основе нейронной сети

ве построения нейронной сети, отчасти подтвердил выводы дисперсионного анализа, что наибольшую вероятность обнаружения новых археологических объектов могут обеспечить следующие ландшафтные параметры: не далее чем 500–600 м от реки с крутизной склона до 4°, с высокой интенсивностью летней (июнь) солнечной радиации и с южной, юго-восточной и западной экспозицией склонов. Выполненный прогноз в значительной степени сузил отдельные участки ранее спрогнозированных площадей поиска (Глебова и др., 2016), но и в значительной степени уменьшил количество этих участков, ограничив их распространение в центральных восточных и западных районах, а также в южной центральной части территории исследований (рис. 4).

Таким образом, применение алгоритма нейронной сети позволило одновременно повысить точность прогноза и сузить площадь поиска. При этом новые неисследованные археологические объекты ожидается обнаружить в речных долинах Юго-Восточного Алтая, в межгорной Курайской котловине по долинам рек, расположенных вдоль окраины Чуйской котловины. В зимнее время в Чуйской котловине очень низкие температуры из-за инверсии. Средняя температура января -28°C , но может опускаться до -32°C , что связано с влиянием западного отрога Азиатского максимума: формируется радиационная инверсия температуры при господстве штиля. На периферии Чуйской котловины значительно теплее, поэтому зимой древнее население предпочитало эти места. Кроме того, прогнозная карта показывает, что большинство памятников можно обнаружить при слиянии двух рек юго-восточного и юго-западного направления. В месте слияния рек речные долины, как правило, расширяются, здесь больше продолжительность солнечного сияния в течение дня, следовательно, теплее. Помимо этого, когда на окрестных склонах горных хребтов растительность выгорала, в поймах речных долин она сохранилась, что давало возможность выпасать скот.

В процессе исследования получена новая информация о важности ландшафтных признаков мест сооружения древних захоронений. Интерпретация выявленных статистических закономерностей показывает экологические предпочтения древних культур и ареалы их распространения по территории Юго-Восточного Алтая. В целом полученная информация может иметь значение для рекогносцировочных археологических и ландшафтных исследований.

Литература

- Алтайский край* (1978). Атлас. Т. 1. М.; Барнаул: Главное управление геодезии и картографии.
- Буржуа, Ж., Черемисин, Д. В., Плетс, Г., Дворников, Э. П., Эбель, А. В., Стихельбаут, Б., Ван Хооф, Л., Гейли, В. (2014). Археологический ландшафт долины Джазатора (Алтай): памятники и петроглифы эпохи энеолита — этнографического времени. *Археология, этнография и антропология Евразии*, 4 (60), 106–119.
- Быков, Н. И., Быкова, В. А., Панюшкина, И. П., Слюсаренко, И. Ю. (2004). Дендрохронологическая и геодезическо-астрономическая оценка последовательности сооружения курганов в могильниках пазырыкской культуры Алтая. В: *Комплексные исследования древних и традиционных обществ Евразии: сборник научных трудов*. Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 258–264.
- Быков, Н. И., Крупочкин, Е. П. (2015). *Археологические объекты Курайской котловины*. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2016620264, 19.02.2016. Заявка № 2015621671 от 25.12.2015.
- Быкова, В. А., Быков, Н. И. (2014). *Природные условия Юго-Восточного Алтая и их роль в жизни общества в пазырыкское время*. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та.
- Галахов, В. П., Назаров, А. Н., Харламова, Н. Ф. (2005). *Колебания ледников и изменение климата в позднем голоцене по материалам исследований ледников и ледниковых отложений бассейна Актру (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет)*. Монография. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та.
- Глебова, А. Б. (2007). *Историческая география ландшафтов Алтае-Саян*. Дис. ... канд. географ. наук. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет.
- Глебова, А. Б., (2016). Ландшафтная приуроченность археологических памятников долины р. Джазатор (Алтай). *Известия Русского географического общества*, 148 (6), 57–72.
- Глебова, А. Б., Быков, Н. И., Сергеев, И. С. (2016). Геоинформационный анализ размещения археологических памятников плоскогорья Укок (Алтай). *Известия Русского географического общества*, 148 (4), 65–77.

- Глебова, А. Б., Сергеев, И. С. (2019). Ландшафтная приуроченность археологических памятников в окрестностях долины р. Ортолык (Алтай). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (3), 403–420. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.302>
- Глебова, А. Б., Чистяков, К. В. (2014). Базы данных для историко-ландшафтного анализа археологических памятников Алтае-Саян. Свидетельство РФ о государственной регистрации № 2014621592 от 2014.
- Грязнов, М. П. (1992). Алтай и приалтайская степь. В: *Степная полоса Азиатской части СССР в скифо-сарматское время*, Археология СССР. М., 161–178.
- Древние культуры Бертекской долины. Горный Алтай, плоскогорье Укок.* (1994). Отв. ред. член-корреспондент РАН В. И. Молодин. Новосибирск: Наука.
- Дэвис, С. Дж. (1990). *Статистический анализ данных в геологии*. Т. 1. М.: Недра.
- Евтухова, Л. А. (1952). Каменные изваяния Южной Сибири и Монголии. В: *Материалы и исследования по археологии СССР*, I (24), 72–120.
- Тишкин, А. А., под ред. (2019). *История Алтая. Древнейшая эпоха, древность и средневековье* Т. 1. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та.
- История республики Алтай. Древность и средневековье* (2002). Т. 1. Горно-Алтайск: Ин-т алтаистики им. С. С. Суразакова.
- Кирюшин, Ю. Ф., Тишкин, А. А., (2003). *Скифская эпоха Горного Алтая*. Ч. 2. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та.
- Киселев, С. В. (1951). *Древняя история Южной Сибири*. М.: Изд-во Академии наук СССР.
- Кубарев, В. Д. (1980). Археологические памятники Кош-Агачского района (Горный Алтай). В: *Археологический поиск (Северная Азия)*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 69–91.
- Кубарев, В. Д. (1984). *Древнетюркские изваяния Алтая*. Новосибирск: Наука.
- Кубарев, В. Д. (1987). *Курганы Уландрыка*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение.
- Кубарев, В. Д. (2001). Изваяние, оградка, балбалы (о проблемах типологии, хронологии и семантики древнетюркских поминальных сооружений Алтая и сопредельных территорий). В: *Алтай и сопредельные территории в эпоху средневековья*. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 24–54.
- Кубарев, В. Д., Маточкин, Е. П., (1992). *Петроглифы Алтая*. Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН.
- Михайлов, Н. Н., Быков, Н. И., Кошкаров, А. Д., Кошкарова, В. Л., Бляхарчук, Т. А (2013). В: Н. Н. Михайлов, под ред. *Тенденции изменения климата и растительного покрова Алтае-Саянского экологического региона в голоцене*. Красноярск, 60–88.
- Молодин, В. И., Полосьмак, Н. В., Новиков, А. В., Богданов, Е. С., Слюсаренко, И. Ю., Черемисин, Д. В. (2004). *Археологические памятники плоскогорья Укок (Горный Алтай): материалы по археологии Сибири*, 3. Новосибирск: Изд-во Института археологии и этнографии СО РАН.
- Мюллер, А., Гвидо, С. (2019). *Введение в машинное обучение: руководство для специалистов по работе с данными*. М.
- Назаров, А. Н. (2006). *Динамика нивально-гляциального комплекса бассейна Актру во второй половине голоцена (Центральный Алтай, Северо-Чуйский хребет)*. Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Барнаул.
- Научно-прикладной справочник по климату* (1993). СПб.: Гидрометеиздат. Вып. 20: Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край.
- Руденко, С. И. (1960). *Культура населения Центрального Алтая в скифское время*. М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР.
- Савинов, Д. Г. (1984). *Народы Южной Сибири в древнетюркскую эпоху*. Л.: Изд-во ЛГУ.
- Самсонов, Т. Е. (2011). *Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты*. Lambert Academic Publishing (LAP).
- Слюсаренко, И. В., Богданов, Е. С., Соёнов, В. И. (2008). Новые материалы гунно-сарматской эпохи из Горного Алтая (могильник Курайка). *Изучение историко-культурного наследия народов Южной Сибири*, 7, 42–57.
- Соёнов, В. И. (1994). *Отчет об археологических исследованиях в Кош-Агачском районе Республики Алтай*. Горно-Алтайск: Архив лаборатории археологии ГАГУ.
- Соёнов, В. И., Шитов, А. В., Черемисин, Д. В., Эбель, А. В. (2000). Тархатинский мегалитический комплекс. *Древности Алтая*, 5, 7–15.
- Соёнов, В. И. (1995). Могильник Курайка. В: *Проблемы охраны, изучения и использования культурного наследия Алтая*. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 145–147.

- Соёнов, В. И., Эбель, А. В. (1998). Раскопки курганов скифского времени на могильнике Кызыл-Таш. *Древности Алтая*, 3, 88–97.
- Тишкин, А. А. (2009). *Алтай в монгольское время (по материалам археологических памятников)*. Барнаул: Азбука.
- Arcgis.com (2021). *Электронный ресурс ArcGIS*. [online] Available at: <http://resources.arcgis.com/ru/help/> [Accessed 10.05.2021].
- lfd.uci.edu (2021). *Электронный ресурс библиотек Python*. [online] Available at: <https://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/> [Accessed 09.09.2021].
- Python.org (2021). *Официальный сайт разработчиков Python*. [online] Available at: <https://www.python.org/> [Accessed 09.09.2021].
- USGS.GOV (2020). *Официальный сайт Геологической службы США*. [online] Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov/> [Accessed 02.03.2020].

Статья поступила в редакцию 31 декабря 2021 г.

Статья рекомендована к печати 15 июня 2022 г.

Контактная информация:

Глебова Анастасия Борисовна — a_glebova@mail.ru, a.glebova@spbu.ru

Сергеев Игорь Сергеевич — igorsergeev.spb@gmail.com

Быков Николай Иванович — nikolai_bykov@mail.ru

Geoinformation analysis with the construction of a neural network model for predicting location of archaeological monuments in the landscapes of South-Eastern Altai*

A. B. Glebova¹, I. S. Sergeev¹, N. I. Bykov²

¹ St Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St Petersburg, 199034, Russian Federation

² Institute of Water and Environmental Problems

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

1, ul. Molodyozhnaya, Barnaul, 656038, Russian Federation

For citation: Glebova, A. B., Sergeev, I. S., 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*, 67 (3), 491–514. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.306> (In Russian)

This article identifies landscape patterns of the location of archaeological sites in the South-East Altai using GIS and machine learning. The information database of archaeological sites of South-Eastern Altai was created based on literary sources, the authors' own field research. Schemes of distribution of archaeological sites according to some landscape features: absolute height; position in relation to watercourses; slopes; exposition; solar radiation intensity in June; Intensities of solar radiation for December was created on the basis of geoinfor-

* The collection of materials was carried out within the framework of the state task of the Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences "Natural and natural-economic systems of Siberia in the face of modern challenges: diagnostics of conditions, adaptive capabilities, potential of ecosystem services" (No. 0306-2021-0007). Analytical work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research grant project No. 19-05-00535 "Natural disasters and landscape transformation of southeastern Altai and northwestern Mongolia since the maximum of the last glaciation".

mation analysis of the relief of the territory and the available archaeological data. The obtained statistical regularities of the distribution of archaeological sites in the landscapes of South-Eastern Altai were the basis for the creation and verification of the algorithm of a machine-learning model — a neural network. Based on the results, a forecast map of the location of archaeological sites was created. The greatest probability of discovering new archaeological objects could be provided by the following landscape parameters, no further than 500–600 m from the river with a slope steepness of up to 4 degrees, with high intensity and summer (June) solar radiation and with an exposure of slopes: southern, south-eastern and western. Unexplored archaeological sites in South-East Altai are most likely located along river valleys in the middle and lower reaches, at the confluence of rivers, along the periphery of intermountain basins, or on wide flat areas of above-floodplain terraces of river valleys. The data obtained make it possible to assess the contribution of landscape features to the spatial distribution of religious buildings of ancient peoples and provide opportunities for the search for new archaeological sites.

Keywords: landscape, archaeological sites, geographic information systems, DEM, neural network, South-Eastern Altai, Altai Mountains.

References

- Altai region* (1978). Atlas. T. 1. M., Barnaul: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii Publ. (In Russian)
- Ancient cultures of the Bertek valley. Gorny Altai, Ukok plateau* (1994). Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. V. I. Molodin, ed. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Arcgis.com (2021). *Electronic resource ArcGIS* [online]. Available at: <http://resources.arcgis.com/ru/help/>. [Accessed 05.10.2021].
- Bourgeois, J., Cheremisin, D. V., Plets, G., Dvornikov, E. P., Ebel, A. V., Stikhelbaut, B., Van Hoof, L. and Gailey, V. (2014). Archaeological landscape of the Jazator valley (Altai): monuments and petroglyphs of the Eneolithic — ethnographic time. *Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia*, 4 (60), 106–119. (In Russian)
- Bykov, N. I., Bykova, V. A., Panyushkina, I. P. and Slyusarenko, I. Yu. (2004). Dendrochronological and geodetic-astronomical assessment of the sequence of mound construction in the cemeteries of the Pazyryk culture of Altai. In: *Comprehensive Studies of Ancient and Traditional Societies of Eurasia*. Collection of scientific papers. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta Publ., 258–264. (In Russian)
- Bykova, V. A. and Bykov, N. I. (2014). *Natural conditions of the South-Eastern Altai and their role in the life of society in the Pazyryk time*. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta Publ. (In Russian)
- Bykov, N. I. and Krupochkin, E. P. (2015). *Archaeological objects of the Kurai basin*. Database registration certificate RU 2016620264, 19.02.2016. Application No. 2015621671, dated 12.25.2015. (In Russian)
- Davis, S. J. (1990). *Statistical analysis of data in geology*. T. 1. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Evtyukhova, L. A. (1952). Stone statues of Southern Siberia and Mongolia. In: *Materials and research on the archeology of the USSR*, I (24). Moscow, 72–120. (In Russian)
- Galakhov, V. P., Nazarov, A. N. and Kharlamova, N. F. (2005). *Glacier fluctuations and climate change in the late Holocene based on data from studies of glaciers and glacial deposits in the Aktru basin (Central Altai, Severo-Chuysky ridge)*. Monograph. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta Publ.
- Glebova, A. B. (2007). *Historical geography of Altai-Sayan landscapes*. PhD thesis. St Petersburg State University. (In Russian)
- Glebova, A. B., (2016). Landscape confinement of archaeological sites of the valley of the river. Jazator (Altai). *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 148 (6), 57–72. (In Russian)
- Glebova, A. B., Bykov, N. I. and Sergeev, I. S. (2016). Geoinformation analysis of the location of archaeological sites of the Ukok Plateau (Altai). *Proceedings of the Russian Geographical Society*, 148 (4), 65–77. (In Russian)
- Glebova, A. B. and Chistyakov, K. V. (2014). *Databases for historical and landscape analysis of archaeological sites in Altai-Sayan*. Certificate of the Russian Federation on state registration No. 2014621592, dated 2014. (In Russian)

- Glebova, A.B. and Sergeev, I.S. (2019). Landscape confinement of archaeological sites in the vicinity of the valley of the river. Ortolyk (Altai). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (3), 403–420. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.302> (In Russian)
- Gryaznov, M.P. (1992). Altai and the Altai steppe. In: *The steppe belt of the Asian part of the USSR in the Scythian-Sarmatian time, Archeology of the USSR*. Moscow, 161–178. (In Russian)
- History of the Republic of Altai. Antiquity and the Middle Ages* (2002). T.1. Gorno-Altai, In-t altaistiki im. S.S.Surazakova Publ. (In Russian)
- Kiryushin, Yu. F. and Tishkin, A. A. (2003). *Scythian era of Gorny Altai*. Part 2, Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta Publ. (In Russian)
- Kiselev, S. V. (1951). *Ancient history of Southern Siberia*. Moscow: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR Publ. (In Russian)
- Kubarev, V.D. (1980). Archaeological monuments of the Kosh-Agach region (Gorny Altai). In: *Archaeological Search (Northern Asia)*. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ., 69–91. (In Russian)
- Kubarev, V.D. (1984). *Ancient Turkic sculptures of Altai*. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
- Kubarev, V.D. (1987). *Mounds of Ulandryk*. Novosibirsk: Nauka, Siberian branch Publ. (In Russian)
- Kubarev, V.D. (2001). Statue, fence, balbals (on the problems of typology, chronology and semantics of ancient Turkic memorial structures in Altai and adjacent territories). In: *Altai and adjacent territories in the Middle Ages*. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta Publ., 24–54. (In Russian)
- Kubarev, V.D. and Matochkin, E. P., (1992). *Petroglyphs of Altai*. Novosibirsk: IIAET SO RAN Publ. (In Russian)
- lfd.uci.edu (2021). *Electronic resource of Python libraries* [online]. Available at: <https://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/>. [Accessed 09.09.2021].
- Mikhailov, N.N., Bykov, N.I., Koshkarov, A.D., Koshkarova, V.L. and Blyakharchuk, T.A. (2013). In: N.N.Mikhailov, ed., *Trends in climate change and vegetation cover of the Altai-Sayan ecological region in the Holocene*. Krasnoyarsk, 60–88. (In Russian)
- Molodin, V.I., Polosmak, N. V., Novikov, A. V., Bogdanov, E. S., Slyusarenko, I. Yu. and Cheremisin, D. V. (2004). *Archaeological monuments of the Ukok Plateau (Gorny Altai)*. Materials on the archeology of Siberia, 3. Novosibirsk: Izdatel'stvo instituta arkheologii i etnografii SO RAN Publ. (In Russian)
- Muller, A. and Guido, S. (2019). *Introduction to machine learning. A guide for data scientists*. Moscow. (In Russian)
- Nazarov, A. N. (2006). *Dynamics of the nival-glacial complex of the Aktru basin in the second half of the Holocene (Central Altai, Severo-Chuysky Range)*. PhD abstract, Barnaul. (In Russian)
- Python.org (2021). *Official website of Python developers*. [online] Available at: <https://www.python.org/> [Accessed 09.09.2021].
- Rudenko, S.I. (1960). *Culture of the population of the Central Altai in the Scythian time*. Moscow, Leningrad Akademiia nauk SSSR Publ. (In Russian)
- Savinov, D. G. (1984). *The peoples of Southern Siberia in the ancient Turkic era*. Leningrad: Leningrad University Press. (In Russian)
- Samsonov, T.E. (2011). *Multiscale relief mapping: general geographic and hypsometric maps*. Lambert Academic Publishing (LAP). (In Russian)
- Scientific and Applied Reference Book on Climate, Issue 20: Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo Regions, Altai Territory* (1993). St Petersburg: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Slyusarenko, I. V., Bogdanov, E. S. and Soenov, V.I. (2008). New materials of the Hunno-Sarmatian era from Gorny Altai (Kuraika burial ground). *Study of the historical and cultural heritage of the peoples of Southern Siberia*, 7, 42–57. (In Russian)
- Soyonov, V.I. (1994). *Report on archaeological research in the Kosh-Agach region of the Altai Republic*. Archive of the laboratory of archeology of the State University of Civil Engineering, Gorno-Altai. (In Russian)
- Soyonov, V.I., Shitov, A. V., Cheremisin, D. V. and Ebel, A. V. (2000). Tarkhatinsky megalithic complex. *Antiquities of Altai*, 5, 7–15. (In Russian)
- Soyonov, V.I. (1995). Kuraika burial ground. In: *Problems of protection, study and use of the cultural heritage of Altai*. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta, 145–147. (In Russian)
- Soyonov, V.I. and Ebel, A. V. (1998). Excavations of mounds of the Scythian time at the burial ground of Kyzyl-Tash. *Antiquities of Altai*, 3, 88–97. (In Russian)

- Tishkin, A. A. (2009). *Altai in the Mongolian time (based on materials from archaeological sites)*. Barnaul: Azbuka Publ. (In Russian)
- Tishkin, A. A. (ed.) (2019). *History of Altai. The most ancient era, antiquity and the Middle Ages*. T. 1. Barnaul: Izdatel'stvo Altaiskogo universiteta Publ. (In Russian)
- USGS.GOV (2020). *Official website of the US Geological Survey* [online]. Available at: <http://earthexplorer.usgs.gov/> [Accessed 03.02.2022].

Received: December 31, 2021
Accepted: June 15, 2022

Authors' information:

Anastasia B. Glebova — a_glebova@mail.ru, a.glebova@spbu.ru
Igor S. Sergeev — igorsergeev.spb@gmail.com
Nikolay I. Bykov — nikolai_bykov@mail.ru