

ГИС КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОАРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ТЕПЛООБЕСПЕЧЕННОСТИ

**Е.П. Крупочкин, А.В. Ульянова,
Д.А. Воробьев, С.И. Суханов**

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

Аннотация. Исследования носят междисциплинарный характер и являются следствием применяемых методов изучаемого объекта – археологического наследия. Предметом являются методы и технологии сбора и интерпретации геоархеологических данных, которые рассматриваются авторами через призму ландшафтно-исторического (археологического) подхода. Рассматривается методика создания интегральных моделей теплообеспеченности как фактора среды обитания древнего человека. При изучении условий распространения археологических объектов, а значит и системы расселения, доказана зависимость от предложенного интегрального показателя, которую удалось установить с использованием численных методов и программы расчета корреляции в локальных областях. Предложенные авторами статьи показатели, методика и алгоритм пространственного анализа вносят вклад в изучение культурно-исторического потенциала территории Алтайского региона и в развитие археологического туризма.

Ключевые слова: геоархеология, археологическое наследие, морфометрический анализ, теплообеспеченность, пространственные модели, корреляция.

GIS AS A TOOL FOR MODELING AND INTERPRETATION OF GEOARCHAEOLOGICAL DATA ON THE EXAMPLE OF THE INTEGRAL INDEX OF HEAT SUPPLY

**E.P. Krupochkin, A.V. Ul'yanova,
D.A. Vorob'ev, S.I. Suhanov**

Altai State University, Barnaul, Russia

Abstract. The studies are interdisciplinary in nature and are a consequence of the applied methods of the studied object – the archaeological heritage. The subject is the methods and technologies for collecting and interpreting geoarchaeological data, which are considered by the authors through the prism of the landscape-historical (archaeological) approach. The technique of creating integrated models of heat supply as a factor in the habitat of an ancient person is considered. In studying the distribution conditions of archaeological sites, and hence the settlement system, the dependence on the proposed integral indicator was proved, which was found using numerical methods and a program for calculating correlation in local areas. The indicators, methodology, and spatial analysis algorithm proposed by the authors of the article contribute to the study of the cultural and historical potential of the Altai region and to the development of archaeological tourism.

Keywords: geoarchaeology, archaeological heritage, morphometric analysis, heat supply, spatial models, correlation.

Введение. Геоархеологические данные в нашем понимании представляют собой научно обоснованные сведения о природно-географических условиях и историческом ландшафте, его структуре, динамике и развитии в рассматриваемый исторический отрезок времени. Геоархеологические данные должны быть продуктом геоархеологии, результатом ее познавательной научно-исследовательской деятельности.

В классическом представлении, сформулированным Я.В. Кузьминым, «геоархеология – междисциплинарное научное направление на стыке естественных наук и археологии, имеющее целью реконструкцию природно-климатических условий древнего человека, его геологического возраста, экономики (пищевых и сырьевых ресурсов), взаимодействия с природной средой, влияния на естественные ландшафты, а также выявление иных аспектов жизни древних людей, которые невозможно получить чисто археологическими методами [4].

Между тем представленные в статье результаты исследований не претендуют на максимально широкий охват для всех направлений геоархеологии, а отражают только ее отдельную часть, близкую по своему содержанию и предназначению к ландшафтной археологии. Она возникла в результате развития экологической школы и представляет особый мультидисциплинарный подход к изучению взаимодействия человека с окружающей средой, заимствующий естественнонаучные методы и инструменты исследований. По мнению Д.С. Коробова, «ландшафтная археология» появилась и стала развиваться с се-

редины 1980-х гг. прошлого века в поселенческой археологии Европы [1]. В зарубежных исследованиях родственным термином стал «археология окружающей среды (environmental archaeology)», что означает – изучение природной среды и ее взаимоотношение с человеком во времени» [4].

Сегодня это направление не является уникальным или особенным – оно развивается в русле цифровизации, отражением которой стало активное использование и внедрение ГИС-технологий и инструментов математико-картографического моделирования для реконструкции природной среды, отражающей состояние археологического ландшафта и характер использования человеком его отдельных элементов в прошлом.

Одним из компонентов ландшафта, облик которого изменяется не по исторической, а по геологической шкале, является рельеф. Ценность его изучения для геоархеологии показана довольно широко как в отечественной, так и в зарубежной печати (научных статьях и монографиях, отчетах и др.), поэтому останавливаться на обосновании данного тезиса, как нам представляется, нет особой необходимости.

Материалы и методы исследования. Цель наших исследований состояла в разработке методики создания моделей теплообеспеченности, отражающих закономерности пространственной дифференциации солнечной энергии в зависимости от количественных (морфометрических) характеристик рельефа земной поверхности и других природно-географических факторов.

Задачи состояли в следующем:

1. Апробировать методику разработки моделей теплообеспеченности в ГИС-среде на примере двух модельных площадок;
2. Рассмотреть полученные модели с позиции геоархеологического анализа (ландшафтной археологии);
3. Выполнить анализ распределения археологических памятников в зависимости от теплообеспеченности на основе численных моделей пространственной корреляции.

В книге В.А. Червякова, Е.П. Крупочкина, О.Н. Барышниковой и др. «Теория и технология регионального картографического моделирования...» теплообеспеченность рассматривается как интегральный показатель, состоящий из набора агроклиматических, физико-географических, геоморфологических и других факторов. Под теплообеспеченностью мы будем понимать количество поступающей и распределяемой солнечной энергии, влияющей на процесс нагреваемости земной поверхности. Учитывая, что решающая роль в процессе перераспределения солнечной энергии принадлежит рельефу, теплообеспечен-

ность можно рассматривать как производную от рельефа величину. При этом важно помнить, что рельеф является одним из ключевых факторов обитания человека и его деятельности, в первую очередь хозяйственной и рекреационной. Вместе с тем, несмотря на актуальность и многогранность данной проблемы, изучается она очень слабо и часто недооценивается, по всей видимости, из-за сложности исследуемых процессов и явлений.

Для выявления наиболее и наименее теплообеспеченных участков местности осуществлялось моделирование, анализ и графическое представление географических полей на основе аппроксимирующих функций. Производные карты рельефа (углов наклона и экспозиции склонов) изображались регулярной сетью стрелок-векторов в направлении скатов, толщина которых отражает числовые значения углов наклона. Такие карты отличались высокой наглядностью, однако по ним невозможно получить количественную информацию именно о теплообеспеченности. Таким образом, одной из задач исследований стало построение усовершенствованных моделей теплообеспеченности инструментами математико-картографического моделирования.

Районами исследований в силу специфики сбора, обработки и обобщения данных стали две модельных площадки. Первая расположена в предгорно-низкогорной части Алтая (в границах Алтайского края), вторая – на территории Горного Алтая (в границах Республики Алтай). Первая условная площадка с позиции археологии представляет своеобразную «контактную зону», которая характеризуется процессами этнического, хозяйственного, социального, религиозного и культурного взаимодействия, игравшего важную роль в формировании населявших данную территорию народов. Вторая площадка отражает скифскую систему расселения, так как располагается в зоне с максимальной плотностью населения, в подавляющем большинстве, существовавшем в скифскую эпоху.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим основные этапы разработки моделей теплообеспеченности. Процесс создания ГИС-моделей разбит на несколько этапов (рис. 1):

1. Ввод данных (первый этап).
2. Обработка данных (второй этап).
3. Перекодировка на основе классификации (третий этап).
4. Объединение пространственных моделей данных (заключительный этап).

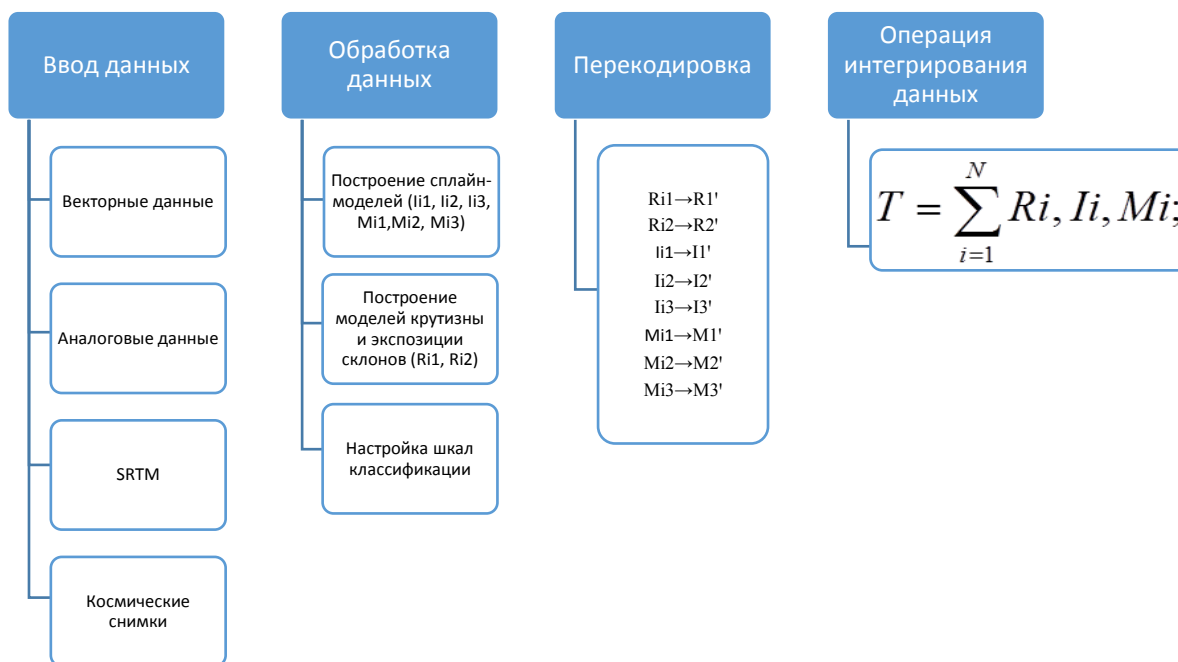


Рис. 1. Алгоритмическая схема построения интегральной модели теплообеспеченности склонов: R_i – морфометрические показатели рельефа (крутизна склонов и экспозиция), I_i – показатели распределения солнечной энергии (температура, продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 10°), M_i – индикаторы, оказывающие влияние на распределение температуры подстилающей поверхности (преобладающее направление ветра, показатель $NDVI$)

Первый этап. Ввод данных осуществлялся по геопривязанным климатическим картам, взятым из атласа Алтайского края, том 1. К ним относятся – продолжительность периода со среднесуточной температурой выше 10°C , сумма среднесуточных температур воздуха выше 10°C , среднесуточные температуры июля.

Следующий блок данных – векторные и растровые наборы геопространственных данных, характеризуют гидрографическую сеть и рельеф местности. За основу гидрографической сети были взяты векторные слои, полученные ранее путем оцифровки общегеографической и топографических карт $M 1 : 500\ 000 - 1 : 200\ 000$.

Данные о рельефе определялись на основе цифровой модели SRTM-модель с плановым разрешением 90 м (версия 2.0). Значения нормализованного вегетационного индекса $NDVI$ вычислялись на основе данных многозональной съемки Landsat 7.

Второй этап. На данном этапе с помощью цифровой модели SRTM были произведены вычисления производных характеристик рельефа и построены сплайн-модели ($Ii_1, Ii_2, Ii_3, Mi_1, Mi_2, Mi_3$), отражающие блок климатической информации – на основе интерполированных данных; а также блок морфометрической информации – полученной в результате обработки матрицы высот SRTM. В завершение данного этапа были созданы производные модели:

- крутизны и экспозиции склонов (R_1, R_2);
- произведены настройки шкал с классификацией растровых моделей, необходимые для более корректного выполнения вычислительных задач следующего этапа.

Третий этап. Для обработки и комплексирования (интегрирования) всех показателей потребовалась унификация данных и перевод численных значений в условную систему классов (см. табл. 1).

Схема перекодировки показателей в систему классов от 1 до 5

Экспозиция		Углы наклона		Температура июля		Среднесуточные температуры, выше +10С		Продолжительность периода с температурами выше +10С		Альbedo		Направление ветра		NDVI	
Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки	Входные значения классов	Результат перекодировки
-20° - +20	1. -20° - +20° 2. +20° - +75°; 285° - 340°	0 - 1,5	4	19,88 - 20,48	1	2146,9 - 2313	1	2,55 - 140	1	0,041 0,090 0,094	1	С	1	min-0,3	1
20° - 75°	3. 75° - 105°; 255° - 285°	1,5 - 3,0	3	20,48 - 21,22	2	2313 - 2415	2	140 - 146	2	0,106 0,119	2	ССВ, ССЗ	1,5	max 1,52	2
75° - 105°	4. 105° - 175°; 200° - 255°	3,0 - 5,0	2	21,22 - 21,76	3	2415 - 2520	3	146 - 244	3	0,132	3	СВ, СЗ	2		
105° - 175°	5. 175° - 200°	> 5,0	1							0,146	4	В, З	3		
175° - 200°												ВЮВ, ЗЮЗ	3,5		
200° - 255°												ЮВ, ЮЗ	4		
255° - 285°												ЮЮВ, ЮЮЗ	4,5		
285° - 340°												Ю	5		

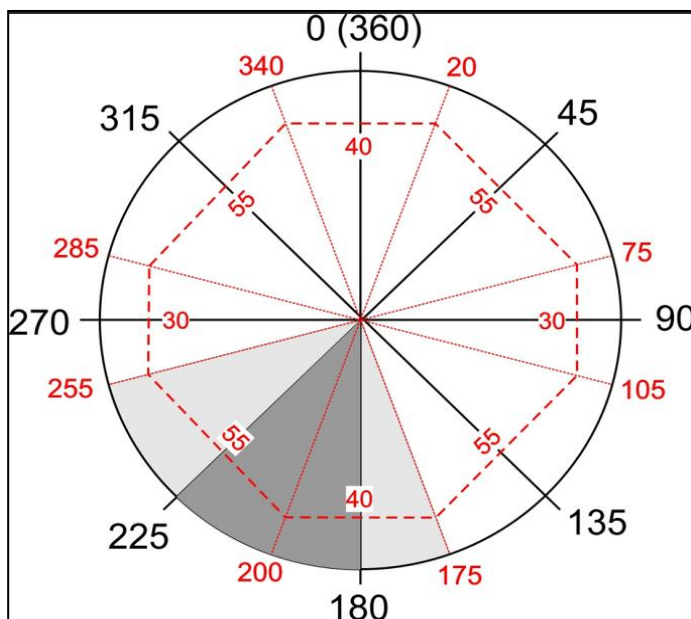
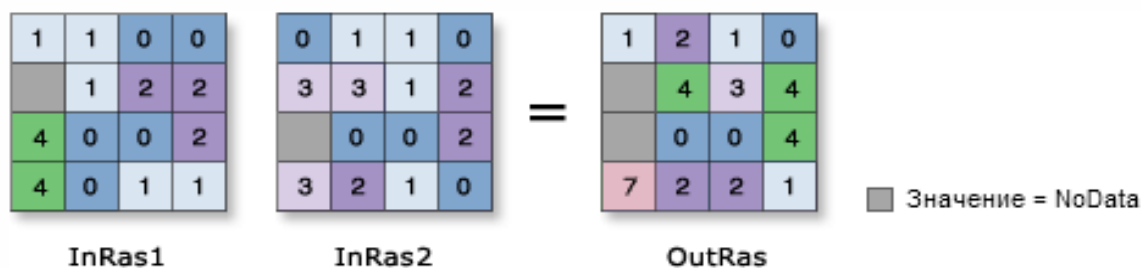


Рис. 2. Схема разбиения угловых значений экспозиции на румбы, используемые при вычислении моделей теплообеспеченности (Т)

В результате проведенной операции все показатели были перекодированы следующим образом: экспозиция по румбам (рис. 2) на пять классов; климатические показатели были разбиты на три класса на основе выявленных на гистограммах распределения «всплесков»; значения углов наклона были модифицированы и разбиты на классы с учетом диапазонов, заимствованных из методических рекомендаций (используются в отраслях народного хозяйства).

Заключительный этап. На завершающем этапе с помощью инструментов булевой алгебры были созданы несколько моделей, характеризующих теплообеспеченность как интегральный показатель. При комплексировании тематических растров, соответствующих схеме перекодировки, за основу был взят метод суммирования как наиболее объективный (рис. 3). При построении тестовых моделей теплообеспеченности алгоритм сложения матриц, пересчитанных на единую растровую сетку, показал более плавный переход численных значений и отсутствие резких перепадов с «пустыми» ячейками.



`OutRas = Raster("InRas1") + Raster("InRas2")`

Рис. 3. Алгоритм работы калькулятора ArcGIS при сложении (суммировании) растровых слоев

Анализ. Визуальный анализ разработанных ГИС-моделей Алтайского и Чарышского районов показал, что наименее теплообеспеченные участки территории этих районов располагаются на склонах хребтов северной экспозиции, а наиболее теплообеспеченные – в предгорной части территории, где преобладают пологие формы рельефа, преимущественно южной экспозиции (рис. 4).

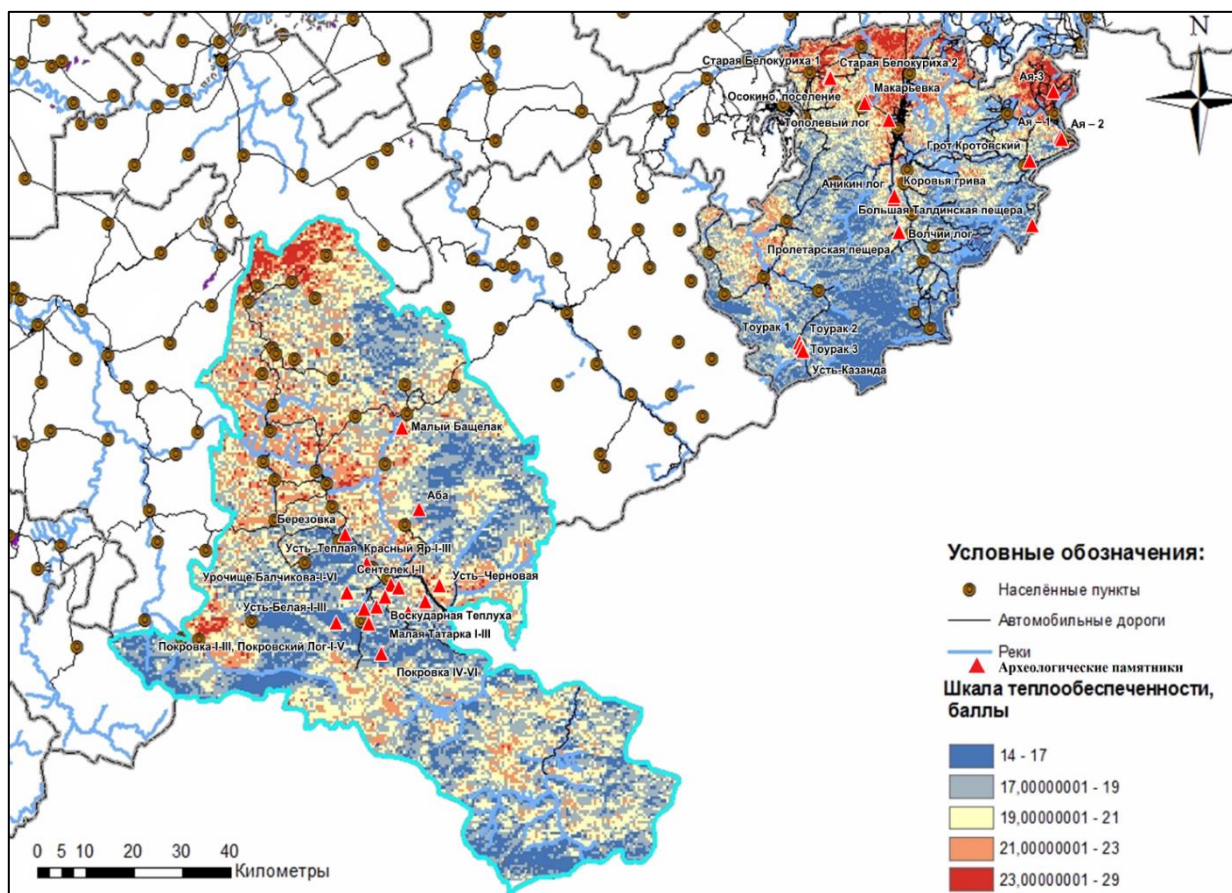


Рис. 4. ГИС-модель теплообеспеченности склонов с распределением археологических памятников в границах Чарышского и Алтайского районов

Для перехода от простого анализа к более строгому – количественному нами предложен алгоритм расчета пространственной корреляции, характеризующей не массив/модель в целом, а значения локальных областей. Алгоритм «пространственной корреляции» *Spatial Correlator* работает следующим образом: на входе указываются два массива/изображения А и В с одинаковым количеством значений, что соответствует равенству двух массивов. Далее с помощью функции `corr2 (A,B)` в программе MatLab выполняется вычисление коэффициента корреляции в начальной позиции RX_i, Y_i , где X_i, Y_i соответствуют центральному элементу скользящего окна (маски).

После этого полученное численное значение присваивается результирующему массиву в позиции R_{X_i, Y_i} и операция повторяется. Таким образом, завершается первый цикл. Далее следует новый цикл, который повторяется до тех пор, пока не будут обработаны все элементы массива/матрицы. Результирующая матрица (I), по сути – численная модель, но в то же время – пространственная, т.е. адаптированная для работы в ГИС-среде (рис. 5).

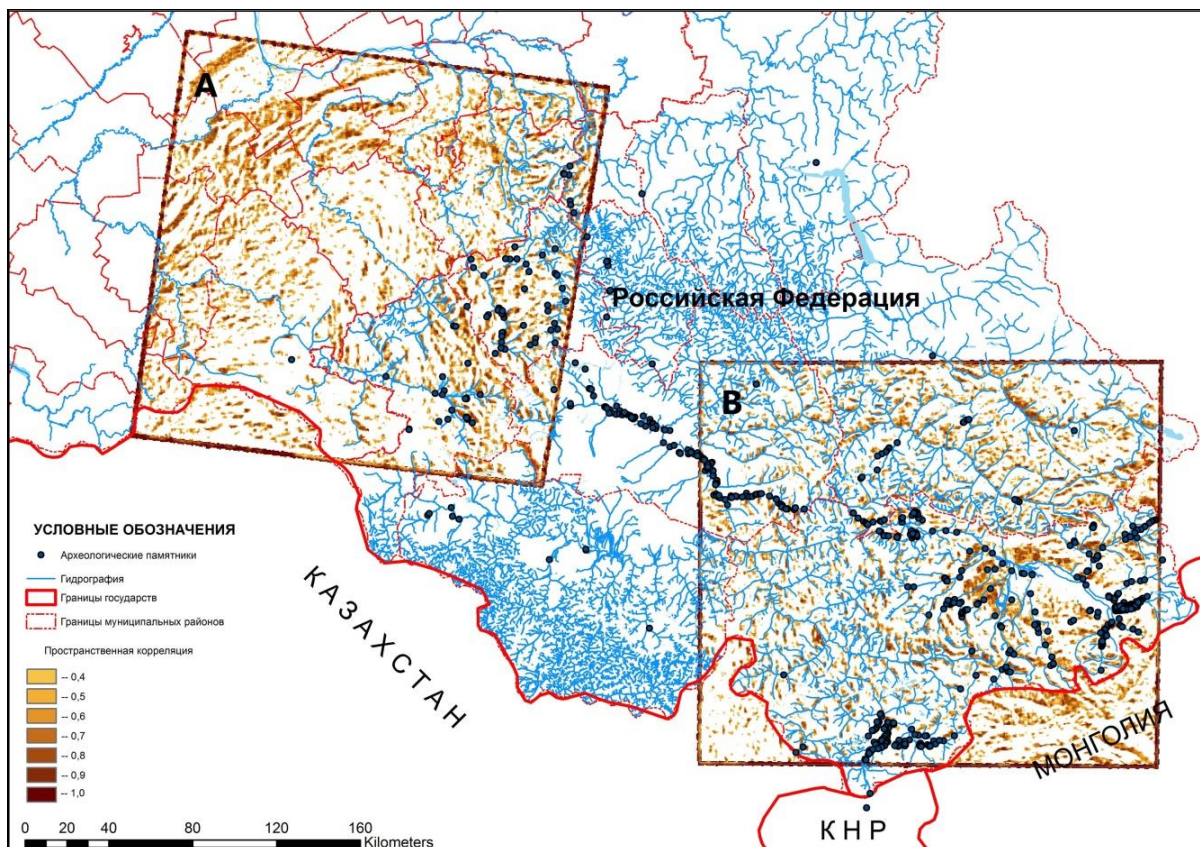


Рис. 5. ГИС-модели пространственной корреляции, совмещенные со слоем археологических памятников: А – первая модельная площадка, В – вторая модельная площадка

Интегральные модели, построенные для двух тестовых площадок, показали наличие зависимости в распределении археологических памятников от интегрального фактора теплообеспеченности (рис. 6). Большинство памятников сконцентрированы именно в таких участках. Если исходить из предположения «чем теплее, тем комфортнее», в долинах крупных рек это действительно подтверждается максимальной концентрацией археологических объектов на склонах южной и юго-западной экспозиции. Такие участки соответствуют наибольшей теплообеспеченности, на них сконцентрированы более 2/3 от общего коли-

чества археологических памятников, сосредоточенных преимущественно берегах рек. Вторым фактором, не менее важным, является близость к воде, что подтверждается практически на всех ГИС-моделях.

Выводы. В мировой науке археологическое наследие используется чрезвычайно широко в различных сферах жизни общества. Археологические объекты являются своего рода визитной карточкой многих европейских стран. Во многих странах (Египет, Италия, Греция и др.) туризм в значительной степени базируется на использовании археологического наследия, предполагает посещение древних памятников, музеев, памятных мест, приобретение сувениров, участие в проводимых театрализованных представлениях и прочих мероприятиях [2]. В этой связи предложенная методика и технология количественного описания и ГИС-картографирования теплообеспеченности одновременно охватывает две проблемные области. Первая – доказывает необходимость изучения теплообеспеченности как важнейшего фактора среды обитания человека (археологическая проблематика); вторая включает большинство морфометрических характеристик в алгоритм интегральной оценки туристско-рекреационного потенциала [3].

Авторами предложен новый алгоритм, разработана и протестирована новая программа вычисления пространственной корреляции на основе обнаружения параметрической связи внутри скользящего окна/маски. Уникальность предложенного аппарата состоит в следующем. Во-первых, с помощью модели пространственной корреляции появляется возможность перейти от обобщенного уровня анализа причинно-следственных связей к локальному или местному, выявляющему локальные «ядра» повышенных значений пространственной корреляции. Это дает основание говорить о том, что, к примеру, несмотря на преобладающие низкие или близкие к нулевым, значения корреляции связь между двумя наблюдаемыми явлениями присутствует в обнаруженных очагах. Отметим, что такой механизм практически никогда не использовался. Как правило, в расчетах, в том числе с использованием современных ГИС-технологий, принимался во внимание один общий коэффициент корреляции, рассчитанный между матрицами. Однако для более тщательного, глубокого анализа такой механизм ничего не дает. Во-вторых, результирующая корреляционная матрица является одновременно и изображением, и численной моделью (т.е. массивом данных). Такие универсальные свойства позволяют выполнять аналитические процедуры в программах математической обработки и в то же время – в геоинформационных системах. Например, появляется возможность настройки, классификации и группировки классов пикселей, соответствующим заданным поро-

гам. Автоматически это находит свое отражение в легенде. В-третьих, при условии географической привязки, обеспечивающей строгое математическое соответствие заданной системе координат, появляется возможность реализации оверлейных функций в ГИС – от простого соответствия с наборами векторных и растровых слоев, до математической обработки с использованием калькулятора растров и др. инструментов.

Предложенные инструменты и методика исследований имеют отношение, прежде всего, к научному туризму и в частности – археологическому. Это актуального и важно как для науки, так и для практической деятельности с позиции экономики региона. Предлагаемая методика оценки историко-культурного потенциала Алтайского региона основана на междисциплинарных подходах и методах. Это проявляется в синтезе математического и геоинформационного методов, что в дальнейшем будет способствовать решению прикладных задач оптимизации туристско-рекреационного хозяйства.

Библиографический список

1. Коробов Д.С. Система расселения алан Центрального Предкавказья в I тыс. н.э. / отв. ред. Г. Е. Афанасьев; Федер. гос. бюджет. учреждение науки Ин-т археологии Рос. акад. наук. – СПб.: Нестор-История, 2017. – Т. 1: Ландшафтная археология Кисловодской котловины. – 2017. – 383 с.
2. Крупочкин Е.П., Папин Д.В., Редников А.А., Федорук А.С. Археологический туризм в Алтайском крае: предпосылки и перспективы развития // Современные тенденции пространственного развития и приоритеты общественной географии: материалы Международной научной конференции в рамках IX ежегодной научной ассамблеи Ассоциации российских географов-обществоведов. – Т. 2. – Барнаул, 2018. – С. 94-103.
3. Крупочкин Е.П., Дирин Д.А., Дунец А.Н., Рыгалов Е.В. Количественное обоснование параметров регулярно-ячеистых моделей как метода численной оценки и ГИС-картографирования территорий // Ползуновский вестник. – 2016. – № 4, Т. 2. – С. 70-79.
4. Кузьмин Я.В. Геоархеология: естественнонаучные методы в археологических исследованиях / Нац. исслед. Том. гос. ун-т, Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2017. – 396 с.
5. Червяков В.А., Крупочкин Е.П., Барышникова О.Н., Колмакова И.А., Мардасова Е.В., Поляков А.А., Попова Т.Г. Теория и технология реги-

онального картографического моделирования: геоинформационные подходы: монография. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2005. – 136 с.

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, грант №18-05-00864.

References

1. Korobov D.S. The settlement system of the Alans of the Central Ciscaucasia in the 1-st millennium e. / resp.ed. G.E. Afanasyev; Feder. State budget. Institute of Science Institute of Archeology RAS. – SPb.: Nestor History, T. 1: Landscape archeology of the Kislovodsk hollow. – 2017. – 383 p.

2. Krupochkin E.P., Papin D.V., Rednikov A.A., Fedoruk A.S. Archaeological tourism in the Altai Territory: Prerequisites and Development Prospects // Modern trends in spatial development and priorities of Social Geography: Materials of an International Scientific Conference in the framework of the IX Annual Scientific assembly of the Association of Russian geographers-social scientists. – Part. 2. – Barnaul, 2018. – P. 94-103.

3. Krupochkin E.P., Dirin D.A., Dunets A.N., Rygalov E.V. Quantitative substantiation of the parameters of regular-cellular models as a method of numerical estimation and GIS-mapping of territories // Polzunovsky vestnik. – 2016. – No.4, Vol. 2. – P. 70-79.

4. Kuzmin Ya.V. Geoarcheology: natural science methods in archaeological research /Tomsk State University; RAS, Sib. Department, Institute of Geology and Mineralogy named after V.S. Sobolev. – Tomsk: TSU, 2017. – 396 p.

5. Chervyakov V.A., Krupochkin E.P., Baryshnikova O.N., Kolmakova I.A., Mardasova E.V., Polyakov A.A., Popova T.G.. Theory and technology of regional cartographic modeling: geographic information approaches: monography. – Barnaul: Altai State University, 2005. – 136 p.