

УДК 004.94:913.1

© И.В. Журбин, Р.П. Петров, О.Т. Чиркова

И.В. Журбин, Р.П. Петров, О.Т. Чиркова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОРОЖНОЙ СЕТИ МЕЖДУ ДРЕВНИМИ ПОСЕЛЕНИЯМИ: ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ АРХИВНЫХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Моделирование исторических явлений применяется для изучения различных аспектов экономического и политического развития общества, социально-демографических процессов, а также исследования исторического развития отдельных регионов и государств. При достаточном количестве исходных данных, содержащихся в письменных источниках, исторические реконструкции могут быть основаны на статистическом анализе, что обеспечивает достоверность и воспроизводимость результатов. Однако при изучении ранних периодов истории (археологических культур, описание которых отсутствует в источниках и картографических материалах) единственным объективным источником информации является набор материальных остатков – артефакты и древние сооружения, зафиксированные при раскопках. Ограниченность исходных данных определяет существенные проблемы при реконструкции исторических процессов и явлений. Исходя из этого, актуальным направлением является имитационное моделирование, основанное на специализированных подходах для формализации исторических данных, формировании адекватных моделей и разработке соответствующих математических методов анализа и оценки достоверности полученных реконструкций.

Изучение системы расселения и структуры государств, организации внутренних и внешних связей древних обществ предполагает анализ пространственно-организованных данных [1, 2]. В этом случае моделирование основано на учете возможного влияния физико-географических факторов (ландшафт, конфигурация гидросети и т.п.). В рамках данного направления наиболее сложной задачей является оценка конфигурации дорог между поселениями в древности.

Моделирование конфигурации древних дорог: основные подходы

Большинство известных моделей основано на предположении, что для путей экономического и культурного обмена выбирался участок местности, преодоление которого требовало минимальных

затрат энергии (трудозатрат), то есть наиболее вероятная дорога включала наименьшее количество подъемов, спусков и переправ через реки. При этом должен обеспечиваться компромисс между длиной пути и трудоемкостью его прохождения. Поэтому моделирование дорог между древними поселениями основано на решении задачи оптимизации.

Во многих известных моделях учитывается только один фактор, определяющий энергетические затраты – крутизна склонов. В отечественной практике исторических реконструкций известны модели систем дорог, выполненные встроенными средствами геоинформационной системы ArcGIS. В частности, при изучении степени близости поселений V-VIII вв. Кисловодской котловины к источникам воды, использовалась процедура расчета кратчайшего пути. При этом оценивались энергетические затраты на преодоление расстояния с учетом крутизны склона и его направления [3]. Данные средства также применялись при воссоздании системы связей между памятниками древнерусской Овручской Волости в X-XIII вв. [4, 5] и древнерусских памятников в микрорегионе Хотинской возвышенности [6]. Аналогичный принцип использовался при оценке территории ранних государств майя – выявлялись наиболее доступная для коммуникации территория вокруг каждого из политических центров (с учетом их политического веса), а также зоны пересечения смежных территорий [7]. Реконструкция путей коммуникации с помощью модуля Spatial Analyst в ArcGIS основана на априорном построении поверхности стоимости и последующем выявлении областей минимальной стоимости, в пределах которых определяется расположение вероятных путей коммуникаций.

Иногда применяются достаточно сложные оценки временных и энергетических затрат при перемещении по местности, которые основаны на значительном количестве дополнительных показателей. В частности, оценка «временных» затрат [8] предполагает расчет возможной скорости перемещения по участку с известной крутизной склона. «Энергетические» затраты оцениваются с точки

зрения показателя обмена веществ человека и учитывают возможные вес тела, вес груза, скорость, фактор, описывающий пересеченность местности и крутизну склона [9, 10]. Данные формализованные оценки обладают существенными недостатками – произвольность выбора формы зависимости, коэффициентов и значений большинства параметров, используемых при расчете затрат.

В целом существенным ограничением рассмотренных методов реконструкции дорог между поселениями в древности является использование единственного параметра ландшафта – рельефа. Очевидно, что на выбор конфигурации пути оказывают влияние и другие физико-географические факторы (например, водные преграды, леса, болота и пр.), необходимость преодоления которых также важно учитывать при оценке трудозатрат.

В рамках изучения археологических культур в северной части Удмуртии разработан метод моделирования конфигурации древних дорог. На его основе изучаются различные аспекты формирования и развития региона в эпоху средневековья [11, 12]. Метод основан на комплексном критерии оценки трудоемкости пути с учетом особенностей изменения рельефа, возможности преодоления водных преград и использует однозначно фиксируемые археологические признаки (расположение поселений, определение их функций и вероятной структуры взаимодействия, транспортных средств и системы хозяйства) [13]. Модель позволяет вводить дополнительные параметры, которые могли влиять на выбор конфигурации путей (например, участки потенциальных переправ, леса или болота). Для моделирования оптимального пути предлагается использовать построение динамической поверхности стоимости, которая вычисляется в процессе формирования пути и может меняться в зависимости от изменения конфигурации той части, которая уже «построена». Отличие предложенного подхода состоит в том, что оценивается не стоимость каждой точки поверхности, а стоимость перехода из текущей точки в любую смежную, что оказывает значительное влияние на конфигурацию построенного пути [14]. Следовательно, предложенный метод моделирует динамику перемещения по выбранной траектории движения.

Эталонные объекты для тестирования модели

Верификация разработанного метода предлагает соотнесение результатов моделирования древних путей с «эталонными» дорогами – реальными дорогами, которые отображены на исторических картах. Аналогичный подход успешно применялся при изучении древних путей коммуникации острова Кипр [8], а также при изучении сухопутных комму-

никаций Скифии [15]. В качестве эталона использовались дороги, нанесенные на карту Вятской губернии, созданную в 1888-1898 гг. по данным Вятского статистического бюро в масштабе в 1 английском дюйме – 3 версты (что соответствует М 1:126 000). Очевидно, что информация о средневековых дорогах на карте Вятской губернии отсутствует. Однако на территории исследований система хозяйства населения и транспорт принципиально не изменились с периода средневековья (установление регулярного речного пароходного движения на территории Удмуртии – 1840-е гг.; прокладка железных дорог – 1870 г. – 1890-е гг.). Следовательно, до второй половины XIX в. использовались те же транспортные средства и, вероятно, аналогичные принципы формирования дорожной сети, что и в более ранние исторические периоды. Это позволяет предположить, что дороги, нанесенные на исторические карты, либо повторяют конфигурацию старых дорог, либо проложены с учетом возможностей традиционных транспортных средств. Исходя из этого, картографические объекты, зафиксированные на исторических картах, могут рассматриваться как эталонные для оценки достоверности моделирования (рис. 1). Использование данных исторических карт определяет необходимость приведения исторической карты к современной картографической основе – векторной цифровой схеме муниципальных образований Удмуртской Республики (универсальная поперечная проекция Меркатора (UTM), 39-я зона северного полушария), созданной в 2007 г. по данным кадастрового учета, материалам космической съемки и полевого трассирования основных дорог с помощью GPS-аппаратуры.

Трансформация карты Вятской губернии 1888-1898 гг. осуществлялась с использованием аффинных преобразований в геоинформационной системе MapInfo (рис. 2а). При этом историческая карта была разбита на локальные области, размеры которых допускают компенсацию искажений (рис. 1). Привязки каждой локальной области осуществлялась за счет выявления стабильных во времени и пространстве картографических объектов (крупные населенные пункты, стыки рек и т.п.). По множеству контрольных точек производился перерасчет системы координат исторической карты к координатной системе современной топоосновы (рис. 2б) и соответствующая трансформация исторической карты. Далее для каждой преобразованной локальной области исторической карты выполнена векторизация сети дорог – формирование набора «эталонных» путей, которые использовались для сравнения с «модельными» путями между поселениями.

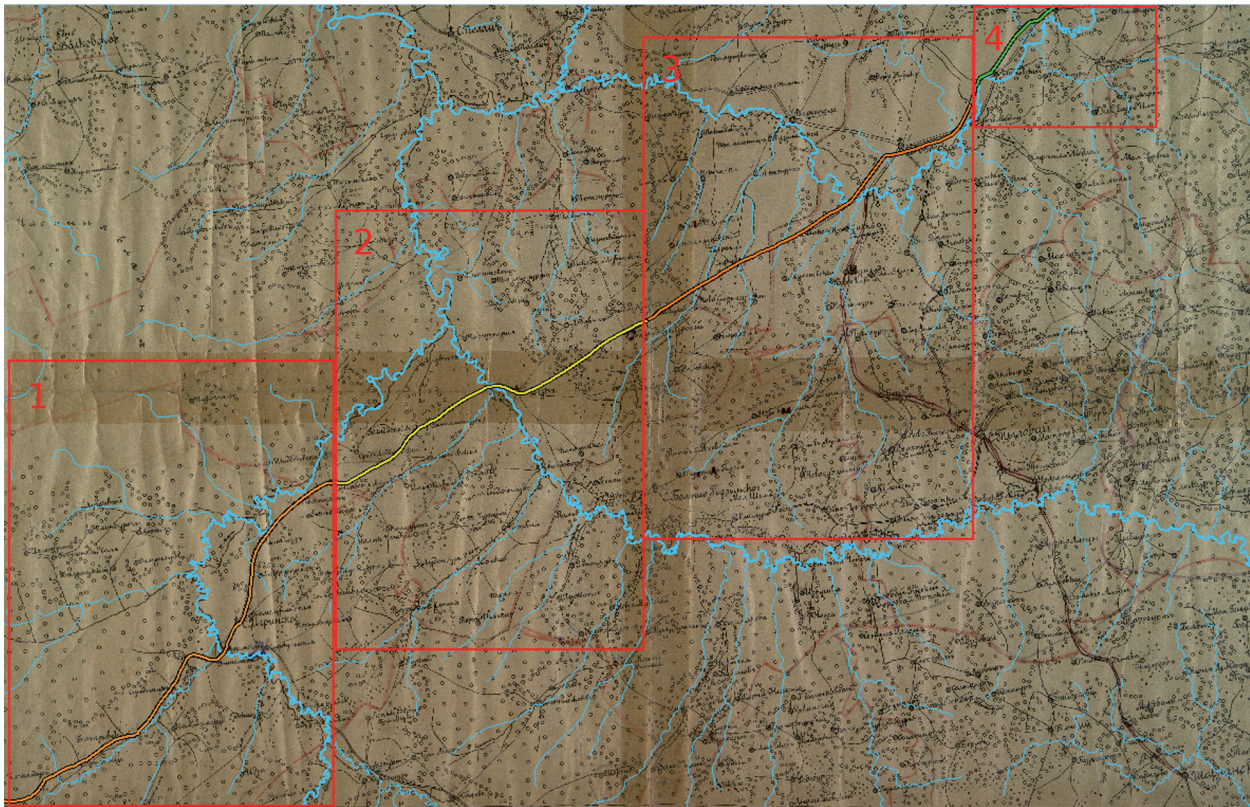


Рис. 1. Фрагмент карты Вятской губернии 1888-1898 гг.

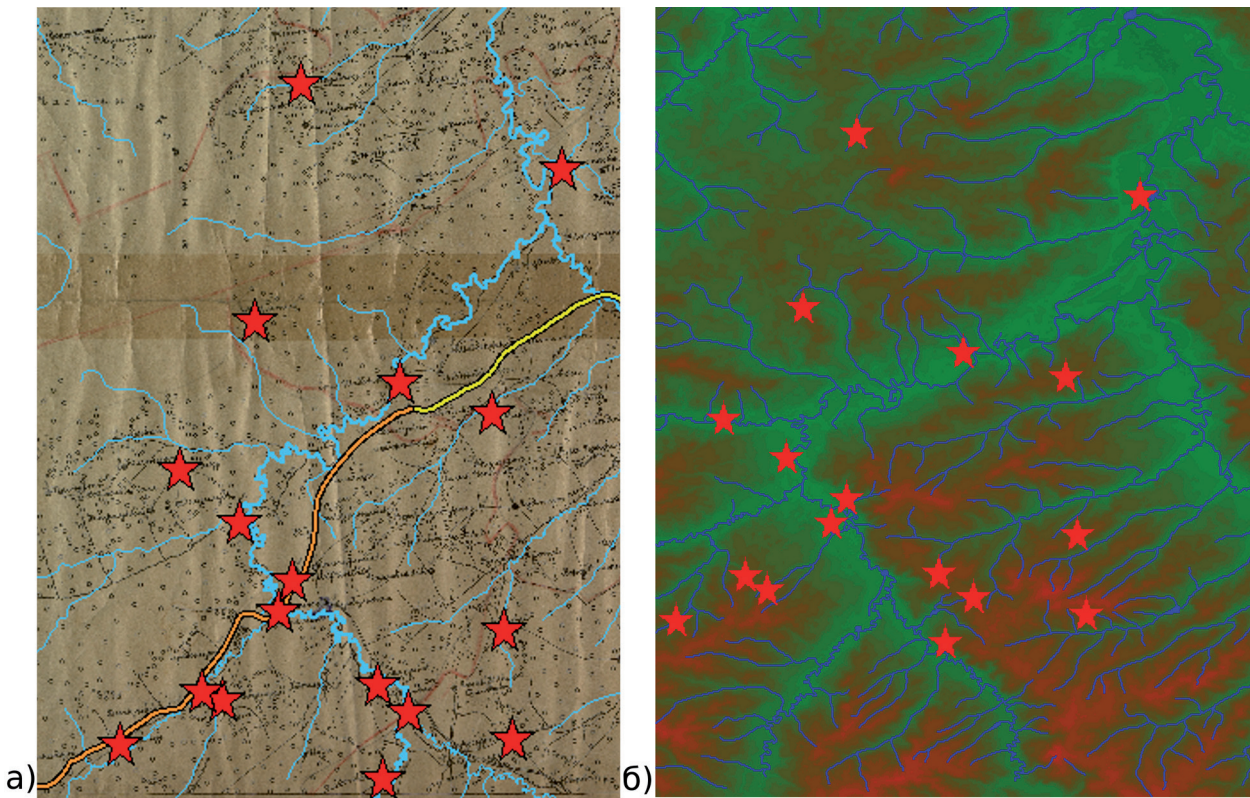


Рис. 2. Трансформация исторической карты (участок Быльское – Чимосур): а) фрагмент исходной карты; б) расположение контрольных точек на современной топооснове

Учитывая, что в архивах карты хранились длительное время (иногда в ненадлежащих условиях), их бумажная основа может быть деформирована, что вызывает искажение карты. Еще одной причиной возникновения погрешностей может являться некорректность геодезической съемки. Метод наименьших квадратов позволяет подобрать параметры трансформации, которые минимизируют среднюю ошибку привязки множества контрольных точек и в некоторой степени компенсирует искажения фрагмента карты в целом.

Для верификации модели был выбран фрагмент карты Вятской губернии, содержащий участок Сибирского тракта от Быльского до Большой Чепцы (рис. 1). Сибирский тракт начал формироваться в XV в., а к XIX в. проходил почти по всей территории России от Санкт-Петербурга и Москвы на западе и до городов Охотск, Кяхта и Чита на востоке. Протяженность по территории Удмуртии составляет 385 км. Сибирский тракт имел всероссийское значение в административном, торговом, почтовом назначении и, вероятно, нанесен на историческую карту Вятской губернии с наибольшей точностью. Именно поэтому данный объект был использован в качестве ориентира при привязке фрагментов карты. Прилегающая территория разбивалась на локальные области, включающие следующие участки тракта: Быльское – Чемашур (Участок 1), Чемашур – Бадзимошур (Участок 2), Бадзимошур – Усть-Медла (Участок 3), Усть-Медла – Большая Чепца (Участок 4) (на рис. 1 границы участков показаны красными линиями). Рассматриваемая территория покрывает примерно 20% территории северной части Удмуртской республики, что обеспечивает широкую вариабельность рельефа (встречаются как равнинные территории, так и возвышенности). Это дает возможность тестирования модели при различных физико-географических параметрах.

Для каждой локальной области формировалось множество контрольных точек, содержащих также точки, принадлежащие областям пересечения смежных локальных областей. После трансформации фрагмента исторической карты вычислялись

оценки средней ошибки привязки и среднеквадратическое отклонение контрольных точек (табл.1), которые определяли точность построения «модельных» путей.

Данная процедура позволяет восстановить с прогнозируемой погрешностью конфигурацию «эталонных» дорог на современной цифровой модели местности. При этом возможно получение дополнительной информации для оценки и тестирования модели – выявление участков переправ через реки, границ лесов, а также и других картографических объектов, нанесенных на исторической карте. Соответственно, при реконструкции конфигурации дорог между древними поселениями возникает возможность формирования «зон притяжения» (переправы) и «зон отталкивания» (леса, болота) на современной модели местности. Введение дополнительных параметров позволило оценить их информативность при имитационном моделировании исторической дорожной сети.

Верификация модели

В предложенной модели трудоемкость зависит от фактической длины пути, особенностей рельефа по возможному маршруту следования и количества вероятных переправ через водные преграды. Разработанный метод расчета условно оптимальной дороги обеспечивает компромисс между длиной пути и трудоемкостью ее прохождения. Модель в целом адекватно отражает историческую и ландшафтную ситуацию [13]. С целью развития модели вводился новый параметр – расположение участков переправ, отмеченных на исторических картах. Далее с помощью разработанного метода моделировались пути между населенными пунктами, которые соединены «эталонными» дорогами. Первоначально моделировались пути только с учетом рельефа и гидросети, а затем пути между теми же населенными пунктами с учетом переправ (рис. 3а). Введение в модель дополнительного параметра оказывает влияние на конфигурацию «модельных» дорог. В частности, путь между населенными пунктами Быльский и Бишкуевская, построенный без учета потенциального участка

Таблица 1

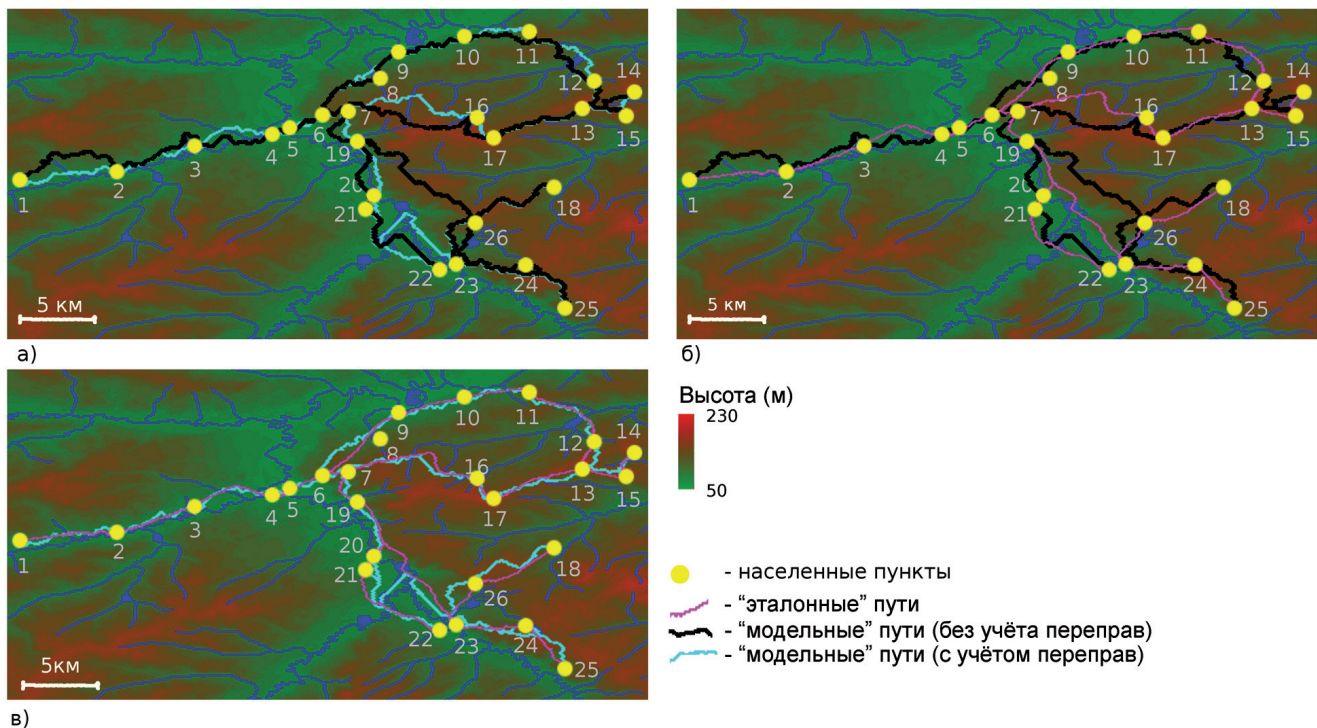
Результаты трансформации локальных областей исторической карты

	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4
Количество контрольных точек	17	13	17	10
Средняя ошибка привязки (м)	314,37	338,60	359,76	173,50
Среднеквадратическое отклонение (м)	116,68	155,52	133,01	80,12

переправ, существенно отличался от «эталонного», а введение дополнительного параметра обеспечило практически полное совпадение «модельного» пути и дороги, отмеченной на исторической карте (сравн. рис. 3б и 3в). Аналогичная ситуация наблюдается при моделировании дорог между населенными пунктами Сундошур и Унтемский, Камешнинская и Баивал, Верхний Кулегурт и Лудошур и т.д. В некоторых случаях (Кутья Правая–Вукогурт) введение переправ принципиально не изменило конфигурацию «модельного» пути. В целом визуальный анализ демонстрирует эффективность введения дополнительного параметра. Реконструированная система дорожной сети, учитывающая участки потенциальных переправ, обеспечивает большую степень соответствия с исторической картой (рис. 3).

Для анализа корректности построения «модельных» путей вводятся две оценки: первая основана

на сравнении длин, а вторая – на сравнении конфигурации дорог [16]. Для дорог между каждой парой поселений численное значение оценки по длине пути вычисляется аналогично относительной погрешности – отношение разности между длинами «модельного» и «эталонного» пути к длине «эталонного» пути. При верификации модели (табл. 2, 3) в качестве порогового значения для данной оценки принята величина, аналогичная коэффициенту вариации: отношение среднееквadrатического отклонения контрольных точек локальной области исторической карты, в которой расположены поселения, к соответствующей средней ошибке привязки (табл. 1). Вторая оценка (сравнение конфигурации) вычисляется как отношение площади территории, заключенной между «модельной» и «эталонной» дорогами, к длине «эталонного» пути. В качестве порогового значения использовалось среднееквadra-



Условные обозначения

(названия населенных пунктов приведены в соответствии с картой Вятской губернии 1888-1898 гг.):

1 – Быльский, 2 – Бишкуевская, 3 – Сундошур, 4 – Унтемский, 5 – Лозинский, 6 – Игринское, 7 – Камешнинская, 8 – Макрушинский, 9 – Чемашур, 10 – Кабачегурт, 11 – Шербетьевская, 12 – Ильяпиевский, 13 – Кулегурт, 14 – Верхний Кулегурт, 15 – Лудошур, 16 – Баивал, 17 – Козмовырский, 18 – Порвай, 19 – Сурдульская, 20 – Кутья Правая, 21 – Кутья Левая, 22 – Куклешур, 23 – Вукогурт, 24 – Малые Мазги, 25 – Юберово, 26 – Лонки-Ворци.

Рис. 3. Моделирование дорожной сети между поселениями (участок Бельское – Чимошур):
 а) конфигурация «модельных» путей при различных параметрах модели; б) сравнение конфигурации «эталонных» и «модельных» путей (рельеф и гидросеть); в) сравнение конфигурации «эталонных» и «модельных» путей (рельеф, гидросеть, участки потенциальных переправ)

тическое отклонение контрольных точек карты на текущем локальном участке.

На выбранных участках исторической карты моделировались пути между всеми населенными пунктами, соединенными эталонными дорогами. В частности, для участка Быльское – Чемашур (Участок 1) при моделировании с учетом рельефа и гидросети пороговую оценку по длине пути не превышает 19 из 26 путей (73%), а оценку по конфигурации – 24 из 26 путей (92%). Комплексная оценка является пересечением этих подмножеств и рассчитывается как отношение количества путей, не превосходящих оба пороговых значения, к общему количеству путей. В целом по данному участку комплексной оценке удовлетворяет 69% дорог. Введение в модель участков потенциальных переправ существенно улучшает ситуацию: оценку по длине пути не превышает 22 из 26 путей (85%), оценку по конфигурации – 26 из 26 путей (100%). Комплексной оценке удовлетворяет 85% путей. Аналогичная ситуация наблюдается при моделировании дорог на

всех 4 участках трансформированной исторической карты (табл. 2, 3).

Сравнительный анализ показывает, что точность разработанного метода с учетом рельефа и гидросети составляет не ниже 50%, что, учитывая нетривиальность задачи и ограниченность исходных данных, является хорошим результатом. Но введение дополнительного параметра (участки потенциальных переправ) позволяет существенно улучшить результаты моделирования конфигурации дорог.

Очевидно, что любые реконструкции исторических процессов, основанные на имитационном моделировании, носят вероятностный характер, то есть определяют возможный «диапазон» вариантов, в котором протекал реальный процесс. Границы «диапазона» могут быть получены на основе ряда компьютерных экспериментов, реализующих различные «сценарии» возможного развития событий. Именно такой подход обеспечивает верификацию гипотез и, соответственно, достоверность результатов моделирования исторических процессов и явлений.

Таблица 2

Соответствие «модельных» путей «эталонным» (без учета переправ)

	Кол-во путей	Оценка длины пути (%)	Оценка конфигурации (%)	Комплексная оценка (%)
Участок 1	26	73	92	69
Участок 2	58	81	84	74
Участок 3	22	86	100	86
Участок 4	24	71	58	50

Таблица 3

Соответствие «модельных» путей «эталонным» (с учетом переправ)

	Кол-во путей	Оценка длины пути (%)	Оценка конфигурации (%)	Комплексная оценка (%)
Участок 1	26	85	100	85
Участок 2	58	95	93	91
Участок 3	22	95	100	95
Участок 4	24	83	75	67

Исследования выполняются при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН, грант 12-М-26-2005.

Ключевые слова: дорожная сеть, поселения, стоимость (трудоемкость) пути, рельеф, гидросеть, переправы, исторические карты, Сибирский тракт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wheatley D., Gillings M. Spatial Technology and Archaeology. The archaeological applications of GIS. – London : Taylor & Francis, 2002. – 234 p.
2. Conolly J., Lake M. Geographical Information Systems in Archaeology. – United Kingdom : Cambridge University Press, 2006. – 338 p. – (Cambridge Manuals in Archaeology).
3. Коробов Д.С. Применение методов пространственного анализа при изучении системы расселения алан Кисловодской котловины // Археология и геоинформатика [Электронный ресурс]. – М. : Институт археологии РАН, 2008. – Вып. 5. – 1 CD-ROM.
4. Вовкодав С.М. Методы ГИС-моделирования коммуникационных сетей древних систем заселения // Археологические памятники Восточной Европы : межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж : Научная книга, 2009. – Вып. 13. – С. 238-241.
5. Томашевский А.П., Вовкодав С.М. Археолого-геоинформационная система «Овручский проект» // Археология и геоинформатика [Электронный ресурс]. – М. : Институт археологии РАН, 2007. – Вып. 4. – 1 CD-ROM.
6. Манигда О.В. Реконструкция ближайших коммуникаций древнерусских памятников в микрорегионе Хотинской возвышенности с помощью модуля Spatial Analyst. Методический аспект // Археология и геоинформатика [Электронный ресурс]. – М. : Институт археологии РАН, 2012. – Вып. 7. – 1 CD-ROM.
7. Сафронов А.В. Методы пространственного анализа ГИС в исследовании структуры раннего государства древних майя // Археология и геоинформатика [Электронный ресурс]. – М. : Институт археологии РАН, 2012. – Вып. 7. – 1 CD-ROM.
8. Ejstrup B. Cost surface analysis and ancient roads : a comparison // Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modeles spatiaux en archeologie. Actes des XXVe rencontres internationales d'archeologie et d'histoire d'Antibes, 21-23 octobre 2004. – Antibes : Editions APDCA, 2005. – P. 135-139.
9. Leusen P.M. Pattern to Process: Methodological Investigations into the Formation and Interpretation of Spatial Patterns in Archaeological Landscapes : diss., 2002 [Electronic resource] // University of Groningen : Dissertations – URL: <http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/arts/2002/p.m.van.leusen> (date of access: 16.01.2012).
10. Pandolf K.B., Givoni B., Goldman R.F. Predicting energy with loads while standing or walking very slowly // Journal of Applied Physiology. – 1977. – Vol. 43. – P. 577-581.
11. Зубарева О.Т., Груздев Д.В., Журбин И.В. Комплексный метод моделирования границ и структуры археологической культуры // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1 (19). – С. 23-28.
12. Журбин И.В., Иванова М.Г., Зубарева О.Т. Имитационная модель формирования и развития археологической культуры // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. – 2012. – № 2. – С. 64-76.
13. Зубарева О.Т., Груздев Д.В., Журбин И.В. Реконструкция путей коммуникаций между древними поселениями средствами ГИС // Геоинформатика. – 2012. – № 2. – С. 9-14.
14. Зубарева О.Т., Груздев Д.В. Моделирование конфигурации историко-географических объектов на основе цифровой модели рельефа. – Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012611247; Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.01.2012.
15. Болтрик Ю.В. Сухопутные коммуникации Скифии (по материалам новостроечных исследований от Приазовья до Днепра) // Советская археология. – 1990. – № 4. С. 30-44.
16. Зубарева О.Т., Петров Р.П., Журбин И.В. Верификация методов анализа пространственно-организованной исторической информации на основе картографических материалов XVIII-XIX вв. // Информационный бюллетень Ассоциации «История и компьютер». – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. – № 40: Компьютерные технологии и математические методы в исторических исследованиях : материалы III междунар. науч. конф. (Петрозаводск, 1-7 июля 2013 г.). – С. 75-79.