

МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ СЕТИ ИСТОРИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ТРУДОЗАТРАТ*

METHOD FOR RECONSTRUCTION OF HISTORICAL REGION ROAD NETWORK BASED ON THE OPTIMIZATION LABOR

Журбин Игорь Витальевич,

доктор исторических наук., кандидат технических наук, заведующий лабораторией Физико-технического института УрО РАН
E-mail: zhurbin@udm.ru

Igor V. Zhurbin

Груздев Данил Вячеславович,

ведущий программист Физико-технического института УрО РАН
E-mail: dgruzdev@mail.ru

Danil I. Gruzdev

Петров Рудольф Павлович,

ведущий математик Физико-технического института УрО РАН
E-mail: zhurbin@udm.ru

Rudolf P. Petrov

Чиркова Ольга Тимофеевна,

младший научный сотрудник Физико-технического института УрО РАН
E-mail: helga786@mail.ru

Olga T. Chirkova

Разработанный метод позволяет моделировать конфигурацию исторической дорожной сети. Оптимизация обеспечивает компромисс между длиной пути и трудоемкостью его прохождения. На основе анализа физико-географических условий региона (северная часть Удмуртии) и результатов компьютерного эксперимента обоснованы коэффициенты сложности рельефа и преодоления водных преград. Использование исторических карт (карта Вятской губернии 1888–1898 гг.) для верификации модели доказало достоверность результатов моделирования.

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

The developed method makes it possible to simulate the configuration of the historical road network. Optimization provides a compromise between the length of the path and the laboriousness of its passage. Factor of relief and water barriers overcoming have proved based on the analysis of physical and geographical conditions of the region (northern part of Udmurtia) and the results of the computer experiment. The use of historical maps (map of Vyatka province 1888–1898 gg.) to verify the accuracy of the model has proven simulation results.

Keywords: modeling, road network, optimization method, the cost (laboriousness) of the path, relief, hydronetwork, crossing, historical maps, Siberian highway.

* Исследования выполнены при поддержке Программы УрО РАН «Традиции и инновации в истории и культуре», проект № 15–13–26–4.

Моделирование исторических процессов и явлений осложнено неполнотой источников, их разрозненностью и разнообразием форм представления информации. Особенно контрастно эти ограничения проявляются при моделировании в археологии. Очевидно, что археологические памятники, известные в настоящее время, являются лишь частью из существовавших в древности — многие уничтожены в результате исторических процессов, техногенных преобразований и природных катаклизмов. Часть объектов историко-культурного наследия до сих пор не выявлена.

Одним из направлений моделирования в археологии является реконструкция путей коммуникаций между поселениями в древности. Известны лишь единичные случаи таких объектов, сохранившихся до настоящего времени. Наиболее выразительны римские дороги (IV в. до н.э. — VI в. н.э.), охватившие всю территорию от Британии до Ефрата, включая всю Западную Европу и северное побережье Африки; система дорог вокруг каньона Чако, расположенного в штате Нью-Мексико США (XI в. н.э.), и дороги инков (XV–XVI вв. н.э.) на юго-западе Южной Америки. Эти сети коммуникаций создавались как сложные инженерно-технические сооружения, что является причиной их долговечности. Но в абсолютном большинстве случаев самих дорог и их следов практически не осталось. Следовательно, моделирование является едва ли не единственным способом поиска вероятных путей коммуникаций. Реконструкция дорожной сети, существовавшей в древности, позволит решать важные научные и прикладные задачи. В частности, полагая, что населенные пункты, могильники и ритуальные центры располагались вдоль существовавших дорог, представится возможность прогнозировать области расположения еще не выявленных археологических объектов.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПУТЕЙ КОММУНИКАЦИЙ: ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ

Существует несколько подходов к решению задачи поиска путей коммуникаций в древности. Наиболее достоверные результаты основаны на статистической обработке аэро- и космоснимков различных типов, масштабов и дат съемки¹. При выделении признаков древней дорожной сети сельской округи Танаиса анализ данных дистанционного зондирования позволил выявить сохранившиеся фрагменты дорог на открытых участках пахоты, исключая территории современной активной антропогенной деятельности (огороды, газопроводы, профильные грунтовые дороги

и пр.). Аналогичные результаты дает картографирование выраженных археологических признаков (цепочки курганов, расположенные вдоль древних дорог), которые использовались при локализации системы коммуникаций Восточного Крыма². В рамках этого подхода дорожная сеть выявляется фрагментарно, что не позволяет в полной мере использовать данный опыт для оценки системы связей.

При отсутствии сохранившихся внешних признаков реконструкция вероятных путей коммуникаций основывается на анализе факторов, обеспечивающих удобство перемещения. В частности, при реконструкции дорог на юге Узбекистана предполагалось, что основные трассы экономического и культурного обмена шли вдоль рек. Для сокращения времени перехода допускалась возможность преодоления относительно невысоких перевалов³. Таким образом, при восстановлении путей принимались во внимание рельеф региона и особенности климата (необходимость близости водных ресурсов). При реконструкции древних торговых путей в греческой провинции Этолия предполагалось, что с наибольшей вероятностью выбирался путь, требующий минимальных затрат энергии (трудозатрат) на его преодоление, т. е. включающий наименьшее количество подъемов, спусков и переправ через реки⁴. При этом между парами населенных пунктов эмпирически определялся путь минимальной длины без учета трудозатрат, а затем — наименее трудоемкий путь без учета пройденного расстояния. На основе двух предельных вариантов путей выбирался третий, который является компромиссом между найденными путями и обеспечивает баланс между длиной и трудозатратами. Предполагается, что именно этот путь соответствует существовавшей дороге. При очевидном преимуществе используемого критерия (оценка трудозатрат), ограничением является эмпирический метод поиска пути. В целом, при данном подходе предложенные варианты путей являются скорее схемой, основанной на логике и учитывающей основные особенности местности. Очевидно, что применение экспертных оценок без обоснованной верификации результатов не обеспечивает их достоверность.

Применение геоинформационных систем существенно расширяет возможности реконструкции путей коммуникации на основе оценки трудозатрат. Во многих известных моделях учитывается только один фактор, определяющий энергетические затраты, — крутизна склонов. При этом существуют различные способы расчета его влияния при интерактивном вводе порогового значения, определенного на основе экспертных оценок⁵. В рамках данного подхода разработаны достаточно сложные оценки временных и энергетических затрат при перемещении по местности с известным уклоном

поверхности, которые основаны на значительном количестве дополнительных показателей. Предложенная оценка «временных» затрат⁶ 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 склона⁷. Предлагаемая формализованная оценка обладает существенным недостатком — произвольность выбора формы зависимости, коэффициентов и значений большинства параметров, используемых при расчете затрат.

В целом, все перечисленные исследования учитывали лишь некоторые из возможных факторов, влияющих на выбор маршрута. В отличие от рассмотренных подходов к моделированию дорожной сети предлагается комплексный критерий оценки трудоемкости пути с учетом не только особенностей изменения рельефа, но и возможности преодоления водных преград и однозначно фиксируемых археологических признаков (расположение поселений, существовавших одновременно). В качестве региона исследований выбрана северная часть Удмуртской Республики, где в среднем течении реки Чепцы и ее притоков в IX–XIII вв. н.э. существовала чепецкая археологическая культура. Население вело комплексное хозяйство, сочетающее скотоводство, земледелие, охоту, рыболовство и бортничество. Известно 16 городищ и 32 селища, принадлежащих этой культуре⁸. Исходными данными для моделирования путей между поселениями являются:

- картографическая основа, включающая границы административного деления (муниципальных районов), населенные пункты, дороги и гидросеть по состоянию на 2007 г. (картографические материалы предоставлены ЗАО НТП «Ижтехинформ», Ижевск);
- рельеф изучаемой территории, представленный в виде матрицы высот с постоянным шагом 30 сек⁹;
- картографическая база данных средневековых археологических памятников Удмуртской Республики¹⁰, содержащая атрибутивную информацию и географические координаты объектов (материалы предоставлены автономным учреждением культуры Удмуртской республики «Центр по охране объектов культурного наследия», Ижевск).

Совместный анализ разноплановой картографической информации и решение задачи оптимизации позволяет моделировать пути коммуникаций.

МЕТОД ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ПУТИ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ

Реконструкция путей коммуникаций между древними поселениями базируется на предположении о том, что человек стремится минимизировать усилия на преодоление маршрута, т.е. затратить как можно меньше энергии для достижения конечного пункта. Очевидно, длина пути является существенной составляющей его стоимости, но существуют и другие затраты. При передвижении по местности встречаются естественные преграды, которые необходимо (или желательно) обходить (горы, овраги, озера и пр.), а также препятствия, которые можно преодолеть (например, реки или небольшие возвышенности). В предложенной модели трудоемкость зависит от фактической длины пути, особенностей рельефа по возможному маршруту следования и количества вероятных переправ через водные преграды. Под стоимостью (трудоемкостью) пути понимается суммарные трудозатраты на его прохождение.

Для поиска пути минимальной трудоемкости с учетом всего комплекса факторов использован алгоритм оптимизации A*. Этот эвристический алгоритм учитывает направление поиска (что обеспечивает достаточно высокое быстродействие), а также оптимизацию траектории перемещения с учетом оставшейся длины пути и стоимости пройденного участка¹¹. Основным достоинством A* является его гибкость при вычислении трудоемкости пути, что принципиально в рамках рассматриваемого подхода.

Для нахождения длины и стоимости (трудоемкости) вероятного пути используются данные о рельефе изучаемой территории, представленные в виде матрицы, элементами которой являются значения высот в узловых точках. Узловые точки — это узлы равномерной квадратной сетки с шагом 30 сек (около 92,6 м) в системе координат WGS-84. На основе матрицы вычисляется расстояние по поверхности между узлами и угол уклона. В целом, стоимость перехода из одной узловой точки в другую зависит от угла уклона поверхности при перемещении из текущего узла в любой соседний (для разных соседей она будет различной) и водных преград, которые при этом могут быть преодолены. Стоимость (C) вычисляется как произведение фактического расстояния по поверхности (L) с учетом рельефа, коэффициента сложности рельефа (K_p) и коэффициента сложности гидросети (K_r):

$$C = L \times K_p \times K_r.$$

Рельеф и гидросеть рассматриваются как равнозначные факторы, поэтому диапазон допустимых значений коэффициентов их влияния совпадает —

0–100. Величина в текущей точке принимается как доля от максимально возможного значения (непреодолимые преграды). Учет этих параметров может увеличить общую длину «модельного» пути за счет обхода естественных преград, но при этом происходит оптимизация по трудоемкости всего пути.

Значение коэффициента сложности рельефа вычисляется на основе принятого ранжирования уклона земной поверхности¹². При этом трудоемкость преодоления участка пути для каждого типа рельефа определяется за счет приведения диапазона возможных углов уклона поверхности [0, 24] к диапазону допустимых значений коэффициентов (табл. 1). Значение K_p в каждом из выделенных поддиапазонов постоянно и равно округленному до целого значению верхней границы поддиапазона.

Таблица 1
Зависимость стоимости пути от типа рельефа

Тип рельефа	Угол уклона, град.	K_p
Равнинный плоский	0,5	2
Равнинный волнистый	0,5–1	4
Равнинно-холмистый	1–4	17
Холмистый	4–7	29
Гористый	7–24	100
Горный	>24	∞

Для имитации непреодолимых преград вводится порог по высоте: узел считается непроходимым, если угол уклона при переходе в него из соседнего узла более 24 градусов. Аналогичный подход при имитации непреодолимых преград используется при исторических реконструкциях¹³. Данное ограничение следует исходя из физико-географических характеристик региона исследований: увалистая равнина с хорошо выраженной овражно-балочной сетью, преобладание склонов крутизной 6–10 градусов. Район исследования отличается наиболее сложным рельефом по сравнению с другими районами Удмуртии¹⁴.

Исследования зависимости трудоемкости прохождения пути от угла уклона поверхности показали, что для преодоления подъема или спуска равной крутизны необходимо приложить приблизительно равные усилия¹⁵. Поэтому принимается, что трудоемкость совпадает для равных значений положительных и отрицательных углов уклона поверхности.

При моделировании путей коммуникаций полагаем, что коэффициент сложности при переходе через реку (K_r) в большей степени определяется временем года и видом транспорта (табл. 2). В зависимости от времени года предлагается условное разделение путей на зимние и летние. При построении зимнего пути реки не рассматриваются как водоемы, так как при замерзании они могут быть ис-

пользованы для передвижения на «сухопутных» транспортных средствах. Необходимость рассмотрения возможности «зимнего» пути определяется продолжительным периодом ледостава на реках севера Удмуртии (158–162 дня): среднее время установления ледостава — первая декада ноября, а вскрытия — первая декада апреля¹⁶. В этом случае K_r принимается равным 1, что исключает влияние рек на общую стоимость пути. Летние пути, учитывая вид транспорта, могли быть водными и сухопутными. Водные летние пути проходили преимущественно по рекам (насколько это было возможно) и имели лишь небольшие сухопутные участки. Учитывая, что перемещения по воде даже больших грузов требует значительно меньших усилий (соответственно, предпочтителен выбор такого пути), коэффициент сложности принимается равным 0,5. Сухопутные летние пути условно делятся на сухопутные с переправами и сухопутные без переправ. При выборе сухопутного пути без переправ рекам назначается максимально допустимый весовой коэффициент 100. Непреодолимыми считаются «планарные» водные объекты (озера, пруды, водохранилища). Сухопутный путь без переправ мог и не существовать (поселения находятся на разных берегах реки), либо, если он существовал, длина пути была настолько велика, что нецелесообразно было им пользоваться.

Таблица 2
Зависимость стоимости пути от водных преград и типа пути

Тип пути	K_r
Сухопутный без переправ	100
Сухопутный с переправами	50
Зимний	1
Водный	0.5

В рамках разработанной модели как наиболее универсальный рассматривается сухопутный путь с минимальным количеством переправ. Данный подход принят при исторических реконструкциях¹⁷. Такой путь существует всегда и может использоваться в любое время года. При моделировании такого типа пути возникает необходимость обоснования выбора значения весового коэффициента K_r из диапазона значений от 1 («зимний» путь) до 100 (сухопутный путь без переправ).

Разработанная оценка основана на анализе влияния изменения значения K_r на длину путей и вариацию их конфигурации. При этом на основе цифровой модели рельефа и карты гидросети моделировались пути между выбранными парами археологических памятников при различных значениях коэффициента сложности при переходе через реку: $K_r \in \{10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90\}$.

Обозначим $\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ длины путей при различных значениях коэффициентах K_r , где n — количество построенных путей. Для каждого пути с длиной l_i вычисляются площади областей, ограниченных попарно текущим путем и всеми остальными $\{S_{i1}, \dots, S_{ii-1}, S_{ii+1}, \dots, S_{in}\}$ (см. рис. 1). После этого для каждого i -го пути вычисляется среднее значение отклонения S_{ij} , нормированное по длине текущего пути (l_i):

$$\delta_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{S_{ij}}{l_i}.$$

Данная оценка учитывает изменение длины и конфигурации всех построенных путей относительно текущего i -го пути. В качестве рабочего коэффициента K_r выбирается тот, который соответствует минимальному значению отклонения $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$, вычисленных для всех построенных путей (δ_{\min}).

Для чепецкой археологической культуры были смоделированы пути между двумя родоплеменными центрами Иднакар и Учкакар при различных значениях коэффициента влияния гидросети K_r (см. рис. 2). Данные поселения расположены на одном берегу Чепца и разделены несколькими ее притоками, на территории между памятниками встречаются равнинные участки и возвышенности. Значительные отличия как по длине, так и по конфигурации наблюдаются только при значениях коэффициента K_r , равных 1 («зимний» путь) и 100 (сухопутный путь без переправ). Гораздо менее очевидные, но существенные отклонения δ_i наблюдаются при значениях коэффициента 10, 80, 90 (табл. 3). Построенные пути при значениях коэффициента из диапазона от 20 до 70 отличаются незначительно (как по длине, так и по конфигурации), минимальное отклонение δ_{\min} соответствует значению коэффициента K_r , равному 50.

Таблица 3

Оценка влияния коэффициента гидрости K_r на длину и конфигурацию путей (маршрут Иднакар — Учкакар)

K_r	Длина пути (км)	Среднее отклонение δ_i (км)	Относительное отклонение d
10	70.319	3.274	38.67
20	70.942	2.364	0.13
30	70.942	2.359	0.08
40	70.942	2.398	1.57
50	70.942	2.361	0.00
60	70.942	2.375	0.59
70	70.942	2.385	1.02
80	71.144	7.825	231.43
90	71.144	7.845	232.27

Для каждого пути, построенного при различных значениях K_r , вычисляется относительное среднее отклонение δ от минимального значения отклонения δ_{\min} (в данном случае $\delta_{\min} = 2,361$ при $K_r = 50$):

$$\delta_i^l = \frac{|\delta_{\min} - \delta_i|}{\delta_{\min}} \cdot 100\%.$$

Проведенная оценка (табл. 3) показала, что в диапазоне значений коэффициента влияния гидросети от 20 до 70 относительное отклонение конфигурации и длины путей от δ_{\min} не превосходит 2%, что указывает на устойчивость поведения модели в этом диапазоне.

Аналогичные результаты получены при моделировании путей между Сепычским и Зуйкарским городищами. Зуйкарское городище расположено на возвышенности водораздела, Сепычское городище — на равнинном участке. На территории между памятниками встречаются равнинные участки и возвышенности. В данном случае принципиально различаются условия компьютерного эксперимента — поселения находятся на разных берегах Чепцы. Несмотря на существенное различие физико-географических условий участка моделирования пути (в сравнении с маршрутом Иднакар — Учкакар), длина и конфигурация построенных путей полностью совпадают в диапазоне значений K_r от 30 до 90. Следовательно, результаты компьютерного эксперимента позволяют утверждать, что при моделировании путей с переправами между памятниками чепецкой археологической культуры значение K_r может быть принято равным 50. Использование данного значения обеспечит воспроизводимость результатов моделирования.

В целом, различные варианты путей, учитывающие различные способы преодоления водных преград, различаются длиной и конфигурацией, что доказывает существенное влияние коэффициента K_r на моделирование путей коммуникаций между поселениями (см. рис. 3).

Безусловно, на выбор маршрута значительное влияние оказывали болота и лесные массивы, расположенные между поселениями. Однако в модель территории не включены современные участки болот и лесов, так как их расположение может значительно отличаться от ситуации в древности: на территории региона исследований проводились и проводятся мелиоративные работы. Добыча торфа на удобрения началась с 1930-х гг. и продолжалась до начала 2000-х гг.¹⁸ В частности, такие работы проводятся на территории вдоль Чепцы между городищами Учкакар и Иднакар и к северо-востоку от городища Иднакар (Ярский и Глазовский районы Удмуртской республики). Однако, рельеф территории и русла рек достаточно стабильны

и, вероятно, не претерпели значительных изменений. Именно поэтому при комплексной оценке сложности прохождения пути учитываются рельеф и гидросеть, которые являются основными географическими факторами для моделирования исторической дорожной сети.

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 Кипр¹⁹, а также сухопутных коммуникаций Скифии²⁰. В качестве эталона использовались дороги, нанесенные на карту Вятской губернии, созданную в 1888–1898 гг. по данным Вятского статистического бюро в масштабе в одном английском дюйме — 3 версты (что соответствует М 1:126000). 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 паромного движения на территории Удмуртии — 1840-е гг.; прокладка железных дорог — 1870–1890-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 (см. рис. 4). 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 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 аффин-

ных преобразований в геоинформационной системе MapInfo. При этом историческая карта была разбита на локальные области, размеры которых допускают компенсацию искажений. 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 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. 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 Бьльского до Большой Чепцы (см. рис. 4). 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: Бьльское — Чемашур (Участок 1), Чемашур — Бадзимашур (Участок 2), Бадзимашур — Усть-Медла (Участок 3), Усть-Медла — Большая Чепца (Участок 4) (на рис. 4 границы участков показаны рамкой красного цвета). Рассматриваемая территория покрывает примерно 20% территории северной части Удмуртской Республики, что обеспечивает широкую вариативность 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, после трансформации фрагмента исторической карты вычислялись оценки средней ошибки привязки и среднеквадратическое отклонение контрольных точек (табл. 4), которые определяли точность построения «модельных» путей.

Таблица 4

Результаты трансформации локальных областей исторической карты

Показатель	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

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 на современной модели местности «зон притяжения» (переправы) и «зон отталкивания» (леса, болота). Ведение дополнительных параметров позволило оценить их информативность при имитационном моделировании исторической дорожной сети.

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

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. 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 (см. рис. 5а). Введение в модель дополнительного параметра оказы-

вает влияние на конфигурацию «модельных» дорог. В частности, путь между населенными пунктами Бильский и Бишкучевская, построенный без учета потенциального участка переправ, существенно отличался от «эталонного», а введение дополнительного параметра обеспечило практически полное совпадение «модельного» пути и дороги, отмеченной на исторической карте (сравните рис. 5б и 5в). 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 (см. рис. 5).

Для анализа корректности построения «модельных» путей вводятся две оценки: первая основана на сравнении длин, а вторая — на сравнении конфигурации дорог. 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 (см. табл. 5, 6) в качестве порогового значения для данной оценки принята величина, аналогичная коэффициенту вариации: отношение среднеквадратического отклонения контрольных точек локальной области исторической карты, в которой расположены поселения, к соответствующей средней ошибки привязки (табл. 4). Вторая оценка (сравнение конфигурации) вычисляется как отношение площади территории, заключенной между «модельной» и «эталонной» дорогами, к длине «эталонного» пути. В качестве порогового значения использовалось среднеквадратическое 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 Бильское — 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 (см. табл. 5). 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 (табл. 6). Аналогичная ситуация наблюдается при моделировании дорог на всех 4 участках трансформированной исторической карты.

Таблица 5

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

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

Таблица 6

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

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

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.

ВАРИАНТЫ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТРУДОЕМКОСТИ ПУТИ

В отечественной практике исторических реконструкций известны модели систем дорог, выполненные средствами геоинформационной системы ArcMap (модуль Spatial Analyst). 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 направления²¹. Данные

средства также применялись при воссоздании системы связей между памятниками древнерусской Овручской Волости в X–XIII вв.²² и древнерусских памятников в микрорегионе Хотинской возвышенности²³. Аналогичный принцип использовался при оценке территории ранних государств майя — выявлялась наиболее доступная для коммуникации территория вокруг каждого из политических центров (с учетом их политического веса), а также зоны пересечения смежных территорий²⁴.

Реконструкция путей коммуникации в ArcMap основана на априорном построении поверхности стоимости и последующем выявлении областей минимальной стоимости, в пределах которых определяется расположение вероятных путей коммуникаций. При этом поверхность стоимости является статичной и вычисляется следующим образом: каждой точке поверхности априорно придаются веса в зависимости от степени важности интересующих исследователя факторов в рамках решаемой задачи (угол уклона рельефа, гидросеть и пр.). В предлагаемом подходе к моделированию оптимального пути предлагается построение динамической поверхности стоимости. Динамическая поверхность вычисляется в процессе построения пути и может меняться в зависимости от изменения конфигурации той части пути, которая уже построена к данному моменту времени. Отличие предложенного подхода состоит в том, что оценивается не стоимость каждой точки поверхности, а трудоемкость перехода из текущей точки в любую смежную, что оказывает влияние на конфигурацию построенного пути. Следовательно, предложенный метод моделирует динамику перемещения по выбранной траектории движения.

Для сравнения рассмотренных подходов проводилось моделирование путей между объектами на физико-географической основе севера Удмуртии. Участок, разделяющий начальную и конечную точки маршрута, характеризуется разнообразным рельефом и развитой речной сетью — р. Чепца и ее притоки (см. рис. 6а). При достаточно большом расстоянии результаты моделирования в ГИС ArcMap (линия желтого цвета) и в программе, разработанной в Физико-техническом институте УрО РАН²⁵ (линия белого цвета) близки друг к другу: «модельные» дороги в целом проходят по равнинному участку, обходят группу локальных возвышенностей, количество переправ минимизировано. Конфигурация обоих путей практически совпадает. При выборе локального участка, включающего череду возвышенностей, равнинный участок и несколько притоков реки, которые можно обойти (на рис. 6а обозначен прямоугольной рамкой черного цвета) наблюдается иная ситуация. При малой трудоемкости преодоления речных преград ($K_r = 20$ и $K_r = 50$,

рис. 6б, в) конфигурация путей практически совпадает: дороги в целом идут по равнине и предполагают равное количество переправ (в двух случаях участки переправ совпадают). Однако при существенной трудоемкости переправы ($K_r = 80$, рис. 6г) наблюдается принципиально отличная ситуация. Использование статичной поверхности стоимости (ArcMap) предполагает построение достаточно прямой дороги по пересеченному участку местности, а моделирование динамики перемещения определяет выбор максимально ровного участка территории за счет увеличения длины пути. При этом в обоих случаях предполагается наличие двух переправ. В целом, оба подхода хорошо согласуются между собой. В последнем случае выбор более вероятного маршрута может быть обоснован на основе анализа исторического контекста и возможностей используемых транспортных средств.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПУТЕЙ КОММУНИКАЦИЙ МЕЖДУ ГОРОДИЩАМИ ЧЕПЕЦКОЙ АРХЕОЛОГИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ

Разработанный метод использовался для моделирования путей коммуникаций между ключевыми памятниками чепецкой культуры: городищами Иднакар IX–XIII вв., Гурьякар IX–XIII вв. и Учкакар IX–XIV вв. (см. рис. 7).

Первый этап исследований предполагал реконструкцию сухопутного пути с возможностью переправ между Гурьякаром и Иднакаром, затем между Иднакаром и Учкакаром (белая линия на рис. 7). Независимо от этих путей рассчитывался путь между Гурьякаром и Учкакаром без учета Иднакара (красная линия на рис. 7). Путь Гурьякар — Учкакар практически совпадает с путями Иднакар — Учкакар и Гурьякар — Иднакар, за исключением небольшого участка в районе Иднакара. Вероятно, это связано с влиянием на стоимость пути водных преград и существенных перепадов высот в районе этого городища: Иднакар расположен на высоком мысе коренной береговой террасы (высота до 50 м), который ограничен долинами Чепца и ее правого притока — р. Пызеп.

Следует отметить, что пути проходят в непосредственной близости от еще одного укрепленного поселения той же археологической культуры — Эбгакар IX–XIII вв. (отклонение модельного пути от центра поселения около 1 км). Это городище расположено примерно на середине пути между Иднакаром и Учкакаром, длина реконструированного пути между которыми около 60 км. В связи с этим необходимо отметить, что по известным оценкам длина суточного перехода составляла 30–40 км. Эта

величина достаточно стабильна в значительном хронологическом диапазоне. Например, в средневековой Руси территории московских городских станов (земель, непосредственно использовавшихся в великокняжеском хозяйстве) располагались именно на расстоянии одного дневного перехода от Москвы и вписывались в круг радиусом 40 км от Кремля²⁶. Следовательно, наличие городища Эбгакар на расстоянии около 30 км от двух ключевых памятников чепецкой археологической культуры, позволяет предположить, что Эбгакар являлся вероятным местом остановки на пути Иднакар — Учкакар. Принципиально важно, что данное поселение, а также ряд других, оказавшихся на вероятном пути следования (Жабинское селище, Качкашурское селище, Солдырское селище), не учитывались при моделировании путей. Следовательно, разбиение путей коммуникаций, полученных при моделировании, на участки, соответствующие величине суточного перехода, предоставит возможность прогнозировать области расположения еще не выявленных археологических памятников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод предполагает оптимизацию пути с точки зрения сложности его прохождения (рельеф и преодоление водных преград). Разработанный подход, основанный на оценке комплексного критерия, позволяет прогнозировать конфигурацию маршрута, которая обеспечивает компромисс между длиной и трудоемкостью. Дальнейшее развитие метода возможно при привлечении дополнительных данных, например, участки переправ, границы болот, лесных массивов и особенностей используемого транспорта. Достоверность результатов показана при моделировании трассы Сибирского тракта и реконструкции путей коммуникаций между городищами чепецкой археологической культуры.

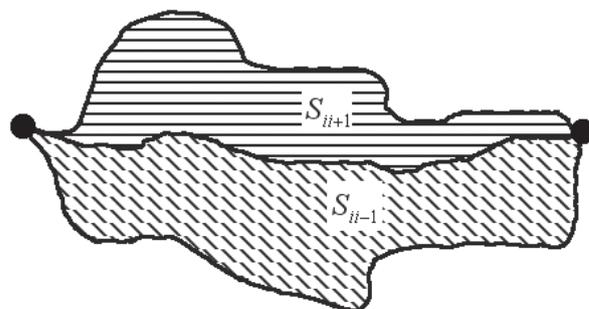


Рис. 1. Оценка изменения длины и конфигурации путей

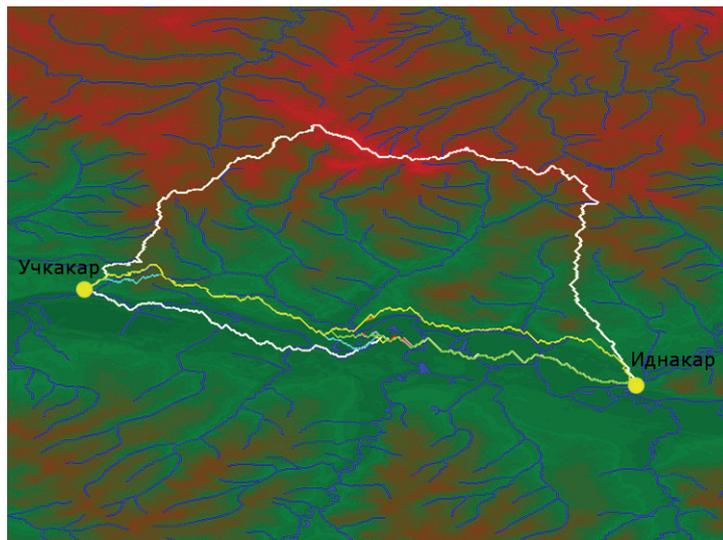


Рис. 2. Варианты «модельных» путей между поселениями при изменении значения коэффициента влияния гидросети

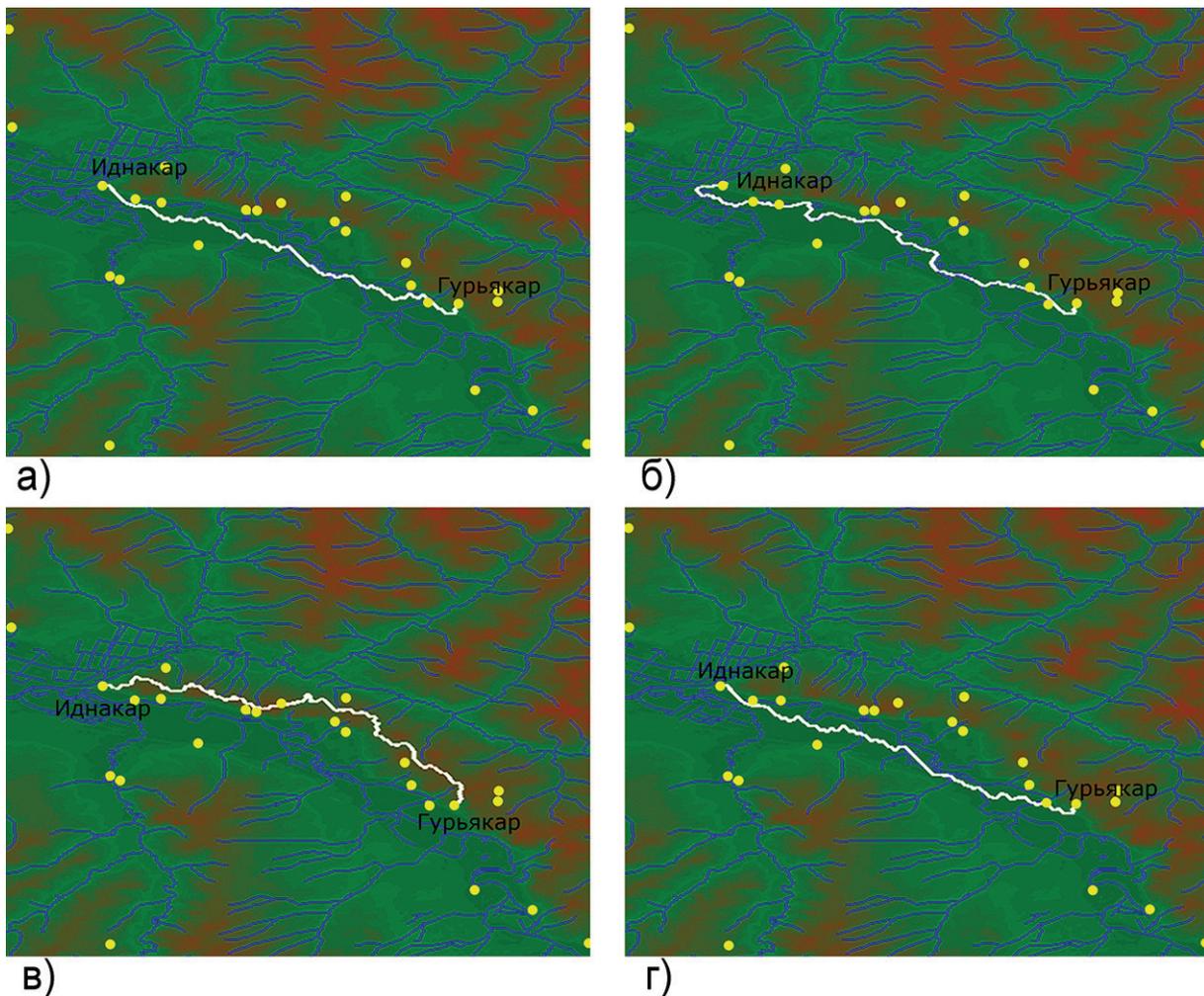


Рис. 3. Вероятные пути между городищами чепецкой археологической культуры Иднакар и Гурьякар:
 а) зимний путь (длина пути ок. 42 км); б) водный (ок. 45 км);
 в) сухопутный без переправ (ок. 42 км); г) сухопутный с переправами (ок. 38 км)

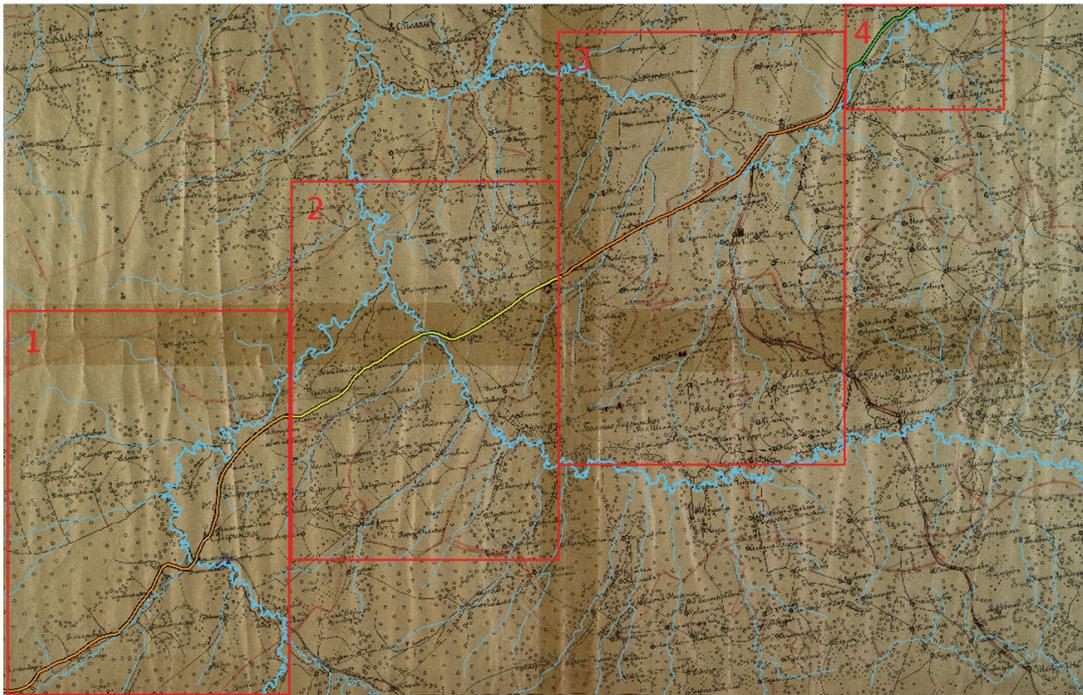


Рис. 4. Фрагмент карты Вятской губернии 1888–1898 гг.

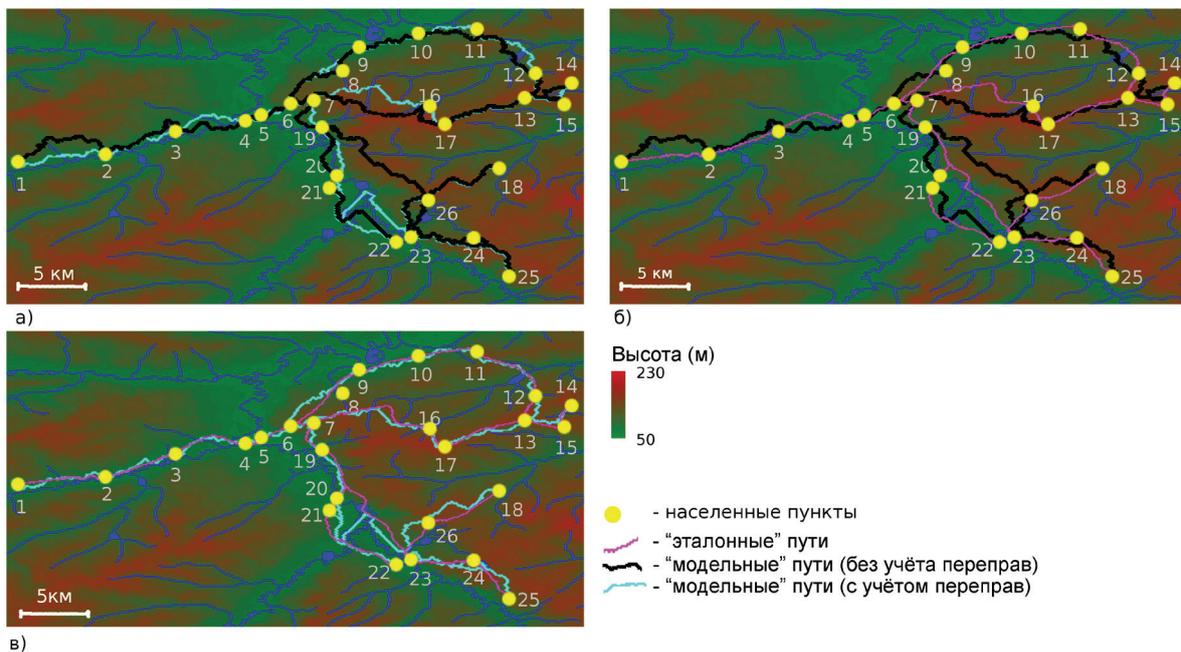


Рис. 5. Моделирование дорожной сети между поселениями (участок Бельское — Чимошур): а) конфигурация «модельных» путей при различных параметрах модели; б) сравнение конфигурации «эталонных» и «модельных» путей (рельеф и гидросеть); в) сравнение конфигурации «эталонных» и «модельных» путей (рельеф, гидросеть, участки потенциальных переправ).

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

1 — Бельский, 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

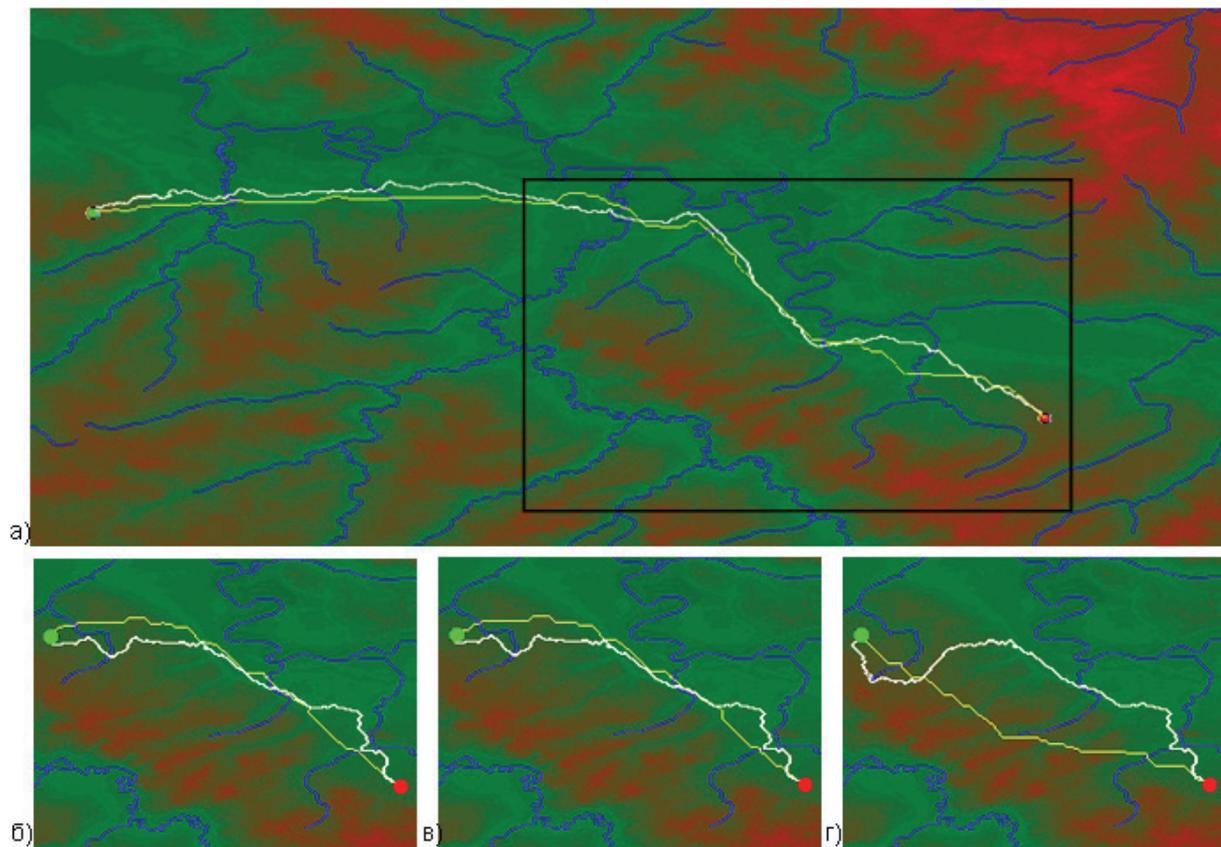


Рис. 6. Моделирование дорог на основе статической и динамической оценки трудоекости:
 а) региональная дорога; б) локальный участок при $K_g = 20$;
 в) локальный участок при $K_g = 50$; г) локальный участок при $K_g = 80$

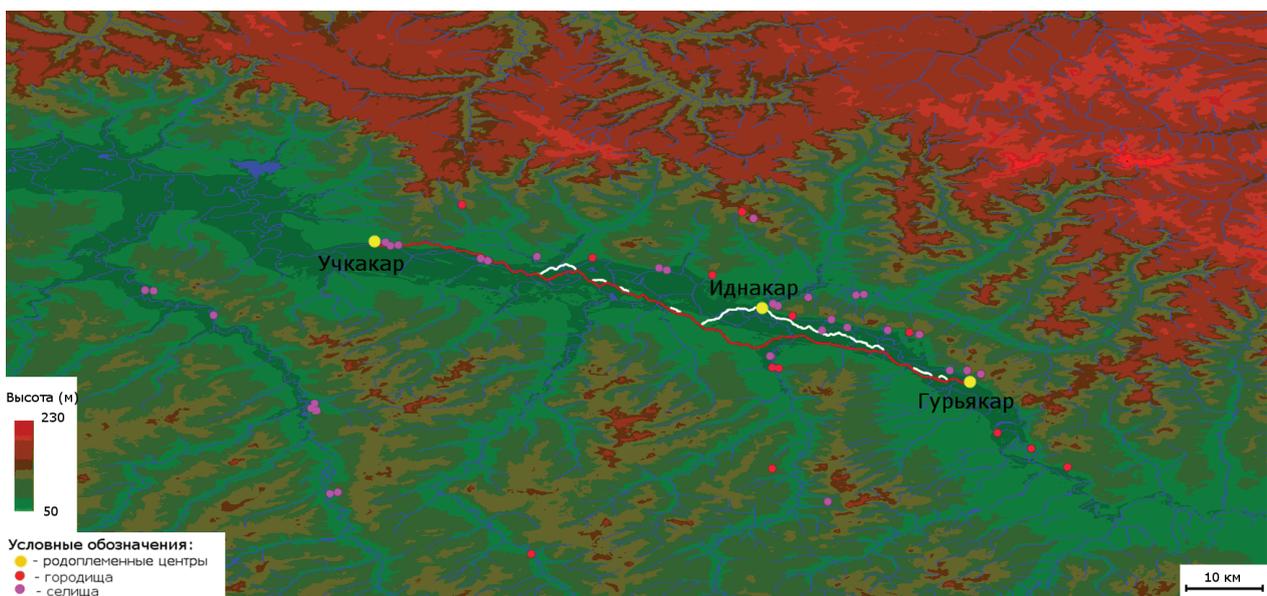


Рис. 7. Пример моделирования путей между городищами чепецкой культуры

ПРИМЕЧАНИЯ

- ¹ Казакова Л. М., Безуглова О. С., Морозов И. В., Гарбузов Г. П., Арсеньева Т. М. Опыт применения комплексной методики исследования для изучения округа античных памятников (на примере Та-наиса) // Археология и геоинформатика. [Электронный ресурс]. М., 2010. Вып. 6. CD-ROM; Паромов Я. М.. Главные дороги Таманского полуострова // Древности Боспора. № 1. М., 1998. С. 216–225.
- ² Смекалов С. Л. Использование ГИС для локализации системы древних дорог Восточного Крыма // Археология и геоинформатика. Вып. 3. [Электронный ресурс]. М., 2006. CD-ROM.
- ³ Сагдуллаев А. С. Древние пути на юге Узбекистана // Общественные науки в Узбекистане. 1981. № 7. С. 33–38.
- ⁴ Доорн П. Географическое положение, модели взаимодействия и реконструкция исторических поселений и коммуникаций (на примере Этолии, исторической области центральной Греции) // История и компьютер: Новые информационные технологии в исторических исследованиях и образовании. Геттинген, 1993. С. 105–140.
- ⁵ Bell T., Lock G. Topographic and cultural influences on walking the Ridgeway in later prehistoric times / Beyond the Map / Archaeology and spatial technologies. Amsterdam, 2000. Pp.85–100; Savage S. H. Modeling the Late Archaic Social Landscape / Interpreting Space: GIS and Archaeology. London, 1990. Pp. 330–355.
- ⁶ Ejstrud B. Cost surface analysis and ancient roads: a comparison / Temps et espaces de l'homme en societe, analyses et modeles spatiaux en archeologie. Actes des XXVe rencontres internationales d'archeologie et d'histoire d'Antibes–2004. Editions APDCA, Antibes, 2005. Pp. 135–139.
- ⁷ Leusen P. M. Pattern to Process: Methodological Investigations into the Formation and Interpretation of Spatial Patterns in Archaeological Landscapes. 2002. Dissertations, University of Groningen [Electronic resource]. URL: <http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/arts/2002/p.m.van.leusen>; 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. Pp. 577–581.
- ⁸ Иванова М. Г. Хозяйство северных удмуртов в конце IX — начале XIII вв. н. э. // Северные удмурты в начале II тысячелетия н. э. Ижевск, 1979. С. 6–68; Иванов А. Г., Иванова М. Г., Останина Т. И., Шутова Н. И. Археологическая карта северных районов Удмуртии. Ижевск, 2004.
- ⁹ The CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) [Electronic resource]. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>.
- ¹⁰ Беглецов С. В., Князева Л. Ф., Телегина М. В. Создание геоинформационной системы памятников археологии Удмуртской Республики // Краткие сообщения Института археологии. М., 2006. Вып. 220. С. 184–193.
- ¹¹ Нильсон Н. Искусственный интеллект: методы поиска решений. М., 1973. С. 70–80.
- ¹² Леонтьев О. К., Рычагов Г. И. Общая геоморфология. М., 1979. С. 18.
- ¹³ Bell T., Lock G. Op. cit.
- ¹⁴ Пермьяков Ф. И. Почвы Удмуртии. Повышение их плодородия. Ижевск. 1972. 223 с.
- ¹⁵ Llobera M. Understanding movement: a pilot model towards the sociology of movement / Beyond the Map: Archaeology and spatial technologies. Amsterdam, 2000. Pp. 65–84; Marble D. F. The human effort involved in movement over natural terrain: A working bibliography. Report (Department of Geography, Ohio State University), 1996.
- ¹⁶ Удмуртская республика: Энциклопедия. Ижевск, 2008. С. 24.
- ¹⁷ Болтрик Ю. В. Сухопутные коммуникации Скифии (по материалам новостроечных исследований от Приазовья до Днепра) // Советская археология. 1990. № 4. С. 30–44.
- ¹⁸ Удмуртская республика... С. 26.
- ¹⁹ Ejstrud B. Op. cit.
- ²⁰ Болтрик Ю. В. Указ соч.
- ²¹ Коробов Д. С. Применение методов пространственного анализа при изучении системы расселения алан Кисловодской котловины // Археология и геоинформатика [Электронный ресурс]. М., 2008. Вып. 5. CD-ROM.
- ²² Томашевский А. П., Вовкодав С. М. Археолого-геоинформационная система «Овручский проект» // Археология и геоинформатика [Электронный ресурс]. М., 2007. Вып. 4. CD-ROM.; Вовкодав С. М. Методы ГИС-моделирования коммуникационных сетей древних систем заселения // Ар-

-
- хеологические памятники Восточной Европы: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 13. Воронеж, 2009. С. 238–241.
- ²³ Манигда О. В. Реконструкция ближайших коммуникаций древнерусских памятников в микрорегионе Хотинской возвышенности с помощью модуля Spatial Analyst. Методический аспект // Археология и геоинформатика. Вып. 7. [Электронный ресурс]. М., 2012. CD-ROM.
- ²⁴ Сафронов А. В. Методы пространственного анализа ГИС в исследовании структуры раннего государства древних майя // Археология и геоинформатика. Вып. 7. [Электронный ресурс]. М., 2012. CD-ROM.
- ²⁵ Зубарева О. Т., Груздев Д. В. Моделирование конфигурации историко-географических объектов на основе цифровой модели рельефа. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012611247. / Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 31.01.2012.
- ²⁶ Культура средневековой Москвы. Исторические ландшафты: в 3 т. Т. 2. Домен московских князей в городских станах. 1271–1505 годы. М., 2005. С. 17–46.
-