

Д. В. Марченко

Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия
E-mail: dasha-smychagina@yandex.ru

ГИС-моделирование оптимальных маршрутов при изучении систем расселения в палеолите: методические аспекты

В статье рассматриваются возможности применения ГИС-технологий, в частности моделирования оптимальных путей и «стоимостных поверхностей», для изучения памятников эпохи палеолита. Подход базируется на понятии «аффорданс» – потенциала среды, доступного древнему человеку с учетом его физических возможностей и потребностей. Основное внимание уделяется методике построения «оптимальных путей» («Optimal Path» или «Least Cost Path»), которая позволяет моделировать миграционные пути, определять доступность ресурсов (например, каменного сырья) и реконструировать системы расселения. Описан характер входных данных и применяемые методики расчета энергозатрат. Ключевым фактором, определяющим энергозатраты, выступает уклон поверхности; установлено, что крутизна склона 30–35° является пороговым значением, выше которого передвижение становится непропорционально затратным. В качестве основных ограничений метода выделяются качество и релевантность входных данных, возможная субъективность исследователя в выборе значимых факторов, а также сложность учета климатических и ландшафтных изменений на больших временных промежутках. В качестве стратегии преодоления этих ограничений предлагается вариативное моделирование – построение нескольких сценариев для разных реконструируемых природных условий. Делается вывод о том, что моделирование «стоимостных поверхностей» является перспективным инструментом для анализа систем жизнеобеспечения высокоподвижных коллективов эпохи палеолита.

Ключевые слова: палеолит, ГИС-анализ, мобильность, стоимостная поверхность, оптимальный путь, системы расселения.

D. V. Marchenko

Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia
E-mail: dasha-smychagina@yandex.ru

GIS Optimal Path Modeling for Analyzing Paleolithic Settlement Systems: Methodological Issues

This article discusses applications of the GIS technology for studying Paleolithic sites, particularly the optimal path modeling and cost surface analysis. The approach is based on the concept of affordance – environmental capacity available to prehistoric humans with their physical capabilities and needs. The main focus is on the methodology of least-cost path analysis, which allows for modeling migration routes, determining resource (e.g., lithic raw materials) availability, and reconstructing settlement systems. The nature of the input data and applied methods for calculating energy costs are described. A key factor in determining energy expenditure is slope gradient. It has been established that slope steepness of 30–35° constitutes the threshold value beyond which movement becomes disproportionately costly. The main limitations of the method include the quality and relevance of the input data, possible researcher's subjectivity in selecting significant factors, as well as difficulty of accounting for climate and landscape changes over long periods of time. Variational modeling – constructing multiple scenarios for different reconstructed environmental conditions – is proposed as a strategy for overcoming these limitations. It is concluded that cost surface modeling is a promising tool for analyzing subsistence systems of highly mobile Paleolithic groups.

Keywords: Paleolithic, GIS analysis, mobility, cost surface, least-cost paths, settlement systems.

Введение

Исследования палеоэкологии палеолита – развитое направление в палеолитоведении, обогащающее наши представления о древних обществах данными естественнонаучных дисциплин [Природная среда..., 2003]. Моделирование взаимодействия человека с окружающей средой видится дальнейшим развитием данного подхода. Исследование доступности ресурсов, возможностей и путей передвижения к ним становится возможным с помощью инструментов ГИС (геоинформационных систем). Подход к характеристике ландшафта относительно современного ему человека выражается через понятие аффорданс (англ. «affordance») – потенциал, предоставляемый окружающей средой в связи со свойствами и способностями индивида действовать в этой среде [Gibson, 1986]. В качестве свойств выступают не только такие характеристики как склон, обводненность, растительность и др., а также человеко-относительные свойства, например, видимость из определенной точки. Способность же к передвижению, как правило, измеряется в энергозатратах [Коробов, 2011; Verhagen, 2019]. С этих позиций формируются представления о «стоимостной поверхности» – модели, показывающей затраты на передвижения из определенной точки исходя из заданного набора характеристик среды, и об «оптимальных путях» – маршрутах, требующих минимальных энергозатрат для достижения потенциальной цели и соответственно предпочтительных.

При описании методики мы будем приводить названия инструментов геообработки в русскоязычной версии программного продукта ArcGIS Pro 3.1.5, а также их оригинальные англоязычные названия. Моделирование «оптимальных путей» (англ. «Optimal Path» или «Least Cost Path») – многоступенчатый процесс поиска оптимального маршрута от источника до места назначения исходя из заданных параметров среды. На первом этапе входные данные (факторы), характеризующие окружающую среду, преобразуются в растровые изображения. Затем взвешивается уровень влияния каждого из этих факторов с точки зрения древнего человека (именно на этом этапе возможен субъективизм исследователя в оценке роли тех или иных факторов среды для древних коллективов). Из суммы этих факторов в определенных пропорциях создается «растр стоимостной поверхности» (англ. «Cost Surface Raster»), представляющий из себя набор пикселей, каждый из которых соответствует определенному значению стоимости перемещения по нему. В программном обеспечении используется термин «стоимость», т.к. с его помощью возможно моделирование реальных денежных затрат (например, на строительство дороги), однако применительно к археологическим исследованиям речь обычно идет об энергозатратах. Далее задается исходная и целевая точки, и алгоритм последовательно анализирует

соседние пиксели, вычисляя минимальную накопленную стоимость перемещения от исходной точки до целевой. В результате применения инструмента «стоимостное расстояние» («Cost Distance») для каждого пикселя рассчитывается минимальная цена его достижения от исходной точки. Стоимость отдельно подсчитывается для движения до целевой точки и для движения обратно, так как направление движения может сильно менять энергозатраты, особенно при наличии уклона поверхности [Gowen, de Smet, 2020].

Моделирование оптимальных путей обычно используется для решения следующих задач в археологии: 1) реконструкция миграционных путей в глобальном [Field, Lahr, 2006; Li et al., 2019] или локальном масштабе; 2) реконструкция путей достижения определенных ресурсов, критических для жизнеобеспечения (если местоположение этих ресурсов известно), моделирование ресурсных зон, определяющих распределение поселений на местности [Коробов, 2011]; 3) реконструкция способов освоения территории, систем расселения [Зольников и др., 2013; Verhagen, 2019].

Представленные задачи зачастую связаны между собой или даже взаимозависимы. Например, для изучения палеолитических стоянок важную роль играет определение источников каменного сырья, близость которого указывает на роль стоянки в общей системе мобильности древнего коллектива. Определение радиусов фуражирования [Binford, 1980] в конкретной местности наиболее эффективно производится с помощью ГИС-анализа [Morgan, 2008]. К сожалению, в отечественных исследованиях этот метод остается мало распространенным, особенно среди исследований палеолитической эпохи (одно из редких исключений – ГИС-моделирование условий, благоприятных для поселения человека в горах Алтая [Зольников и др., 2013]).

Входные данные для моделирования

Входными для построения модели служат пространственные данные характеризующие ландшафт (склоны, сведения о растительности, водных преградах) и точки (или полигоны) предполагаемых пунктов назначения маршрутов (охотничьи угодья, источники сырья, другие стоянки). В настоящее время в открытом доступе находятся цифровые модели рельефа (ЦМР) с различным разрешением (например, HYDRO1K [Land Processes..., 2018]). Существуют и палеоландшафтные данные, однако их разрешение, как правило, низкое, за исключением отдельных небольших территорий.

Объекты или участки местности – такие как реки или озера, территории, покрытые определенным типом растительности, ареалы распространения видов животных, места древних поселений – вводятся в виде векторных данных (наборы точек, линий, полигонов).

Методики расчета энергозатрат

Базовый фактор, определяющий энергозатраты на передвижение – уклон поверхности [Field, Lahr, 2006]. На основе посылки, что более крутые склоны сложнее для передвижения, были разработаны методы расчета энергозатрат на пересечение различных по крутизне склонов. Наиболее простой является следующая формула: $\tan \text{slope} \times \tan (1^\circ)$. Построенный по этой формуле график расчета энергозатрат на передвижения показывает, что зависимость энергозатрат от угла наклона перестает быть линейной на уровне 30–35° склона (см. рисунок, 1). С дальнейшим увеличением крутизны начинается экспоненциальный рост энергозатрат, т.о. мы можем рассматривать 30–35° в качестве граничного значения склона, выше которого передвижение слишком энергозатратно. Более сложные формулы учитывают комплекс факторов, таких как масса тела человека и переносимого им груза, коэффициент фактора местности и скорость пере-

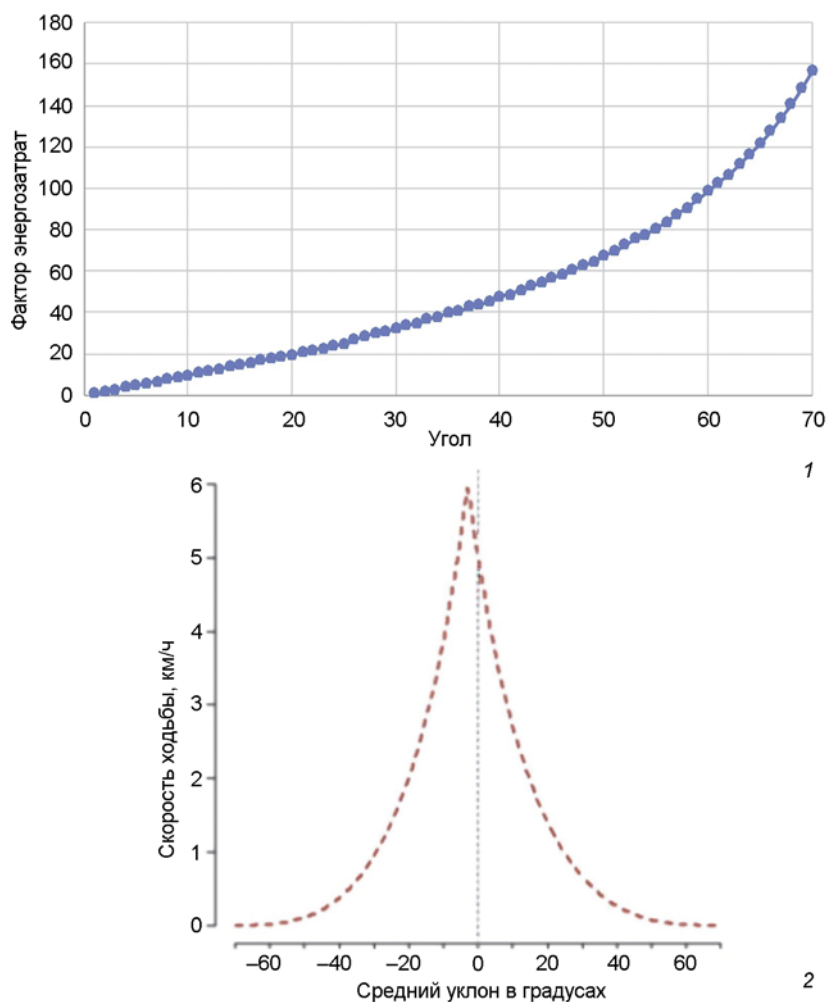
движения, позволяя прогнозировать метаболические затраты на передвижение [Pandolf, Givoni, Goldman, 1977]. Примечательно, что формулы подсчета скорости передвижения в зависимости от склона (так называемая пешая функция Тоблера [Tobler, 1993]) показывают примерно ту же границу: при углах выше 35° изменения скорости перестают быть существенными (см. рисунок, 2).

Ограничения метода

Основные ограничения связаны с качеством и релевантностью входных данных. Качество этих исходных данных определяет разрешение полученной «стоимостной поверхности», которое может оказаться недостаточным для решения поставленных задач. Так, рассматривая реку в качестве преграды для передвижения по местности, необходимо убедиться, что размер пикселя модели адекватен ширине речной долины. В противном случае (при слишком большом

пикселе) маршрут будет рассчитан как пересекающий реку на всей ширине ее долины, не отражая реальных возможностей передвижения по ней.

Еще более проблематичной может оказаться релевантность данных для построения модели. Чем более древний период реконструируется, тем больше возрастает количество неизвестных переменных. Климатические флуктуации, медленные, но выраженные на большом временном промежутке изменения рельефа и другие факторы оказываются сложными для учета. В этих условиях для построения адекватной модели необходимо соблюсти баланс между слишком низким разрешением модели, теряющим важные особенности рельефа и слишком высоким, дающим детали рельефа, которые могли не существовать в древности [Verhagen, 2019]. Адекватный выбор факторов, определяющих привлекательность тех или иных точек для древнего населения, возможен лишь в условиях достаточной изученности его типа хозяйствования, базовых атрибутов индустрии и характеристик климата. Зачастую, принимая во внимание высокий уровень неопределенности, исследователи предлагают набор моделей, учитывающий возможные вариации (например, «мокрая» и «сухая» модель



Энергозатраты и скорость передвижения

1 – ранжирование углов склона согласно трудозатратам на их преодоление; 2 – график зависимости скорости ходьбы от угла склона поверхности («пешая функция Тоблера», по: [Tobler, 1993]).

распространения человеческих популяций в позднем плейстоцене Центральной и Восточной Азии [Li et al., 2019]).

Ориентация на целеполагание древних людей является одновременно сильной и слабой стороной данного подхода. С одной стороны, он позволяет строить объяснительные модели на основе факторов, имевших значение для древнего человека, включая большое число переменных. С другой, именно выбор таких значимых факторов может оказаться дискуссионным.

Выводы

Моделирование «стоимостной поверхности» и «оптимальных путей» позволяет рассмотреть местоположение поселений и стоянок как производное совокупности природных, культурных и хозяйственных факторов, что делает такие модели не только описательными, но и предиктивными [Коробов, 2011]. Построение «стоимостных поверхностей» и потенциальных маршрутов между локациями и ресурсами видится перспективным направлением для исследования системы жизнеобеспечения высокоомобильных коллективов палеолита.

В результате историографического обзора, а также исходя из опыта расчета оптимальных путей сообщения в среднем течении р. Селенги на ранних этапах верхнего палеолита (см. статью Д. В. Марченко, А. М. Хаценович, Е. П. Рыбин «Опорные пункты освоения пространства человеком в среднем течении реки Селенги на ранних стадиях верхнего палеолита» в этом журнале) показано, что склон крутизной 30–35° является пограничным значением выше которого непропорционально возрастают энергозатраты, и возрастающий угол наклона практически перестает влиять на скорости передвижения.

Вместе с тем выделяются ограничения методики, связанные в первую очередь с выбором и качеством входных данных для моделирования. Одним из путей преодоления этого ограничения является вариативность – построение моделей для нескольких различных сценариев, что позволяет предусмотреть больший диапазон возможностей и ограничений, существовавших для человека в изучаемом регионе в древности.

Финансирование

Исследования проведены в рамках НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2025-0007 «Применение цифровых технологий при анализе археологических источников и реконструкции истории древних сообществ».

Список литературы

Зольников И. Д., Постнов А. В., Лямина В. А., Славинский В. С., Чупина Д. А. ГИС-моделирование условий

обитания, благоприятных для проживания древнего человека в горах Алтая // Археология, этнография и антропология Евразии. – 2013. – № 3. – С. 40–47.

Коробов Д. С. Основы геоинформатики в археологии. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2011. – 244 с.

Природная среда и человек в палеолите Горного Алтая / А. П. Деревянко, М. В. Шуньков, А. К. Агаджанян, Г. Ф. Барышников, Е. М. Малаева, В. А. Ульянов, Н. А. Кулик, А. В. Постнов, А. А. Аноikin. – Новосибирск: Изд-во ИАЭТ СО РАН, 2003. – 448 с.

Binford L. R. Willow Smoke and Dog's Tails: Hunters-Gatherer Settlement Systems and Archaeological Site Formation // *Am. Antiquity*. – 1980. – Vol. 45. – P. 4–20.

Field J. S., Lahr M. M. Assessment of the southern dispersal: GIS-based analyses of potential routes at oxygen isotopic stage // *J. of World Prehistory*. – 2006. – Vol. 19 (1). – P. 1–45. – doi:10.1007/s10963-005-9000-6

Gibson J. J. The ecological approach to visual perception. – N. Y.; London: Psychology Press, 1986. – 305 p.

Gowen K. M., de Smet T. S. Testing least cost path (LCP) models for travel time and kilocalorie expenditure: Implications for landscape genomics // *PLOS ONE*. – 2020. – Vol. 15, N 9. – Art. No. e0239387.

Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). HYDRO1K Elevation Derivative Database. – 2018. – doi:10.5066/F77P8WN0 (дата обращения: 28.05.2026).

Li F., Vanwezer N., Boivin N., Gao X., Ott F., Petraglia M., Roberts P. Heading north: Late Pleistocene environments and human dispersals in central and eastern Asia // *PLoS ONE*. – 2019. – Vol. 14 (5). – Art. N e0216433.

Morgan C. Reconstructing prehistoric hunter-gatherer foraging radii: a case study from California's southern Sierra Nevada // *J. of Archaeol. Sci.* – 2008. – Vol. 35, Iss. 2. – P. 247–258. – doi:10.1016/j.jas.2007.02.025

Pandolf K. B., Givoni B., Goldman R. F. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly // *J. of Applied Physiology*. – 1977. – Vol. 43 (4). – P. 577–581. – doi:10.1152/jappl.1977.43.4.577

Tobler W. Three presentations on geographical analysis and modeling. National Center for Geographic Information and Analysis, Technical Report 93–1. Univ. of California, Santa Barbara, CA. – 1993. – 24 p.

Verhagen P. Modelling of Pathways and Movement Networks in Archaeology: An Overview of Current Approaches / P. Verhagen, L. Nuninger, M. R. Groenhuijzen // *Finding the Limits of the Limes: Modelling Demography, Economy and Transport on the Edge of the Roman Empire*. – Cham: Springer, 2019. – P. 217–249.

References

Binford L. R. Willow Smoke and Dog's Tails: Hunters-Gatherer Settlement Systems and Archaeological Site Formation. *American Antiquity*, 1980. Vol. 45. P. 4–20.

Derevianko A. P., Shunkov M. V., Agadganyan A. K., Baryshnikov G. F., Malaeva V. M., Ulianov V. A., Kulik N. A., Postnov A. V., Anokin A. A. Paleoenvironment and Palaeolithic human occupation of Gorny Altai. Novosibirsk: IAET SB RAS Publ., 2003. 448 p. (In Russ.).

Field J. S., Lahr M. M. Assessment of the southern dispersal: GIS-based analyses of potential routes at oxygen isotopic stage. *J. of World Prehistory*, 2006. Vol. 19 (1). P. 1–45. doi:10.1007/s10963-005-9000-6

Gibson J. J. The ecological approach to visual perception. N. Y.; London: Psychology Press, 1986. 305 p.

Gowen K. M., de Smet T. S. Testing least cost path (LCP) models for travel time and kilocalorie expenditure: Implications for landscape genomics. *PLOS ONE*, 2020. Vol. 15, No. 9. Art. No. e0239387.

Korobov D. S. Osnovy geoinformatiki v arkheologii. M.: Moscow State Univ. Press., 2011. 244 p. (In Russ.).

Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). HYDRO1K Elevation Derivative Database. 2018. doi:10.5066/F77P8WN0 (Accessed: 28.05.2026).

Li F., Vanwezer N., Boivin N., Gao X., Ott F., Petraglia M., Roberts P. Heading north: Late Pleistocene environments and human dispersals in central and eastern Asia. *PLoS ONE*, 2019. Vol. 14 (5). Art. No. e0216433.

Morgan C. Reconstructing prehistoric hunter–gatherer foraging radii: a case study from California’s southern Sierra Nevada. *J. of Archaeol. Sci.*, 2008. Vol. 35, iss. 2. P. 247–258. doi:10.1016/j.jas.2007.02.025

Pandolf K. B., Givoni B., Goldman R. F. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *J. of Applied Physiology*, 1977. Vol. 43 (4). P. 577–581. doi:10.1152/jappl.1977.43.4.577

Tobler W. Three presentations on geographical analysis and modeling. National Center for Geographic Information and Analysis, Technical Report 93–1. Univ. of California, Santa Barbara, CA. 1993. 24 p.

Verhagen P. Modelling of Pathways and Movement Networks in Archaeology: An Overview of Current Approaches. In P. Verhagen, L. Nuninger, M. R. Groenhuijzen. In *Finding the Limits of the Limes: Modelling Demography, Economy and Transport on the Edge of the Roman Empire*. Cham: Springer, 2019. P. 217–249.

Zolnikov I. D., Postnov A. V., Lyamina V. A., Slavinskii V. S., Chupina D. A. Geoinformation Modeling of Environments Favorable for Prehistoric Humans of the Altai Mountains. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 2013. No. 3. P. 40–47.

Марченко Д. В. <https://orcid.org/0000-0003-3021-0749>

Дата сдачи рукописи: 31.05.2026 г.