

ИСТОРИЧЕСКАЯ АНТРОПОЛОГИЯ / ANTHROPOLOGY

Обзор / Review

<https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-25-4-12>

УДК/UDC 572. 572.1/4; 03.61.21

Агентное моделирование в археологии и антропологии: от миграций *Homo sapiens* к культурной динамике (аналитический обзор)

А.А. Мовсесян ✉

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, биологический факультет,
Москва, Российская Федерация

✉ amovsessyan@gmail.com

РЕЗЮМЕ

Введение. Агентное моделирование (АВМ) представляет собой метод, позволяющий исследовать сложные социальные и культурные процессы прошлого путём имитации поведения отдельных индивидов или групп в заданной среде. Учёт индивидуальных различия, формы взаимодействия и реакцию агентов на внешние условия, этот подход особенно эффективен при реконструкции миграций, расселения *Homo sapiens* и эволюции социальных институтов. Хотя за рубежом АВМ активно применяется в археологии и антропологии, в отечественной науке этот подход пока используется крайне редко.

Материалы и методы. Настоящий обзор основан на открытых академических источниках, отобранных с помощью специализированных поисковых систем, включая Google Scholar, Scopus, Web of Science, PubMed и Semantic Scholar. Из более чем 70 публикаций были выбраны 25, отвечающие критериям воспроизводимости моделей и междисциплинарного подхода, сочетающего археологические, генетические и климатические данные.

Результаты. Агентное моделирование применялось для воспроизведения выхода *Homo sapiens* из Африки, неолитической экспансии, расселения в Евразии, взаимодействий между мигрантами и аборигенными группами, а также для анализа эволюции языка. Модели демонстрируют, как климатические условия, демографические параметры и социальные нормы оказывали влияние на поведение агентов и формирование социальных структур.

Обсуждение. Несмотря на высокий потенциал, агентное моделирование обладает рядом ограничений: оно чувствительно к исходным параметрам, нередко характеризуется низкой воспроизводимостью и упрощённым представлением культурных компонентов. Одним из приоритетных направлений дальнейшего развития метода является интеграция биологических, социальных и культурных факторов, а также обеспечение открытости моделей для верификации и последующего развития.

Заключение. Агентное моделирование формирует новую исследовательскую парадигму, в рамках которой индивидуальное поведение на микроуровне может быть напрямую связано с макродинамикой социальной, демографической и культурной эволюции. Этот подход открывает возможности для подлинно междисциплинарного анализа прошлого человека и построения альтернативных сценариев его исторического развития.

Ключевые слова: палеоантропология; древние человеческие популяции; археология; археогенетика; демография; культурная эволюция; миграции

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

Для цитирования: Мовсесян А.А. Агентное моделирование в археологии и антропологии: от миграций *Homo sapiens* к культурной динамике (аналитический обзор) // Вестник Московского университета. Серия XXIII. Антропология. 2025. № 4. С.149-159. <https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-25-4-12>

Agent-Based Modeling in Archaeology and Anthropology: From Homo sapiens Migrations to Cultural Dynamics. A Critical Review

Alla A. Movsesian ✉

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Moscow, Russian Federation

✉ amovsessyan@gmail.com

ABSTRACT

Introduction. Agent-based modeling (ABM) is a computational approach used to explore complex social and cultural processes by simulating the behaviors of individual agents—people or groups—within a defined environment. By incorporating individual variation, agent interactions, and responses to environmental conditions, ABM is particularly valuable for reconstructing past patterns of migration, settlement, and the evolution of social institutions. Although widely adopted in international archaeology and anthropology, ABM remains underutilized in Russian research contexts.

Materials and methods. This review is based on academic publications available in open sources and identified through specialized search platforms such as Google Scholar, Scopus, Web of Science, PubMed, and Semantic Scholar. From over 70 initial records, 25 studies were selected that met the criteria of model reproducibility and interdisciplinary integration of archaeological, genetic, and climatic data.

Results. ABM has been applied to a wide range of prehistoric scenarios, including the Out-of-Africa dispersal of Homo sapiens, the Neolithic expansion, Eurasian population movements, interactions between migrants and indigenous groups, and the cultural evolution of language and institutions. These models highlight the roles of climate, population density, and social norms in shaping human behavior and long-term dynamics.

Discussion. Despite its strengths, ABM faces several challenges, including sensitivity to parameter choices, limited reproducibility, and simplified representations of culture. Advancing the method requires better integration of biological, social, and cultural dimensions, along with open access to model code and data for transparency and replication.

Conclusion. ABM represents an emerging research paradigm that links micro-level agent behavior with macro-level processes of social, demographic, and cultural evolution. It offers a powerful interdisciplinary framework for exploring human prehistory and alternative trajectories of societal development.

Keywords: paleoanthropology; ancient human populations; archaeology; archaeogenetics; demography; cultural evolution; migrations

Acknowledgements. The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

For citation: Movsesian A.A. Agent-Based Modeling in Archaeology and Anthropology: From Homo sapiens Migrations to Cultural Dynamics. A Critical Review. *Lomonosov Journal of Anthropology*. 2025 (4), pp. 149-159. <https://doi.org/10.55959/MSU2074-8132-25-4-12>

Введение

Агентное, или агентно-ориентированное моделирование (agent-based modeling, ABM) – это метод имитационного моделирования, в котором сложные социальные и демографические процессы воспроизводятся через поведение множества автономных агентов, обладающих индивидуальными характеристиками и набором правил. В результате их взаимодействий друг с другом и с окружающей средой на макроуровне могут возникать устойчивые паттерны, недоступные непосредственному наблюдению. В отличие от моделей, оперирующих усреднёнными значениями, ABM позволяет учитывать индивидуальное разнообразие, случайные флуктуации и адаптивные реакции, что делает его особенно ценным инструментом для анализа миграций, расселения *Homo sapiens* и культурных изменений в древности (Macal, 2017; Railsback, Grimm, 2012).

Для археологов и антропологов агентное моделирование открыло принципиально новые исследовательские горизонты. Оно позволяет изучать процессы, которые невозможно воспроизвести в реальных условиях или которые давно вышли за пределы эмпирического наблюдения. Более того, ABM создаёт виртуальную лабораторию, в которой можно исследовать сложные социальные явления, проверять археологические и палеогенетические гипотезы на основе параметрически управляемых симуляций (Romanowska et al., 2021). Это особенно важно в случае сложных систем, где макроуровневое поведение (например, распространение технологий, формирование институтов или трансформация социальных структур) возникает как результат локальных взаимодействий агентов. Агентные модели позволяют варьировать широкий спектр параметров – скорость миграции, плотность населения, социальные правила распределения ресурсов и формирования брачных союзов, модели культурного наследования, степень экологической нестабильности – и анализировать, как те или иные комбинации параметров могут приводить к формированию зон генетического смешения, очагов культурной диффузии, демографических «бутылочных горлышек» или устойчивых языковых ареалов.

Важным достоинством агентного моделирования является его способность воспроизво-

дить нелинейные и исторически контингентные траектории, согласующиеся с археологическими и популяционно-генетическими данными. В частности, ABM позволяет проверять, могли ли наблюдаемые сегодня распределения митохондриальных и Y-хромосомных линий сформироваться в результате конкретных сценариев миграций и брачных стратегий. Особую ценность представляют пространственно-явные агентные модели (spatially explicit simulations), которые учитывают географические и климатические ограничения – такие как горные хребты, водные преграды, пустыни или динамика осадков. Это делает симуляции более реалистичными и позволяет исследовать, как физическая среда и её изменения влияли на маршруты миграций, пространственную организацию сообществ и устойчивость популяций.

Агентное моделирование внесло существенный вклад в развитие теории двойного наследования (генно-культурной коэволюции), предоставив инструмент для количественного анализа взаимодействия биологических и культурных процессов в человеческих популяциях. Благодаря возможности моделировать не только биологическое воспроизводство, но и передачу знаний, норм, языков и технологий, ABM позволило формализовать ключевые механизмы культурной эволюции, включая вертикальную (от родителей к детям), горизонтальную (между сверстниками) и косвенную (от представителей старшего поколения вне семьи) передачу. Это сделало возможным интегральное изучение взаимосвязи демографии, генетики и культуры в долгосрочной исторической перспективе.

Базовая агентная модель строится на нескольких ключевых элементах. В первую очередь формируется пространственная среда – это может быть дискретная сетка или непрерывный ландшафт с варьирующимися экологическими характеристиками, такими как ресурсная насыщенность, климатическая устойчивость или экологическая ёмкость. В этой среде действуют агенты – индивидуумы или группы, обладающие набором жизненных параметров: возрастом, полом, репродуктивной способностью, генетическими признаками и культурными чертами. Поведение агентов определяется заданными правилами перемещения, взаимодействий, формирования брачных связей, кооперации и конфликтов. Важнейшей составляющей таких

моделей выступают механизмы наследования – как биологического (генетического), так и культурного, включая вертикальную, горизонтальную и косвенную передачу. В более продвинутых моделях учитываются стохастические события (например, эпидемии или климатические потрясения), институциональные структуры (такие как сети родства или формы лидерства), а также обратные связи между действиями агентов и окружающей средой – например, в форме нишевой конструкции или деградации ресурсов.

Современные программные платформы, такие как NetLogo, Repast и фреймворки на языке Python (например, Mesa), предоставляют широкие возможности для создания моделей различной степени сложности – от учебных прототипов до масштабных симуляций с географической привязкой и стохастической динамикой. Дополнительные перспективы открывает использование инструментов искусственного интеллекта, которые позволяют автоматизировать рутинные этапы программирования, генерировать начальные шаблоны кода и адаптировать модель под заданные параметры, что особенно важно для исследователей, не обладающих глубокой технической подготовкой.

Однако в то время как агентное моделирование активно развивается в международной археологии, биологической и культурной антропологии, в отечественной научной традиции этот подход остаётся практически не представленным. На сегодняшний день отсутствуют систематические попытки адаптировать АВМ к анализу археологических, палеогенетических или этнографических данных с территории Евразии. Это создаёт очевидный пробел между потенциалом метода и его применением в российском контексте. Настоящая статья направлена на обобщение современных практик агентного моделирования в мировых исследованиях древних популяций и на обозначение направлений, в которых этот подход может быть продуктивно использован в антропологии и археологии.

Материалы и методы

Представленный обзор основан на анализе открытых академических источников, отобранных с помощью специализированных поисковых систем, включая Google Scholar, Scopus, Web of Science, PubMed и Semantic Scholar. Ключевым критерием отбора служила непосредственная реализация агентного моделирования

(АВМ) в контексте изучения доисторических популяций человека – прежде всего, миграционных процессов, демографических трансформаций, культурной динамики и генетического взаимодействия. Особое внимание уделялось исследованиям, в которых агентные модели сочетались с эмпирическими данными археологии, палеогенетики и исторической экологии.

На этапе первичного поиска было выявлено свыше 70 публикаций, из которых 25 статей были отобраны для детального анализа. Исключались работы, в которых агентное моделирование носило декларативный характер, не сопровождавшийся формальным описанием правил поведения агентов, параметрических настроек или механизмов калибровки. Предпочтение отдавалось публикациям, содержащим пространственно-явные симуляции, воспроизводимые сценарии и доступ к исходному коду моделей, а также работам, демонстрирующим междисциплинарную интеграцию – с привлечением климатических реконструкций, данных древней ДНК или радиоуглеродных хронологий.

Все отобранные исследования были классифицированы по ключевым тематическим направлениям: моделирование миграций *Homo sapiens*, анализ социально-генетических взаимодействий между мигрантами и автохтонными группами, а также динамика культурной эволюции и формирования институтов. Такой подход позволил не только обобщить актуальные практики применения АВМ в антропологических и археологических исследованиях, но и обозначить направления, в которых данный методологический подход может быть продуктивно использован для изучения доисторических процессов в человеческих популяциях, включая перспективы его адаптации к материалам с территории Евразии.

Результаты

Моделирование миграций Homo sapiens в доисторическую эпоху

Одним из наиболее разработанных направлений применения АВМ в доисторических исследованиях стало моделирование масштабных миграций *Homo sapiens* – процессов, лежащих в основе освоения новых территорий, адаптации к окружающей среде и взаимодействия с другими популяциями гоминин. Агентное моделирование рассматривает миграцию как эмер-

джентное явление, возникающее из индивидуального поведения агентов под воздействием ландшафтных ограничений, климатических флуктуаций и социально-технологических факторов. Результаты симуляций сопоставляются с археологическими, генетическими и палеоклиматическими данными, что делает АВМ мощным инструментом для проверки конкурирующих гипотез о численности, маршрутах и динамике расселения *Homo sapiens*.

Показательным примером является исследование, в котором АВМ было использовано для количественного анализа гипотезы «исхода из Африки» (Hölzchen et al., 2016). В нём моделировалось влияние климата, географии и демографии на миграционные потоки, а также выделялись четыре сценария: экологический, демографический, ресурсный и когнитивный. Этот подход показал, что выход *Homo sapiens* за пределы Африки, вероятно, был следствием взаимодействия нескольких факторов, а не одного доминирующего механизма. Более масштабные симуляции (Vahdati et al., 2022) позволили реконструировать множественные волны миграций, каждая из которых приводила к частичному замещению аборигенных популяций и длительному сосуществованию с архаичными формами. Исчезновение неандертальцев, как показали модели, не поддаётся универсальному объяснению: в различных регионах оно обуславливалось разными факторами – от климатических изменений и конкуренции за ресурсы до различий в репродуктивной стратегии.

Для анализа потенциальных маршрутов миграции, включая Баб-эль-Мандеб, Левантийский коридор, Сицилию и Гибралтар, была разработана гибкая агентная модель (Timm et al., 2016), позволяющая варьировать параметры среды и поведенческие характеристики агентов. Этот инструмент может служить основой для будущих сценарных экспериментов, направленных на проверку различных гипотез о путях расселения *Homo sapiens*.

Для изучения пространственно-временной динамики неандертальских популяций в Западной Европе в позднем плейстоцене была разработана модель *HomininSpace* (Scherjon, 2019). С применением генетических алгоритмов для калибровки параметров и климатических реконструкций высокого разрешения продемонстрирована возможность воспроизведения процессов расселения и локального вымирания

неандертальцев, зафиксированных в археологическом материале.

В глобальной модели расселения *Homo sapiens* (Callegari et al., 2013) показано, что миграции *Homo sapiens* происходили не как равномерное и непрерывное движение, а с чередованием фаз продвижения и задержек. География и климат формировали своего рода «карманы» – зоны временной остановки, где популяции могли надолго закрепляться. Кроме того, случайные демографические и экологические колебания существенно влияли на направление и темпы последующих миграций и освоения новых территорий. Это подчёркивает необходимость учитывать не только экологические факторы, но и вероятностные процессы при моделировании доисторических миграций.

Агентное моделирование использовалось также для анализа продвижения *Homo sapiens* в Азию и освоения континентального шельфа Сахула (Norman et al., 2018). На основе моделирования морской видимости были реконструированы потенциальные северный и южный маршруты миграции через островную Юго-Восточную Азию. Полученные результаты показали, что оба пути были реалистичны с точки зрения навигационных возможностей и экологических ограничений, что подтверждает возможность осуществления морских переходов в условиях позднего плейстоцена.

Климатические факторы как ключевой драйвер плейстоценового расселения *Homo sapiens* подчёркиваются в модели, посвящённой анализу миграций популяций Западной Европы во время Последнего ледникового максимума (Wren, Burke, 2019). Согласно результатам моделирования, юг Франции и северо-восточная часть Пиренеев могли выполнять функцию основного гляциального рефугиума. Из этих зон, благодаря высокой скорости демографического роста, происходили регулярные миграционные волны, способствовавшие формированию генетической однородности населения значительной части Западной Европы, за исключением Апеннинского полуострова.

С позиций теории сложных адаптивных систем было рассмотрено также распространение неолитического земледелия в Европе (Aubán et al., 2015), где на примере Пиренейского полуострова были объединены АВМ и археологические данные о ранних неолитических поселениях. Наилучшее соответствие между моделью и эм-

пирическими данными дало сочетание нескольких условий: продвижение по южному и северо-западному маршрутам, скачкообразное (leap-frog) расселение, выбор наиболее продуктивных земель и избегание уже заселённых территорий. Работа иллюстрирует потенциал детализированного моделирования «снизу вверх» для реконструкции ранних аграрных трансформаций и уточнения пространственно-демографических сценариев неолитизации.

Наконец, пространственно-явная агентная модель (учитывающая географическое положение агентов и свойства окружающей среды) была применена для анализа демографических флуктуаций в Европе Среднего Голоцена (7 000–3000 гг. до н. э.) (Kondor et al., 2023). Результаты моделирования показали, что сценарии, основанные исключительно на климатических колебаниях, не способны объяснить циклические изменения численности населения. Напротив, модели, включающие социальные конфликты, возникающие при повышении плотности поселений, успешно воспроизводят паттерны, согласующиеся с археологическими данными. Это подчёркивает определяющее значение внутренних социальных факторов – включая насилие – в демографической истории обществ Среднего Голоцена.

В совокупности эти исследования демонстрируют, что агентное моделирование представляет собой мощный аналитический инструмент для реконструкции доисторических миграций *Homo sapiens*. Оно позволяет не только оценивать реалистичность различных гипотез, но и выявлять условия, при которых определённые сценарии оказываются эволюционно и демографически устойчивыми.

Генетическое смешение и социальная структура: анализ взаимодействий мигрантов и местных популяций

В изучении доисторических обществ одной из центральных тем является характер взаимодействия мигрантов и местного населения: происходило ли полное вытеснение коренных групп пришлыми, либо складывалась долговременная коэзистенция с межгрупповыми браками и генетическим обменом. Агентное моделирование оказалось особенно эффективным инструментом для проверки различных сценариев – от полного замещения до сложных, многоступенчатых процессов смешения. Благодаря гибкой

настройке характеристик агентов такие модели позволяют напрямую связывать социальные практики (например, частоту браков между группами, правила проживания после брака, статус мигрантов) с реально наблюдаемыми генетическими признаками.

Так, например, была предложена модель, в которой земледельцы и охотники-собиратели размещались на двух взаимосвязанных уровнях пространственной сетки (Rasteiro, Chikhi, 2012). Авторы исследования проанализировали 45 социальных режимов, варьируя патрилокальность, матрилокальность и частоту межгрупповых браков. Наилучшее соответствие эмпирическим данным показал сценарий с патрилокальностью у фермеров и редкими, но устойчивыми браками с местными женщинами: он точно воспроизводил соотношения митохондриальных и Y-хромосомных линий, зафиксированных в позднелинитических популяциях.

Интегративный подход был развит в недавнем исследовании (LaPolice et al., 2024), в котором математическое моделирование, агентные симуляции и данные древней ДНК были объединены для реконструкции процесса неолитизации в Европе. Переход от охоты и собирательства к сельскому хозяйству, как показали авторы, сопровождался не просто миграцией земледельцев, но и сложной социальной динамикой – ограниченным обменом культурными практиками и выраженным предпочтением эндогамных браков. Несмотря на значительное вытеснение охотников-собирателей, их генетический след сохранился: от 10 до 15% их наследия продолжают присутствовать в геномах современных европейцев. Это исследование подчёркивает необходимость пересмотра прежних моделей неолитической экспансии, акцентируя внимание на важности интеграции археологических, генетических и моделирующих подходов.

На основе обширных данных по древним геномам с помощью пространственно-явных генетических симуляций были проанализированы демографические и миграционные процессы, сопровождавшие крупные генетические изменения в Центральной Европе в раннем бронзовом веке (Rio et al., 2021). Рассматривались различные сценарии распространения скотоводческих популяций, связанных с ямной культурой, и их взаимодействия с местными группами Центральной Европы. Модель не подтвердила гипотезу

прямого вытеснения, указав на сосуществование скотоводов и земледельцев при ограниченном генетическом обмене. Таким образом, результаты агентного моделирования убедительно показывают, что даже редкие межгрупповые браки при длительной коэксистенции могут оставлять выраженные генетические следы. Социальные нормы, включая патрилокальность и матрилокальность, заметно влияют на соотношение мужских и женских линий происхождения. Введение в модель элементов естественного отбора позволяет проследить, каким образом процессы смешения могли способствовать адаптации древних популяций к новым условиям.

Интеграция с внешними генетическими модулями, такими как SPLATCHE3 – пространственно-явной платформой для моделирования распространения генов в демографически и экологически изменчивой среде (Currat et al., 2019), – существенно расширила возможности анализа. Она позволяет сравнивать симулированные частоты аллелей или гаплогрупп с данными древней ДНК и уточнять сценарии генетического смешения на фронтах демографической экспансии.

Моделирование динамики культурной эволюции

Агентно-ориентированный подход предлагает эффективные средства для анализа того, как индивидуальные акты обучения, подражания и новаторства складываются в крупномасштабные процессы – распространение технологий, закрепление социальных норм, формирование институтов. Моделируя поведение множества автономных «носителей культуры», АВМ позволяет задавать различные каналы культурной передачи – вертикальный, горизонтальный, косвенный – и сочетать их с демографическими, социальными и экологическими параметрами. С помощью таких моделей можно экспериментально проверять гипотезы о происхождении и развитии культурных феноменов, сопоставляя результаты симуляций с археологическими, этнографическими и лингвистическими данными.

Теоретические модели культурной эволюции предполагают, что индивидуальные детали культурной трансмиссии могут иметь специфические и значимые эффекты на уровне популяции, подразумевая, что различия в трансмиссии могут быть обнаружены в археологических записях. Так, например, исследование культурной

трансмиссии доисторической технологии наконечников стрел в доисторических обществах Невады и Калифорнии с помощью агентного моделирования (Mesoudi, O'Brien, 2008) показало, что стратегия «копирования успешных индивидов», при которой агенты имитировали наиболее эффективные конструкции, привела к вариациям в морфологии наконечников, наиболее соответствующим археологическим данным. По мнению авторов, это подтверждает гипотезу о том, что региональные различия в формах наконечников во время распространения технологии лука и стрел были обусловлены направленной вариацией (целенаправленным изменением конструкций) и косвенным предпочтением (выбором успешных моделей через наблюдение).

С помощью АВМ была формально проверена теория циркумскрипции, согласно которой рост населения при ограниченных возможностях территориального расширения способствует формированию социальной иерархии. Модель включала три типа ограничений: социальные, экологические и ресурсные. Результаты показали, что наибольшее влияние на формирование иерархических структур оказывают именно социальные барьеры, такие как межгрупповые конфликты или высокая плотность соседствующих поселений, поскольку они усиливают социальную сложность за счёт пространственной концентрации населения. Экологические и ресурсные ограничения, напротив, могут как сдерживать, так и стимулировать развитие иерархий – в зависимости от того, способствуют ли они пространственной концентрации населения. Таким образом, моделирование уточняет механизм циркумскрипции и выявляет условия, при которых наиболее вероятно формирование сложных форм социальной организации (Williams, Mesoudi, 2024).

Анализировалось также воздействие случайных факторов, таких как генетический дрейф, включая демографические «бутылочные горлышки», на передачу нейтральных непрерывных культурных признаков, которые не влияют на выживание и постепенно изменяются в процессе социальной трансмиссии (Rorabaugh, 2014). Агентное моделирование показало, что при отсутствии отбора случайные процессы могут оказывать значительное влияние на распространение и устойчивость таких признаков, особенно в условиях резкого сокращения численности населения, когда наблюдается заметное сниже-

ние культурного разнообразия. Эти результаты подчёркивают важность учёта стохастических демографических эффектов при моделировании культурной динамики.

Помимо этого, агентная модель была использована для изучения возникновения и развития грамматических структур (Steels, 2016). Автор выделил три ключевых этапа в эволюции языка: переход от действий к жестам, от звуков к словам и, наконец, от отдельных слов к грамматике. Особое внимание было уделено последнему этапу, в рамках которого исследовалось, как грамматические формы могли самоорганизовываться в результате взаимодействий между агентами в языковых играх. Модель показала, что сложные грамматические системы способны эволюционировать без централизованного контроля, опираясь на когнитивные способности агентов, процессы обучения и адаптацию к коммуникативным ситуациям. Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что грамматика не является результатом «единого изобретения», а возникает как распределённый культурный процесс, закрепляющийся через повторяющееся социальное взаимодействие. Таким образом, язык представлен не как жёстко заданная структура, а как динамическая система, эволюционирующая в ответ на изменяющиеся потребности группы.

Была предложена также оригинальная агентная модель, анализирующая возможный механизм совместной эволюции языка и способностей к его использованию (Azumagakito et al., 2018). Модель интегрирует три взаимосвязанных процесса: биологическую эволюцию, культурную передачу языка и индивидуальное обучение. Особое внимание уделяется фенотипической пластичности – способности организма адаптироваться к окружающей среде в течение жизни. Именно она позволяет агентам осваивать меняющийся язык даже при медленном темпе генетических изменений. Со временем, как показывает модель, биологические и культурные изменения начинают «синхронизироваться», что приводит к их взаимному усилению и совместному развитию языковых и когнитивных способностей.

На основе данных когнитивистики, археологии и археогенетики были выделены три взаимосвязанных фактора, которые могли сыграть ключевую роль в формировании «современного» языкового фенотипа: снижение реактивной

агрессии, сопровождавшееся ростом просоциальности; изменения в раннем развитии мозга, затронувшие мозжечок, полосатое тело и связанные с ними цепи процедурной памяти; а также демографическую экспансию *Homo sapiens* в среднем плейстоцене (Ruland et al., 2023). Для оценки совокупного влияния этих факторов на процессы информационной передачи в популяции авторы разработали абстрактную агентную модель, где языковая способность представлена как набор передаваемых умений. Результаты симуляций показали, что максимальный объём передаваемой информации достигается при определённом балансе между уровнем кооперации и объёмом памяти: высокая память в сочетании с умеренным уровнем конкурентности способствует формированию отдельных языковых сообществ, в то время как размер популяции не оказывает существенного влияния.

Обсуждение

Ограничения и перспективы агентного моделирования в антропологии

Современные агентные модели демонстрируют значительный прогресс: они всё чаще опираются на пространственно-привязанные данные – карты археологических памятников, палеоклиматические растры, массивы древней и современной ДНК. Показателен пример симуляции неолитической экспансии в Юго-Восточной Азии, использующей 2 299 геномов из 84 популяций и четыре типа генетических маркеров (Vallée et al., 2016). Модель воспроизводит расселение и смешение популяций от неолита до наших дней, учитывая географию, демографию и брачные предпочтения, тем самым демонстрируя переход АВМ от описательных схем к количественному сопоставлению с многомерными данными.

Ключевое преимущество АВМ – методологическая гибкость. Агентные модели позволяют варьировать поведение агентов и параметры среды, отслеживая системные последствия изменений. Это создаёт условия для проверки гипотез и анализа альтернативных сценариев, невозможных в реальности по практическим или этическим причинам. В то же время одним из уязвимых мест АВМ остаётся высокая чувствительность к заданным параметрам. Многие из них реконструируются на основе современных аналогий, что вносит не-

определённость: изменения входных данных могут существенно влиять на результаты. Так, например, даже незначительные изменения в правилах поведения агентов – например, в том, как они принимают решения о миграции, выборе партнёра или реагировании на внешние условия – могут привести к кардинально различным результатам на уровне всей системы. Это особенно актуально для моделирования миграционных процессов, где мелкие параметры индивидуальных стратегий способны существенно изменить пространственно-временные траектории расселения популяций (Klabunde, Willekens, 2016). Подобная чувствительность моделей к заданным параметрам подчёркивает необходимость их тщательной калибровки, прозрачной документации и проверки на воспроизводимость. Последняя остаётся серьёзным вызовом: несмотря на рост инициатив в области открытой науки, многие модели до сих пор публикуются без доступа к исходному коду и данным, что затрудняет верификацию результатов и повторное использование. Обзор работ по археологическому агентному моделированию указывает на системный характер этой проблемы (Carney, Davies, 2020). Культурная компонента также нередко остаётся чрезмерно упрощённой: «культура» в моделях часто сводится к бинарной переменной или одному признаку, например стилю керамики. Повышение объяснительной мощности АВМ требует более детализированного моделирования социальных механизмов – от стратегий обмена и брачных практик до форм политической организации и распределения ресурсов.

Переход к более реалистичным сценариям эволюции возможен лишь при интеграции биологических, демографических, культурных и институциональных факторов. Перспективным направлением становится создание открытых модульных платформ для моделирования совместной эволюции генов, культуры и институтов с калибровкой по массивам данных: древней ДНК, климатическим реконструкциям и радиоуглеродным хронологиям.

Заключение

Агентное моделирование всё активнее утверждается как независимая исследовательская традиция в антропологии и археологии. Его сила заключается не только в способности обрабатывать сложные данные, но и в том, что оно

предлагает новую форму научного мышления – экспериментальную, динамическую, способную соединять микроуровень индивидуального поведения с макроуровнем культурной и демографической трансформации.

Виртуальные общества, создаваемые в агентных моделях, дают возможность «прожить» альтернативные исторические сценарии, варьировать параметры, тестировать границы устойчивости и воспроизводить процессы, недоступные эмпирическому наблюдению. При этом АВМ не подменяет археологию или археогенетику, а становится пространством их интеграции, где количественные данные обретают динамику, а качественные гипотезы – проверяемость.

Будущее агентного моделирования – в его способности не только объяснять прошлое, но и открывать новые исследовательские горизонты, объединяя методы естественных и гуманитарных наук в рамках подлинно междисциплинарного подхода.

Список литературы

- Aubán J.B.C., Barton C.M., Pardo Gordó S., Bergin S.M. Modeling initial Neolithic dispersal: The first agricultural groups in West Mediterranean. *Ecol. Model.*, 2015, 307, pp. 22–31. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.03.015
- Azumagakito T., Suzuki R., Arita T. An integrated model of gene-culture coevolution of language mediated by phenotypic plasticity. *Sci. Rep.*, 2018, 8 (1), 8025. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26233-7>
- Callegari S., Weissmann J., Tkachenko N., Petersen W., Lake G., Ponce de León M., Zollikofer C. An agent-based model of human dispersals at a global scale. *Adv. Complex Syst.*, 2013, 16. <https://doi.org/10.1142/S0219525913500239>
- Carney M., Davies B. Agent-based modeling, scientific reproducibility, and taphonomy: A successful model implementation case study. *J. Comput. Appl. Archaeol.*, 2020, 3 (1), pp. 182–196. <https://doi.org/10.5334/jcaa.52>
- Curat M., Arenas M., Quilodrán C.S., Excoffier L., Ray N. SPLATCHE3: Simulation of serial genetic data under spatially explicit evolutionary scenarios including long-distance dispersal. *Bioinformatics*, 2019, 35 (21), pp. 4480–4483. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz311>
- Hölzchen E., Hertler C., Timm I., Lorig F. Evaluation of Out of Africa hypotheses by means of agent-based modeling. *Quat. Int.*, 2016, 413 (B), pp. 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.022>
- Klabunde A., Willekens F. Decision-making in agent-based models of migration: State of the art and challenges. *Eur. J. Popul.*, 2016, 32. <https://doi.org/10.1007/s10680-015-9362-0>
- Kondor D., Bennett J.S., Gronenborn D., et al. Explaining population booms and busts in Mid-Holocene Europe. *Sci. Rep.*, 2023, 13, 9310. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35920-z>
- LaPolice T.M., Williams M.P., Huber C.D. The European Neolithic expansion: A model revealing intense assorta-

tive mating and restricted cultural transmission. *bioRxiv*, 2024. <https://doi.org/10.1101/2024.04.29.591653>

Macal C.M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. *J. Simul.*, 2017, 10 (2), pp. 144–156. <https://doi.org/10.1057/jos.2016.7>

Mesoudi A., O'Brien M. The cultural transmission of Great Basin projectile-point technology I: An experimental simulation. *Am. Antiq.*, 2008, 73, pp. 3–28. <https://doi.org/10.2307/25470456>

Norman K., Inglis J., Clarkson C., Faith J.T., Shulmeister J., Harris D. An early colonisation pathway into northwest Australia 70–60,000 years ago. *Quat. Sci. Rev.*, 2018, 180, pp. 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.023>

Railsback S.F., Grimm V. *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. Princeton: Princeton University Press, 2012.

Rasteiro R., Chikhi L. Investigating sex-biased migration during the Neolithic transition in Europe using an explicit spatial simulation framework. *Proc. R. Soc. B*, 2012, 279, pp. 4442–4449. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2323>

Rio J., Quilodrán C.S., Currat M. Spatially explicit paleogenomic simulations support cohabitation with limited admixture between Bronze Age Central European populations. *Commun. Biol.*, 2021, 4, 1163. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-02670-5>

Romanowska I., Wren C., Crabtree S. *Agent-Based Modeling for Archaeology: Simulating the Complexity of Societies*. Santa Fe Institute Press, 2021 <https://doi.org/10.37911/9781947864382>.

Rorabaugh A.N. Impacts of drift and population bottlenecks on the cultural transmission of a neutral continuous trait: An agent-based model. *J. Archaeol. Sci.*, 2014, 49, pp. 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.05.016>

Ruland M., Andirkó A., Romanowska I., Boeckx C. Modelling of factors underlying the evolution of human language. *Adapt. Behav.*, 2023, 31 (4), pp. 351–364. <https://doi.org/10.1177/10597123221147336>.

Scherjon F. *Virtual Neanderthals: A Study in Agent-Based Modelling Late Pleistocene Hominins in Western Europe*. Ph.D. diss., Leiden University, 2019. <https://doi.org/openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/73639>

Steels L. Agent-based models for the emergence and evolution of grammar. *Philos. Trans. R. Soc. B*, 2016, 371, 20150447. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0447>

Timm I., Lorig F., Hölzchen E., Hertler C. Multi-scale agent-based simulation of long-term dispersal processes: Towards a sophisticated simulation model of hominin dispersal. In: *Multi-Agent-Based Simulation XVI*, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31481-5_2

Vahdati R.A., Weissmann J., Timmermann A., Ponce de León M., Zollikofer C. Exploring Late Pleistocene hominin dispersals, coexistence and extinction with agent-based multi-factor models. *Quat. Sci. Rev.*, 2022, 279, 107391. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107391>

Vallée F., Luciani A., Cox M.P. Reconstructing demography and social behavior during the Neolithic expansion from genomic diversity across Island Southeast Asia. *Genetics*, 2016, 204 (4), pp. 1495–1506. <https://doi.org/10.1534/genetics.116.191379>

Williams A.J., Mesoudi A. A formal test using agent-based models of the circumscription theory for the evolution of social complexity. *J. Archaeol. Sci.*, 2024, 172. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2024.106090>

Wren C.D., Burke A. Habitat suitability and the genetic structure of human populations during the Last Glacial Max-

imum (LGM) in Western Europe. *PLoS ONE*, 2019, 14 (6), e0217996. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217996>

References

Aubán J.B.C., Barton C.M., Pardo Gordó S., Bergin S.M. Modeling initial Neolithic dispersal: The first agricultural groups in West Mediterranean. *Ecol. Model.*, 2015, 307, pp. 22–31. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.03.015

Azumagakito T., Suzuki R., Arita T. An integrated model of gene-culture coevolution of language mediated by phenotypic plasticity. *Sci. Rep.*, 2018, 8 (1), 8025. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26233-7>

Callegari S., Weissmann J., Tkachenko N., Petersen W., Lake G., Ponce de León M., Zollikofer C. An agent-based model of human dispersals at a global scale. *Adv. Complex Syst.*, 2013, 16. <https://doi.org/10.1142/S0219525913500239>

Carney M., Davies B. Agent-based modeling, scientific reproducibility, and taphonomy: A successful model implementation case study. *J. Comput. Appl. Archaeol.*, 2020, 3 (1), pp. 182–196. <https://doi.org/10.5334/jcaa.52>

Currat M., Arenas M., Quilodrán C.S., Excoffier L., Ray N. SPLATCHE3: Simulation of serial genetic data under spatially explicit evolutionary scenarios including long-distance dispersal. *Bioinformatics*, 2019, 35 (21), pp. 4480–4483. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btz311>

Hölzchen E., Hertler C., Timm I., Lorig F. Evaluation of Out of Africa hypotheses by means of agent-based modeling. *Quat. Int.*, 2016, 413 (B), pp. 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.022>

Klabunde A., Willekens F. Decision-making in agent-based models of migration: State of the art and challenges. *Eur. J. Popul.*, 2016, 32. <https://doi.org/10.1007/s10680-015-9362-0>

Kondor D., Bennett J.S., Gronenborn D., et al. Explaining population booms and busts in Mid-Holocene Europe. *Sci. Rep.*, 2023, 13, 9310. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35920-z>

LaPolice T.M., Williams M.P., Huber C.D. The European Neolithic expansion: A model revealing intense assortative mating and restricted cultural transmission. *bioRxiv*, 2024. <https://doi.org/10.1101/2024.04.29.591653>

Macal C.M. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. *J. Simul.*, 2017, 10 (2), pp. 144–156. <https://doi.org/10.1057/jos.2016.7>

Mesoudi A., O'Brien M. The cultural transmission of Great Basin projectile-point technology I: An experimental simulation. *Am. Antiq.*, 2008, 73, pp. 3–28. <https://doi.org/10.2307/25470456>

Norman K., Inglis J., Clarkson C., Faith J.T., Shulmeister J., Harris D. An early colonisation pathway into northwest Australia 70–60,000 years ago. *Quat. Sci. Rev.*, 2018, 180, pp. 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.023>

Railsback S.F., Grimm V. *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction*. Princeton: Princeton University Press, 2012.

Rasteiro R., Chikhi L. Investigating sex-biased migration during the Neolithic transition in Europe using an explicit spatial simulation framework. *Proc. R. Soc. B*, 2012, 279, pp. 4442–4449. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2323>

Rio J., Quilodrán C.S., Currat M. Spatially explicit paleogenomic simulations support cohabitation with limited admixture between Bronze Age Central European

populations. *Commun. Biol.*, 2021, 4, 1163. [https://doi.org/ 10.1038/s42003-021-02670-5](https://doi.org/10.1038/s42003-021-02670-5)

Romanowska I., Wren C., Crabtree S. *Agent-Based Modeling for Archaeology: Simulating the Complexity of Societies*. Santa Fe Institute Press, 2021 [https://doi.org/ 10.37911/9781947864382](https://doi.org/10.37911/9781947864382).

Rorabaugh A.N. Impacts of drift and population bottlenecks on the cultural transmission of a neutral continuous trait: An agent-based model. *J. Archaeol. Sci.*, 2014, 49, pp. 255–264. [https://doi.org/ 10.1016/j.jas.2014.05.016](https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.05.016)

Ruland M., Andirkó A., Romanowska I., Boeckx C. Modelling of factors underlying the evolution of human language. *Adapt. Behav.*, 2023, 31 (4), pp. 351–364. [https://doi.org/ 10.1177/10597123221147336](https://doi.org/10.1177/10597123221147336).

Scherjon F. *Virtual Neanderthals: A Study in Agent-Based Modelling Late Pleistocene Hominins in Western Europe*. Ph.D. diss., Leiden University, 2019. [https://doi.org/ openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/73639](https://doi.org/openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/73639)

Steels L. Agent-based models for the emergence and evolution of grammar. *Philos. Trans. R. Soc. B*, 2016, 371, 20150447. [https://doi.org/ 10.1098/rstb.2015.0447](https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0447)

Timm I., Lorig F., Hölzchen E., Hertler C. Multi-scale agent-based simulation of long-term dispersal processes: Towards a sophisticated simulation model of hominin dispersal. In: *Multi-Agent-Based Simulation XVI*, 2016. [https://doi.org/ 10.1007/978-3-319-31481-5_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31481-5_2)

Vahdati R.A., Weissmann J., Timmermann A., Ponce de León M., Zollikofer C. Exploring Late Pleistocene hominin dispersals, coexistence and extinction with agent-based multi-factor models. *Quat. Sci. Rev.*, 2022, 279, 107391. [https://doi.org/ 10.1016/j.quascirev.2022.107391](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107391)

Vallée F., Luciani A., Cox M.P. Reconstructing demography and social behavior during the Neolithic expansion from genomic diversity across Island Southeast

Asia. *Genetics*, 2016, 204 (4), pp. 1495–1506. [https://doi.org/ 10.1534/genetics.116.191379](https://doi.org/10.1534/genetics.116.191379)

Williams A.J., Mesoudi A. A formal test using agent-based models of the circumscription theory for the evolution of social complexity. *J. Archaeol. Sci.*, 2024, 172. [https://doi.org/ 10.1016/j.jas.2024.106090](https://doi.org/10.1016/j.jas.2024.106090)

Wren C.D., Burke A. Habitat suitability and the genetic structure of human populations during the Last Glacial Maximum (LGM) in Western Europe. *PLoS ONE*, 2019, 14 (6), e0217996. [https://doi.org/ 10.1371/journal.pone.0217996](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217996)

Информация об авторе/ Information about the author

Мовсесян Алла Арменовна, д.б.н.;

amovsessyan@gmail.com

[https://orcid.org/ 0000-0003-1329-5904](https://orcid.org/0000-0003-1329-5904)

Movsesian Alla Armenovna, PhD, DSc.;

amovsessyan@gmail.com

[https://orcid.org/ 0000-0003-1329-5904](https://orcid.org/0000-0003-1329-5904)

Поступила в редакцию 25.06.2025.
Получена после доработки 04.07.2025.
Принята к публикации 04.07.2025.

Received 25.06.2025.

Revised 04.07.2025.

Accepted 04.07.2025.