

К. Шварц¹
М. Сорокин²

¹GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия

²Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия
(E-mail: k.schwartz@gsi.de)

Геном человека раскрывает эволюцию *Homo sapiens*

Аннотация. Эволюция современного человека началась два с половиной миллиона лет назад с *Homo erectus*. Несколько сот тысяч лет назад от ветки *Homo erectus* отделились неандертальцы, денисовцы и современный человек *Homo sapiens*, который единственный сохранился до наших дней. Сложную историю *Homo* раскрывают генетические исследования и сравнение генома современного человека с геном неандертальцев и денисовцев. В эти исследования существенный вклад внес Сванте Паабо (Svante Pääbo), профессор Института эволюционной антропологии общества Макса Планка, который расшифровал геном неандертальцев и денисовцев. Сравнение генома современного человека с геномами неандертальцев и денисовцев позволило раскрыть размер популяции, пути и длительность перемещения различных групп древнего человека, их взаимодействие и биологическое скрещивание. Было показано, что в Евразии современный человек несет следы генов неандертальцев, а в Азии и Океании – денисовцев. Согласно исследованиям антропологов, выживание *Homo sapiens* обусловлено когнитивной революцией, которая осуществлялась около семидесяти тысяч лет назад и связана с развитием языка, общением и объединением в большие группы.

Ключевые слова: геном, археогенетика, *Homo sapiens*, неандертальцы, денисовцы, когнитивная революция.

DOI: 10.32523/2616-7034-2021-134-1-38-45

Введение. Туманность Андромеды, которую можно увидеть визуально как пятно света в ночном небе, является самым далеким объектом во Вселенной, который можно увидеть невооруженным глазом. Свет, который мы воспринимаем сегодня, был излучен два с половиной миллиона лет назад, когда наш далекий предшественник *Homo erectus* начал свой путь на Земле (рис. 1). Это было начало истории человечества. В школьных учебниках история начинается с описания Древнего Египта 5000 лет назад. Этот период истории охватывает лишь две тысячные доли существования *Homo erectus*! Путь истории человечества до наших дней охватывает два с половиной миллиона лет! Сто тысяч лет назад наш генетический предок *Homo sapiens*, покинув Африку, начал осваивать все континенты: от Австралии, Азии, Европы до Америки (рис.2). Двенадцать тысяч лет назад *Homo sapiens* на разных континентах превратился из охотника-собирателя в земледельца и скотоводства с постоянным поселением. Эта сельскохозяйственная революция изменила общество *Homo sapiens* на всех континентах и открыла путь древней китайской, египетской, майянской и другим культурам и привела нас к современному обществу с искусственным интеллектом, ядерной энергетикой и космическими спутниками.

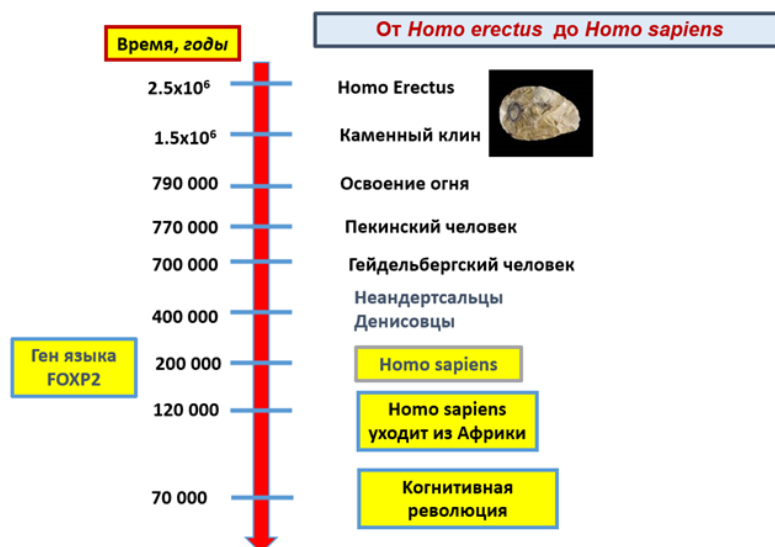


Рисунок 1 - Некоторые этапы истории человечества до когнитивной революции

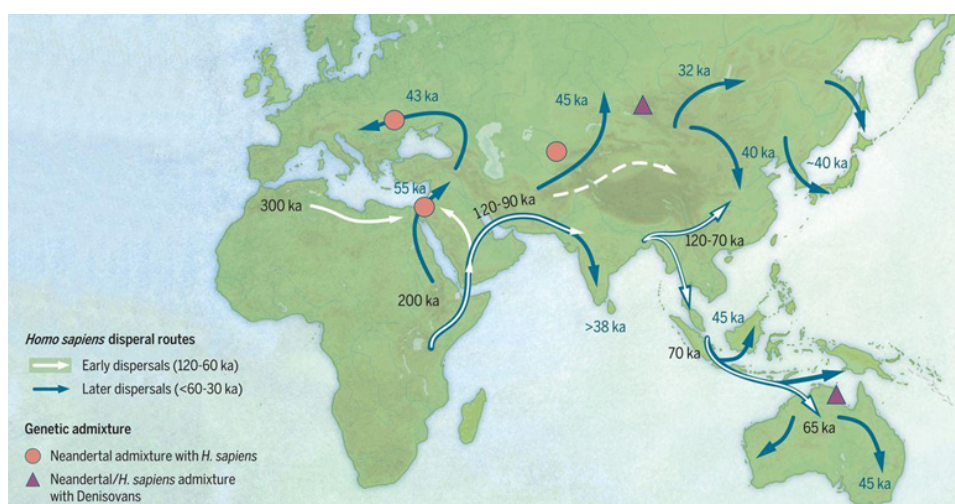


Рисунок 2 - *Homo sapiens* на несколько периодов покинул Африку и жил в контакте с неандертальцами и денисовцами. Поток генов от неандертальцев преобладал в Европе и Евразии (красный кружок) и от денисовцев к человеку в Азии и Океании (красный треугольник). На рисунке показаны периоды миграции в единицах «ка» (1ка = 1000 лет)

Сложный путь от *Homo erectus* и его потомков до современного человека раскрывает археология: кости скелета, инструменты (клин, ножи и другие находки), а также предметы хозяйства, ритуальных и религиозных культов и первобытного искусства (скульптуры, наскальная живопись). Однако, основную информацию об эволюции *Homo* дает археогенетика, которая по анализу ДНК оценивает размер популяции, язык (языковой ген), генетическое дерево (общие предки) и поток генов между различными группами *Homo*, анализируя геномы древних людей и сравнивая их с геномом современных людей. Анализ ДНК показал, что у жителей всех континентов есть общие предки (Y-хромосомный Адам и митохондриальная Ева), которые жили в Африке сотни тысяч лет назад и в процессе эволюции создали сегодняшних людей. Геном человека также раскрывает генетическое прошлое: в каждом из нас содержится сложная история *Homo sapiens*.

Все началось в Африке. Происхождение человека и общий предок с обезьянами был заключением теории эволюции Чарльза Дарвина (*Charles Darwin*, 1809-1882), которую активно защищал от церковной критики в девятнадцатом веке выдающийся английский биолог профессор Томас Генри Хаксли (*Thomas Henry Huxley*, 1825-1895), получивший в английской прессе прозвище «Бульдог Дарвина». В 1869 году Хаксли основал журнал *Nature*, до сих пор являющийся ведущим в мире журналом по естественным наукам.

В девятнадцатом и в первой половине двадцатого века в науке считалось, что древние первобытные люди могли возникнуть в различных частях земного шара, где климатические условия были благоприятными, и развивались до современного человека. Во времена Дарвина не было объективных данных о временной шкале эволюции человека, которая насчитывает миллионы лет. Однако биологам в то время уже было ясно, что надо искать недостающие звенья (археологические скелеты) между обезьянами и современными людьми – видом, который профессором Упсальского университета Карл Линней, (*Carl von Linné*, 1707-1778) еще в восемнадцатом веке был классифицирован как *Homo sapiens*. Эти поиски в конце девятнадцатого века начал голландский врач Эжен Дюбуа (*Eugène Dubois*, 1858-1940) в тогдашней голландской колонии на острове Ява при большой технической поддержке правительства. После долгих поисков Дюбуа в 1891 году обнаружил большой зуб, остатки скальпа и бедренный кость, которые после долгих обсуждений были приписаны *Homo erectus*. Сегодня считается, что возраст, обнаруженные на Яве находки, относятся к двум периодам: 1.3 и 0.9 миллиона лет назад. Эти исследования также показали, что *Homo erectus* намного раньше *Homo sapiens* покинул Африку и отправился в дальние путешествия.

Научная реконструкция эволюции *Homo sapiens* стала возможна только во второй половине двадцатого и в двадцать первом веке на основе достижений молекулярной биологии и генетики. При этом, важную роль сыграли так называемые «генетические часы» в геноме человека - изменения в молекулах ДНК. Сравнивая геномы археологических находок разных возрастов и регионов друг с другом, можно реконструировать время проживания и оценить поток генов между различными группами людей в процессе эволюции. Эти генетические исследования также дополняются современным методами радиоизотопного датирования, которые позволяют точно оценить возраст находок. Хронология эволюции человека, основанная на молекулярной биологии и генетике, была впервые опубликована в 1967 году и с тех пор ежегодно обновляется благодаря новым открытиям в археогенетике и археологии. Сванте Паабо (*Svante Pääbo*, 1955), профессор Института эволюционной антропологии общества Макса Планка, открыл новую страницу в изучении эволюции человека, расшифровав геном неандертальцев в 2010 году и чуть позже геном Денисовского человека (рис.3) [1]. Эти археогенетические исследования проводились международной группой ученых под руководством профессора. Расшифровка генома архаичных людей была намного сложнее, чем генома современного человека. После смерти человека гены и ДНК подвергаются воздействию окружающей среды и климата, химически трансформируются и разрушаются различными бактериями. Архаичные гены лучше выживают в прохладном климате и без воздействия воды (в каменных пещерах). Большинство ископаемых костей сохранило лишь несколько процентов или даже доли процентов исходного генома. Профессор Паабо и его коллеги разработали специальные методы восстановления ДНК генома и компьютерные программы для анализа генов и сравнения с геномом современного человека. Кроме того, во всех экспериментах с архаичными генами приходилось их изолировать от наших собственных: даже прикосновение пальца к ископаемой кости (с нашими генами!) подавляет слабый сигнал ДНК древнего человека. Такой анализ был проведен ведущими археогенетическими группами по всему миру за последнее десятилетие, изменяя и исправляя сложную эволюционную историю *Homo sapiens* (см. [1] и литературные ссылки).

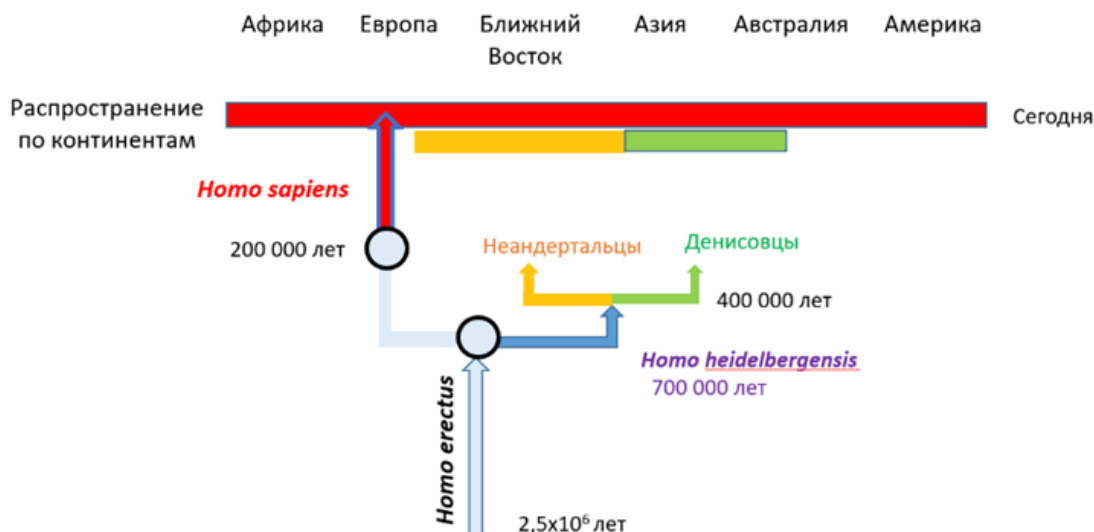


Рисунок 3 - Генеалогическое дерево современного человека от *Homo erectus*, неандертальцев и денисовцев по сей день. На рисунке показано распределение отдельных групп по континентам [1]

Номо покидает Африку и завоевывает мир. Сегодня есть надежные археологические раскопки, доказывающие, что *Homo erectus* рано покинул Африку и распространился по Европе и Азии. Миграция началась очень далеко в прошлом: находки на Кавказе (близ Тбилиси) датируются 1.75 млн. лет назад. Возраст пекинского человека в Китае насчитывает 780 000 лет. Самые старые находки в Европе – это останки Гейдельбергского человека, обнаруженные в 1907 году недалеко от Гейдельберга (Германия), возраст которых по данным радиоизотопного датирования составляет $609\,000 \pm 40\,000$ лет. В распоряжении этих архаичных людей были лишь примитивный каменный клин и копье. Применение огня был обнаружен намного позже – 790 000 лет назад. Путешествие из Африки на остров Ява заняло многие тысячи лет. Для выживания требуется минимальный размер мигрирующей группы. Невозможно определить размер популяции этих архаичных людей, живших миллионы лет назад, по геному, потому что молекулы ДНК полностью разрушаются за время более ста тысяч лет [1]. Население *Homo erectus* в Африке миллион лет назад оценивается в несколько десятков тысяч. Численность популяции *Homo sapiens* в мире во время сельскохозяйственной революции (12–10 тысяч лет назад) оценивается в 5–10 миллионов по данным генома.

Палеонтологи считают, что первые группы *Homo erectus*, покинувшие Африку, были небольшими, а скорость миграции, по мнению палеонтологов, составляла несколько десятков километров за одно поколение (около 20-25 лет). Древним людям потребовались десятки тысяч лет, чтобы добраться до острова Ява: *Homo erectus* покинул Африку намного раньше, чем предполагаемый возраст археологических находок. О причинах, по которым древние люди покинули Африку, можно лишь догадываться: изменение климата, конкуренция с другими группами, желание увидеть что-то новое. Первые группы мигрантов были небольшими. Массовая миграция началась намного позже, около 70 000 лет назад, и в основном осуществлялась *Homo sapiens* (рис. 2).

Более ста тысяч лет назад неандертальцы жили в основном на Ближнем Востоке и в южной Европе, а денисовцы жили в Евразии и Азии (рис. 3). Известный археолог и палеонтолог профессор Анатолий Пантелеевич Деревянко (1943) в 2008 году обнаружил первые останки древних человеческих костей в Денисовой пещере (холм Алтая в 220 км от Барнаула). В сотрудничестве с профессором Сванте Паабо генетический анализ этих находок открыл новую страницу в истории древних людей, особенно в изучении распространения древних людей в Азии

и Океании, а также о потоках генов между разными группами. Анализ первых результатов показал различия между денисовским геномом и геномами неандертальцев и современного человека. Вскоре после этого Сванте Паабо и его коллеги расшифровали геном Денисовского человека (*Homo denisovensis*) [1]. За последние десять лет, помимо денисовских генов, в находках Денисовской пещеры были обнаружены как гены неандертальцев, так и смесь, показывающая скрещивания древних людей.

Первые миграции *Homo sapiens* из Африки начались 120 000 лет назад, а особенно активная миграция началась 70 000 лет назад, когда маршрут *Homo sapiens* вдоль берегов Аравийского моря и Индийского океана привел к Новой Гвинее и Австралии. Сегодня никто не может сказать, почему далекая Австралия была первым обитаемым континентом, который был заселен *Homo sapiens* от 60 000 до 50 000 лет назад (по датированию находок). Древним людям потребовалось несколько десятков тысяч лет, чтобы добраться до Новой Гвинеи и Австралии. По пути *Homo sapiens* также встречал более ранние группы неандертальцев и денисовцев, в результате взаимодействия с этими группами также наблюдался поток генов: в Европе больше с неандертальцами, в Азии и Океании – с денисовцами (рис.2).

Миграция древних людей была ограничена окончанием ледникового периода, который начался около 120 000 лет назад и продолжался примерно до 15 000 лет, охватив ледниковые районы в северной Европе, Азии и Америке. Только после ледникового периода группа *Homo sapiens* отправилась в Америку из северной Сибири по сухопутному мосту (сегодня – Берингов пролив). Генетические данные также позволяют оценить численность исходных групп: это могло быть несколько сотен особей. За несколько тысяч лет сибирские *Homo sapiens* завоевали всю Америку и достигли Патагонии на юге Южной Америки, пройдя десятки тысяч километров вдоль побережья Тихого океана (внутренняя часть континента была заселена позже) [2-4].

Почему *Homo sapiens* сохранился до наших дней. На протяжении тысяч лет *Homo sapiens* на Ближнем Востоке, в Европе и Азии жили в контакте с неандертальцами и денисовцами, о чем свидетельствуют сегодняшние геномы человека. Около 70 000 лет назад более крупные группы *Homo sapiens* покинули Африку и за несколько десятков тысяч лет завоевали все континенты от Австралии до Америки. В этом процессе освоения мира около 30 тысяч лет назад исчезли все остальные группы *Homo* – до наших дней сохранились только *Homo sapiens*. Палеонтологи и археологи ищут ответ на этот вопрос, анализируя археологические находки и геномы человека.

Британский археолог Колин Ренфрю (Colin Renfrew, 1937) сформулировал концепцию когнитивной археологии в 1980-х годах. Когнитивная археология пытается сделать выводы о мышлении и когнитивных способностях древних людей из археологических находок ранних людей. Это были орудия труда (клин, каменные ножи, копья и др.), одежда, первобытные поселения и первые произведения искусства (скульптуры и наскальные рисунки) [2,5].

Профессор Робин Данбар (Robin Dunbar, 1947), руководитель Центра исследований социальной и эволюционной нейробиологии Оксфордского университета, в конце прошлого века изучал происхождение человеческого языка как коммуникативной «беседы» в больших социальных группах. Дальнейшие исследования Данбара проанализировали взаимосвязь между структурой мозга млекопитающих и размером группы, в которой они живут. С точки зрения структуры человеческого мозга это соответствует максимальному количеству 150 человек в группе. В науке это утверждение вошло как число Данбара (Dunbar number) [6]. По словам Данбара, это соответствует группам *Homo sapiens*, которые покинули Африку и завоевали все континенты. Социологи считают, что число Данбара применимо и к современному обществу [7].

Основываясь на этих идеях и на результатах археогенетики последних десятилетий, профессор Юваль Харари (Yuval Harari, 1976), историк из Иерусалимского университета, ввел концепцию когнитивной революции. Когнитивная революция была периодом, когда наши предки развили три новых способности: (1) активный язык, (2) обмен идеями и информацией и (3)

коллективные изобретения (нормы жизни, мифы, религия). Харари считает, что только когнитивная революция позволила *Homo sapiens* выжить до сегодняшнего дня в конкуренции с другими группами *Homo*. Не все свойства *Homo sapiens* были лучше, например мышечная сила была меньше, чем у вымерших неандертальцев или денисовцев. Началом когнитивной революции считается миграция *Homo sapiens* 70 000 лет назад [7].

Палеонтологи считают, что важную роль в эволюции *Homo sapiens* сыграла способность жить организованными группами, о чем свидетельствуют археологические находки поселений Сунгирь в окрестностях Владимира на берегу реки Клязьма. Эти находки с 1955 года изучал известный российский палеонтолог профессор Отто Николаевич Бадер (1903-1979). Находки включают инструменты, оружие, украшения, одежду и многое другое, возраст которых составляет 34000 лет. Среди находок в Сунгири также есть гробницы с богатыми украшениями из бивней мамонта и копьем из кости мамонта. Одежда древних людей была похожа на одежду современных эскимосов. Интересны отверстия в каменных предметах и в бивнях мамонта, а также заготовки с первоначальными следами сверления. Люди Сунгири были похожи на нас, о чем свидетельствует скульптурная реконструкция захоронения молодого человека известным антропологом и скульптором Михаилом Михайловичем Герасимовым (рис.4). Профессор Юваль Харари пишет о находках Сунгири: «Эти находки – одно из наиболее изученных свидетельств того, как *Homo sapiens* жил 34 000 лет назад. Они уже сформировали более крупные сообщества и имели нормы сообщества и жизни» [7].



Рисунок 4 – а - Скульптура из слоновой кости «Человек-Лев» возрастом 32000 лет. б - Скульптурная реконструкция похороненного молодого человека антропологом и скульптором Михаилом Михайловичем Герасимовым [1]

Профессор Сванте Паабо подробно анализирует исчезновение неандертальцев в своей монографии: «Они наши ближайшие родственники. Если мы хотим понять, что отличает нас как людей, мы можем только сравнивать себя с ними» [1]. Далее говорится: «Между ними и нашей историей есть фундаментальное различие: когда неандертальцы вымерли после почти 400 000 лет существования, их каменные орудия все еще выглядели так, как будто они находились в начале своего развития. Напротив, технологии и культура *Homo sapiens* буквально преобразовались за последние 100 000 лет». Сравнивая геном неандертальца с геномом современного человека, Сванте Паабо обнаружил, что ген FOXP2, который связан с речью и языком, отсутствует в геноме неандертальца. Из этого можно сделать вывод, что у неандертальцев был менее развитый язык, чем у *Homo sapiens*.

Эти различия также определили судьбу неандертальцев, и их генетические следы обнаруживаются только в геномах современного человека. Геном современных людей, от европейцев до американских индейцев, содержит от 2 до 4% генов неандертальцев, а геном азиатского населения содержит от 1 до 3% генов денисовцев. В некоторых регионах, таких как Новая Гвинея эта доля достигает 5% [1]. Анализ генов в последние годы также выявил небольшое присутствие неандертальских генов у африканцев, что указывает на миграцию *Homo sapiens* в обоих направлениях из Африки и обратно [1].

Заключение. Помимо эволюции *Homo sapiens*, профессор Юваль Харари также рассматривает проблемы современного мира [8]. В двадцать первом веке, несмотря на достижения науки, человечество сталкивается с тремя глобальными проблемами: 1) опасностями ядерной войны, 2) изменением климата и 3) негативными последствиями искусственного интеллекта. Каждая из этих проблем может привести к гибели человечества. Харари не предсказывает будущее человечества, но предупреждает: «Чтобы предотвратить катастрофу, нам необходимо глобальное сотрудничество. Ни одна из этих проблем не может быть решена одним народом» [8].

Список литературы

- 1 Svante Pääbo. Die Neandertaler und Wir. – Frankfurt: S. Fischer Verlag, 2014. – 382 Seiten
- 2 Марков А.В. Эволюция человека. Москва: АСТ, 2011. – (Кн. 1. Обезьяны, кости и гены. – 464 стр., Кн. 2. Обезьяны, нейроны и душа. – 512 стр.)
- 3 Уэллс С. Генетическая одиссея человека. – Москва: АНФ, 2016. – 292 с.
- 4 Уэйд Н. На заре человечества. Неизвестная история наших предков. – Москва: АНФ, 2019. – 540 с.
- 5 Colin Renfrew, Ezra B.W. Zubrow, The Ancient Mind. – Cambridge University Press, Cambridge, 1994. – 195 p.
- 6 Robin Dunbar. Grooming, Gossip and Evolution of Language. – Harvard University Press, 1998. – 242 pp.
- 7 Юваль Ной Харари. Sapiens. Краткая история человечества. – Москва: Синбад, 2017. – 520 с.
- 8 Юваль Ной Харари. 21 урок для XXI века. – Москва: Синбад, 2020. – 416 с.

К. Шварц¹, М. Сорокин²

¹GSI (Гельмгольц атындагы ауыр иондарды зерттеу орталыгы), Дармштат, Германия

²«Курчатов институты» Ұлттық зерттеу орталыгы, Москва, Ресей

Адам геномы – *Homo sapiens* эволюциясының кілті

Аңдатпа. Қазіргі адамның эволюциясы екі жарым миллион жыл бұрын *Homo erectus*-тен басталған. Бірнеше жүз мың жылдар бұрын неандертальдар, денисовандар және біздің заманымызға дейін сақталған *Homo sapiens* қазіргі адамдар *Homo erectus*-тен бөлініп шықты. Генетикалық зерттеулер және қазіргі адамның геномын неандертальдар мен денисовтардың геномымен салыстыру – *Homo*-ның күрделі тарихын ашып берді. Бұл зерттеулерге неандертальдықтар мен денисовтардың геномын ашқан Макс Планк қоғамының эволюциялық антропология институтының профессоры Сванте Паабо (Svante Pääbo) айтарлықтай үлес қосты. Қазіргі адамның геномын неандертальдар мен денисовтардың гендерімен салыстыру олардың популяция мөлшерін, ежелгі адамның әртүрлі топтарының қозғалу жолдары мен ұзақтығын, олардың өзара әрекеттесуі мен биологиялық будандасуын ашуға мүмкіндік берді. Еуразиядағы қазіргі адамдардан неандертальдық гендердің ізі, ал Азия мен Океанияда денисовтықтардың ізі байқалды. Антропологтардың зерттеулеріне сәйкес, *Homo sapiens*-тің өмір сүруі тілдің дамуы мен үлкен топтарға бірігіп, қарым-қатынас жасаумен байланысты және жетпіс мың жыл бұрын жүзеге асырылған когнитивтік революцияға негізделген.

Түйін сөздер: геном, археогенетика, *Homo sapiens*, неандертальдар, денисовандар, когнитивтік революция

K. Schwartz¹, M. Sorokin²¹GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany²National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia**The human genome reveals the evolution of *Homo sapiens***

Abstract. The evolution of modern humans began two and a half million years ago as *Homo erectus*. Several hundred thousand years ago, Neanderthals, Denisovans, and modern men *Homo sapiens* have been separated from the *Homo erectus* branch. Nevertheless, *Homo sapiens* is the only one that has survived to our days. The complex history of *Homo* is revealed by genetic research and comparison of the modern human genome with genes of Neanderthals and Denisovans. Svante Pääbo, a professor at the Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, made a significant contribution to these studies and decoded the genome of Neanderthals and Denisovans. Comparison of the genome of modern humans with the genes of Neanderthals and Denisovans made it possible to reveal the size of the population, the paths and times of migrations, interactions of various groups of ancient humans and their biological crossing. It was found that in Eurasia, modern man carries traces of Neanderthal genes, whereas in Asia and Oceania – Denisovan genes. According to anthropological research, the survival of *Homo sapiens* was driven by the cognitive revolution, which took place about seventy thousand years ago and included the development of language, communication and association in large groups.

Keywords: genome, archaeogenetics, *Homo sapiens*, Neanderthals, Denisovans, cognitive revolution

References

- 1 Svante Pääbo. Die Neandertaler und Wir (Frankfurt: S. Fischer Verlag, 2014, 382 p.).
- 2 Markov A.V. Evolyuciya cheloveka [Human evolution]. (AST, Moscow, 2011). (Book 1. Obez'yany, kosti i geny [Monkeys, bones and genes]. 464 p., Book 2. Obez'yany, nejrony i dusha [Monkeys, neurons and soul]. 512 p.)
- 3 Wells S. Geneticheskaya odissey cheloveka [Human genetic odyssey] (ANF, Moscow, 2016, 292 p.). [in Russian]
- 4 Wade N. Na zare chelovechestva. Neizvestnaya istoriya nashih predkov [At the Dawn of Humanity. The unknown history of our ancestors] (ANF, Moscow, 2019, 540 p.). [in Russian]
- 5 Colin Renfrew, Ezra B.W. Zubrow. The Ancient Mind (Cambridge University Press, Cambridge, 1994, 195 p.).
- 6 Dunbar R. Grooming, Gossip and Evolution of Language (Harvard University Press, 1998, 242 p.).
- 7 Harari Yu.N. Sapiens. Kratkaya istoriya chelovechestva [Sapiens. A Brief History of Humanity] (Moscow: Sinbad, 2017, 520 p.). [in Russian]
- 8 Harari Yu.N. 21 urok dlya XXI veka [21 Lessons for the 21st Century]. (Sinbad, Moscow, 2020, 416 p.).

Сведение об авторах:

Шварц К. – автор для корреспонденции, академик Латвийской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца), Дармштат, Германия.

Сорокин М. – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Schwartz K. – corresponding author, an academician of the Latvian Academy of Sciences, doctor of physical and mathematical sciences, professor of GSI (Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Darmstadt, Germany.

Sorokin M. – a candidate of physical and mathematical sciences. Senior Researcher at the National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia.