

Ткачев В.В. О юго-западных связях населения Южного Урала в эпоху ранней и средней бронзы // В кн.: Ткачев В.В. (отв. ред.). Проблемы изучения энеолита и бронзового века Южного Урала. Орск: Институт Евразийских исследований; Институт степи УрО РАН, 2000. С. 37–65.

Хохлов А.А., Китов Е.П. Специфика антропологического состава носителей потапово-синташтинских культурных традиций (по краниологическим материалам Поволжья и Урала переходного времени от средней к поздней бронзе) // Процесс культуругенеза начальной поры позднего бронзового века Волго-Уральского региона (вопросы хронологии, периодизации, историографии). Самара: Поволжская государственная социально-гуманитарная академия, 2014. С. 131–142.

Я.В. Кузьмин^{1,2}

¹ – ИГМ СО РАН, г. Новосибирск

² – ТГУ, г. Томск, kuzmin@fulbrightmail.org

Современные методы датирования в георхеологии: возможности и ограничения

В настоящее время в георхеологии применяется ряд способов определения возраста археологических объектов. Изложение принципов их работы можно найти в книге Я.В. Кузьмина [2017]. В данном обзоре основное внимание уделено возможностям и ограничениям, которые присущи наиболее часто используемым геохронологическим методам.

Что касается границ применения данных способов датирования, важно иметь представление о максимальном возрасте, который можно определить с их помощью. Наибольший возрастной предел имеют калий-аргоновый и аргон-аргоновый методы, и метод треков: он превышает 1–2 млн лет. К ним близки методы электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), урановых рядов и люминесцентные методы, однако нижняя граница их применения проходит на уровне не более 500–600 тыс. лет (для ЭПР – до 1–2 млн лет). Наиболее часто используемый метод четвертичной геохронологии – радиоуглеродный (¹⁴C) – имеет более узкие возрастные рамки, не превышающие 50–55 тыс. лет.

В плане возможностей ¹⁴C метода его основным преимуществом, по сравнению с другими способами датирования, является широкий набор объектов, к которым применим данный метод. Материалами для ¹⁴C датирования служат самые различные вещества: 1) древесный уголь и древесина (включая кольца деревьев); 2) прочие растительные остатки; 3) текстиль и другие плетеные изделия; 4) изделия из кожи (обувь и др.); 5) бумага, пергаменты, папирусы; 6) сажа и сажистые вещества (пигменты красок и др.); 7) кости и зубы животных и человека; 8) мягкие ткани и волосы животных и человека (в т.ч. остатки крови на каменных орудиях); 9) пыльца, споры и фитолиты растений; 10) хитиновые покровы насекомых; 11) раковины моллюсков; 12) органика и липиды (жирные кислоты) в керамике; 13) пищевой нагар на керамических сосудах; 14) смола и воск; 15) строительные растворы; 16) чугунные изделия и шлаки; 17) торф и сапропель; 18) неорганические карбонатные вещества (включая спелеотемы – сталактиты, сталагмиты, карбонатные корки); 19) почвенный гумус; 20) корки «пустынного загара».

В ¹⁴C методе присутствует ряд осложняющих факторов; наиболее распространенными из которых являются: 1) «эффект резервуара»; 2) собственный возраст образца (эффект «старого дерева»); 3) загрязнение атмосферы, гидросферы и биосферы Земли «бомбовым» ¹⁴C при испытаниях ядерного оружия в 1950–60-х гг.

«Эффект резервуара» состоит в том, что скорость попадания атомов ^{14}C из верхних слоев атмосферы в датируемые объекты неодинакова. Для организмов, получающих ^{14}C из атмосферы (т.е. сначала растения, а далее по трофическим цепям – наземные животные), время ассимиляции «нового» ^{14}C составляет несколько месяцев. Эта величина является пренебрежимо малой по сравнению с собственным возрастом объектов, составляющим сотни и тысячи лет. Однако уже для организмов, получающих ^{14}C из водной среды (в основном, моллюсков, рыб и млекопитающих, а также людей, поедающих этих животных), время попадания ^{14}C составляет как минимум несколько сотен лет [Ван дер Плихт и др., 2016]. Таким образом, период диффузии переносающего изотоп ^{14}C углекислого газа (CO_2) в водную среду существенно больше, чем в наземных обстановках. Например, собственный возраст раковин морских моллюсков, а также организмов более высоких трофических уровней (рыб и млекопитающих, особенно хищных) в Мировом океане составляет не менее 200–400 ^{14}C лет. Глубинные водные массы океанов обеднены изотопом ^{14}C в силу того, что обмен с поверхностными слоями воды происходит очень медленно – в течение сотен и первых тысяч лет. В результате в зонах апвеллинга (подъема глубинных океанических вод) расхождение между «кажущимся» (т.е. радиоуглеродным) и «истинным» (календарным) возрастaми морских организмов составляет до 1000 лет и более.

Еще более сложными и еще недостаточно изученными являются проявления «эффекта резервуара» в пресноводных и солоноватоводных бассейнах, где величина расхождения между «кажущимся» и «истинным» возрастaми может составлять до нескольких тысяч лет. К этому примыкает проблема интерпретации ^{14}C датирования по нагару на керамике [Fischer, Heinemeier, 2003]. В районах широкого распространения карбонатных горных пород (в основном, известняков и доломитов) CO_2 из атмосферы, растворенный в воде, будет неизбежно разбавляться углеродом из карбонатов, имеющих древний возраст и не содержащих изотопа ^{14}C . Потребление «смеси», состоящей из имеющего изотоп ^{14}C углерода и не содержащего такового, живыми существами, проживающими в озерах и реках (или питающимися ими другими организмами), приводит к значительному удревнению их ^{14}C возраста.

Собственный возраст образца в ряде случаев играет важную роль в интерпретации ^{14}C дат. Эффект «старого дерева» заключается в том, что в ряде регионов Земли произрастают долгоживущие виды деревьев и древовидных кустарников, и возраст внутренних частей таких объектов (для которых обмен углеродом с атмосферой прекратился, и их возраст существенно древнее, чем у внешних слоев дерева, обменивающихся ^{14}C с внешней средой) может составлять сотни и даже первые тысячи лет. Следует помнить, что с помощью ^{14}C метода можно лишь определить время, прошедшее со времени гибели объекта, а в древесной растительности рост и обмен изотопом ^{14}C с природной средой происходит только во внешних годичных кольцах. Если отобрать фрагмент долгоживущей древесины (или образец угля от сгоревшего бревна) из сердцевины ствола, то его ^{14}C дата будет отражать возраст, расходящийся с датой рубки или гибели дерева (им соответствует последнее, т.е. внешнее, годичное кольцо). В некоторых случаях, относящихся к историческому времени, при реконструкции зданий использовались бревна от предыдущих построек (особенно в регионах с ограниченными лесными ресурсами), и их ^{14}C возраст существенно отличается от даты по письменным источникам. Для России известно очень небольшое количество долгоживущих видов деревьев; тем не менее, данный фактор следует принимать во внимание. Для корректного датирования в таких случаях нужно использовать короткоживущие объекты – семена культурных и диких растений (возраст которых составляет, как правило, 1–2 года), а также тонкие веточки деревьев и кустарников, имеющие небольшой собственный возраст.

Еще одним фактором, ограничивающим возможности ^{14}C метода, является загрязнение природной среды «искусственным» изотопом ^{14}C . В 1950–60-х гг. в связи с испытаниями во-

дородных бомб в атмосфере произошло образование «лишнего» ^{14}C (в результате испускания в момент взрыва большого количества нейтронов [Кузьмин, 2017]). В результате изначальный фон активности ^{14}C был сильно нарушен – так, к 1965 г. содержание ^{14}C в атмосфере превысило его «добомбовое» (т.е. фоновое) значение почти в два раза по отношению к уровню 1950 г.

Другим аспектом ограничения возможностей ^{14}C метода является оценка тесноты связи между возрастом датируемого углерода и событием, время наступления которого необходимо определить. Чтобы установить эту связь, нужно четко представлять себе степень одновременности двух явлений – прекращения обмена углеродом между образцом и средой, с одной стороны; и культурным событием, которое подлежит датировке с помощью ^{14}C метода – с другой стороны. Это можно проиллюстрировать на примере ^{14}C датирования керамики. Первые попытки такого рода с использованием органического вещества в керамике как объекта датирования предпринимались в 1960–х гг. [Taylor, Berger, 1968], однако из-за потребности в большом количестве исходного материала работы не получили развития. С появлением технологии ускорительной масс-спектрометрии (УМС; англ. Accelerator Mass Spectrometry [AMS]) в 1970–80-х гг. исследования возобновились [Кузьмин, 2011]. Главный вопрос при определении ^{14}C возраста керамики: каково происхождение датируемого углерода, в состав которого входит изотоп ^{14}C ? Если он выделен из органического вещества (травы, навоза и т.п.), добавленного в керамическое тесто в момент изготовления сосуда, то возможно получить возраст времени внесения органики, который совпадает с созданием собственно керамики. Если же это некий «общий» углерод, который всегда есть в глиняном сырье, то его возраст, в первую очередь, относится к сырью, а не ко времени изготовления сосуда.

Нами была разработана методика выделения углерода из керамики с примесью травы и ее датирование на УМС установке [O'Malley et al., 1999]. Анализ полученных результатов показал, что при использовании окиси меди (CuO), для разложения которой требуется температура около $1000\text{ }^\circ\text{C}$, ^{14}C даты по керамике являются на несколько тысяч лет завышенными по сравнению с возрастом угля из этих же слоев. Когда в качестве окислителя выступает атомарный кислород, наилучшие результаты получаются при достаточно низкой температуре – около $400\text{ }^\circ\text{C}$. Видимо, при таком режиме из керамики прежде всего высвобождается углерод остатков травы, возраст которого и требуется определить.

Другая методика ^{14}C датирования керамики была разработана В.В. Скрипкиным и Н.Н. Ковалюхом [Zaitseva et al., 2009]: она основана на растворении керамического теста в плавиковой кислоте (HF) и датировке оставшегося углерода. Эта технология является методически ошибочной, поскольку остается неясным источник углеродсодержащего вещества, что не дает возможности однозначно ответить на принципиальный вопрос: «Какое событие характеризует ^{14}C дата: время образования глины или момент изготовления сосуда?». Очевидно, что глина может иметь весьма древний собственный возраст – до сотен тысяч и миллионов лет, и в этом случае ^{14}C дата покажет некий «средний» возраст глиняного сырья и, возможно, попавшей в керамическое тесто органики. Археологический смысл таких дат очень неясен [Ван дер Плихт и др., 2016].

Представляется, что с методической точки зрения ^{14}C даты, полученные по керамическому тесту [Выборнов и др., 2008; 2014], например, для керамики неолитических культур Поволжья без органической примеси [Васильева, 2013], недостоверны. Археологи должны иметь в виду, что многочисленные определения ^{14}C возраста, полученные по такой керамике, являются в значительной мере бесполезными. Ситуация осложняется наличием в глине, служившей сырьем для изготовления сосудов в Поволжье, примеси пресноводных моллюсков, что может дополнительно искажать ^{14}C возраст из-за «эффекта резервуара» [Ван дер Плихт и др., 2016].

В методах урановых рядов (торий-урановый [$^{230}\text{Th} - ^{234}\text{U}$] и протактиний-урановый [$^{231}\text{Pa} - ^{235}\text{U}$]) преимуществом перед ^{14}C датированием является более широкий возрастной диапазон – до 350–500 тыс. лет назад. Объектами изучения этими методами являются пещерные карбонаты, зубы и кости животных и человека.

Методы урановых рядов имеют ряд серьезных ограничений в их применении. Самое главное из них – датируемой системе (например, натёчной корке в пещере) надлежит оставаться «закрытой» после ее образования; иными словами, не должно происходить поступление дополнительного количества урана (чаще всего с грунтовыми водами) после образования датируемых отложений или выщелачивания урана из уже образовавшейся корки. Это ограничение часто не выполняется (или невозможно установить, что оно строго выполняется). Второе важное ограничение – в системе на момент ее формирования не должно быть тория (^{230}Th). Оно также иногда не выполняется, так как в пещерных карбонатах (сталактитах, сталагмитах и натечных корках) часто наблюдается загрязнение изотопом ^{230}Th , попавшим в датируемый материал в момент его образования вместе с микроскопическими частицами глины и пыли, которые адсорбируют радиоактивные вещества. Еще одним источником поступления тория могут быть фрагменты обломочных пород, попадающие с водным потоком в систему во время формирования карбонатных образований. В результате возраст объекта может быть омоложен на величину до 10 тыс. лет.

Для корректного применения торий-уранового метода необходимо также знание соотношения изотопов $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в момент образования объекта, чтобы в случае нарушения равновесного состояния ввести соответствующую поправку (это условие не касается протактиний-уранового метода). При определении возраста методами урановых рядов применяется две модели поступления урана: 1) ранний захват, т.е. поглощение урана вскоре после попадания костей и зубов в пещерные отложения; 2) линейный захват, т.е. постепенная адсорбция урана на всем протяжении нахождения материала в отложениях. В соответствии с ними определяется возраст объектов; разница между получаемыми значениями в зависимости от выбора модели может достигать тысяч и даже первых десятков тысяч лет.

Калий-аргоновый ($^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$) и аргон-аргоновый ($^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$) методы применяются в геархеологии при необходимости датировать вулканические породы – базальты, вулканические пеплы и туфы. Преимуществом этих методов является широкий диапазон определяемого возраста (до десятков миллионов лет и более), недостатком – ограниченный набор объектов датирования. Важнейшими условиями для использования калий-аргонового метода являются: 1) отсутствие утечки изотопа ^{40}Ar из исследуемой системы (в основном, из калийсодержащих минералов); 2) невозможность захвата при кристаллизации минералов изотопа ^{40}Ar , а также привноса и выноса K; 3) отсутствие в датируемых минералах изотопа ^{40}Ar , адсорбированного из воздуха. Нарушения «закрытости» минерала, в котором присутствуют измеряемые изотопы, происходят чаще всего при нагревании или выветривании вулканических пород; в таком случае получаемый калий-аргоновый возраст будет меньше, чем реальный.

Метод датирования по трекам спонтанного распада урана ^{235}U (синоним – «метод треков») также используется при определении возраста вулканических образований. К его преимуществам можно отнести достаточно широкий диапазон возраста (минимум 10–15 млн лет); главный недостаток – ограниченный набор объектов датирования. Среди ограничений данного метода наиболее важны: 1) способность треков к «залечиванию», т.е. исчезновению с течением времени при определенных условиях; 2) пропадание треков при нагревании минерала – т.н. «отжиг треков» (для вулканического стекла – начиная со $100\text{ }^\circ\text{C}$); 3) при датировании «молодых» объектов нужно, чтобы содержание урана в них было достаточно высоким.

В настоящее время в мировой геархеологии широко применяются люминесцентные методы, а также метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [Кузьмин, 2017]. Пре-

дел датирования люминесцентными методами достигает 250–300 тыс. лет (реже – до 300–500 тыс. лет); метода ЭПР – до 700–800 тыс. лет, а по зубной эмали – до 1–2 млн. лет. Для использования люминесцентных методов (термолюминесцентного (ТЛ) анализа и оптически-стимулированной люминесценции (ОСЛ)) наиболее пригодными являются объекты, содержащие включения зерен кварца и/или полевого шпата: 1) керамика (а также другие обожженные материалы); 2) рыхлые отложения; 3) вулканические пеплы. Что касается генетических типов четвертичных отложений, наиболее пригодных для люминесцентного датирования [Вагнер, 2006], то для ТЛ анализа это прежде всего лёссы, песчаные эоловые осадки, аллювий и склоновые (делювиальные) отложения. При их формировании, как правило, происходит достаточно длительная (десятки минут) экспозиция дневному свету светочувствительных зерен кварца или полевого шпата. При работах на пещерных объектах необходимо отдавать себе отчет в том, что с помощью люминесцентных методов можно датировать только тот материал, который испытал прямую экспозицию солнечному свету. Это осадки предвходовых частей пещер и гротов, а также эоловые отложения, попавшие в пещерные объекты [Walker, 2005]. Те осадки, которые не прошли воздействие прямым солнечным светом, например, находящиеся в глубине пещер, не могут быть датированы люминесцентными методами.

У люминесцентных методов датирования существует ряд методических требований, которые должны неукоснительно выполняться: 1) измеряемая при ТЛ-анализе светосумма должна быть однозначной функцией аккумулярованной дозы, и вид этой функции должен быть известен исследователю; 2) скорость запасания дозы также должна быть известна; 3) аккумулярованная доза в начальный момент должна быть равной нулю (так называемый «нуль-момент») или быть известной исследователю; 4) центры захвата должны сохранять электроны на всем протяжении периода действия метода. Однако на практике эти требования не всегда соблюдаются, что приводит к ошибкам и осложнениям в интерпретации результатов.

Принимая во внимание тот факт, что российские исследователи начинают активно применять люминесцентные методы датирования [Druzhinina et al., 2016], необходимо сделать ряд комментариев по уже известным случаям использования этих методов.

На стоянке Улалинка (Горный Алтай) в 1980-х гг. датирование ТЛ методом слоя, предположительно содержащего артефакты, показало возраст не менее 1.5 млн лет. Учитывая неопределенности с методикой датирования, применявшейся в данном случае, принять столь древнюю дату не представляется возможным.

В 1990-х гг. на стоянке Диринг-Юрях (Якутия) методом радиотермолюминесценции (РТЛ) из отложений, перекрывающих культурный горизонт, были получены даты более 1.1 млн лет назад и 2.9 ± 0.95 млн лет назад; из отложений ниже культурного горизонта – более 1.8 млн лет назад. В дальнейшем другими исследователями ТЛ методом был определен гораздо более молодой возраст этих же отложений: ниже культурного горизонта – 366 ± 32 тыс. лет; выше культурного горизонта – 267 ± 24 тыс. лет. Следует отметить, что прямой связи между местами отбора образцов на ТЛ датирование и положением культурного горизонта строго установлено не было. Таким образом, выход Диринг-Юряха за пределы 1 млн лет крайне маловероятен; наиболее достоверен возраст, не превышающий 250–300 тыс. лет, хотя окончательно вопрос о древности этого объекта остается нерешенным и сегодня.

В центральном зале Денисовой пещеры (Горный Алтай) в 1990-х гг. было проведено датирование осадков РТЛ методом; возраст пещерных отложений определен в интервале 282 ± 56 тыс. – 69 ± 17 тыс. лет назад. Однако из опубликованного плана памятника следует, что изучаемые отложения расположены в 11 м от входа в пещеру и не подвергались воздействию прямого солнечного света; они представляют собой остаточные глины, образовавшиеся в результате растворения палеозойского известняка (возраст – около 420–445 млн лет). Применимость РТЛ метода к пещерным осадкам Денисовой пещеры является весьма спорной.

В последние годы в восточной галерее Денисовой пещеры проведено опробование отложений на датирование методом post-infrared IRSL – одной из разновидностей люминесцентных методов. Результаты датировки опубликованы пока в предварительном виде [Козликин, 2017], что не дает возможности судить о степени их достоверности, но уже сейчас неясно, возможно ли использовать осадки пещерной галереи, испытавшие неоднократное переотложение за время их формирования, для люминесцентного датирования.

При датировании зубов животных и пещерных образований ЭПР методом важную роль играет выбор модели накопления урана, в зависимости от чего результаты датировки могут отличаться друг от друга в два раза и более; выходом из ситуации может быть параллельное датирование методом урановых рядов и сравнение результатов. Большое значение при ЭПР и люминесцентном датировании имеет определение влажности отложений, в которых находится дозиметр; погрешность в определении усредненной по времени захоронения объекта влажности вмещающих отложений может привести к ошибке в определении возраста в пределах от единиц до десятка процентов.

Таким образом, только путем выполнения условий применения каждого из методов четвертичной геохронологии на археологических объектах возможно получение надежных результатов.

Литература

- Вагнер Г.А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории. М.: Техносфера, 2006. 575 с.
- Ван дер Плихт Й., Шишлина Н.И., Зазовская Э.П. Радиоуглеродное датирование: хронология археологических культур и резервуарный эффект. М.: Палеограф, 2016. 112 с.
- Васильева И.Н. О выделении камского ареала гончарных традиций эпохи неолита // Археология, этнография и антропология Евразии. 2013. № 4 (56). С. 73–83.
- Выборнов А.А., Ковалюх Н.Н., Скрипкин В.В. К радиоуглеродной хронологии неолита Среднего Поволжья: западный регион // Российская археология. 2008. № 4. С. 64–71.
- Выборнов А.А., Мосин В.С., Епимахов А.В. Хронология уральского неолита // Археология, этнография и антропология Евразии. 2014. № 1 (57). С. 33–48.
- Козликин М.Б. Палеолитические комплексы восточной галереи Денисовой пещеры. Дисс. ... канд. историч. наук ... 07.00.06 – археология. Новосибирск: ИАЭТ СО РАН, 2017. 277 с.
- Кузьмин Я.В. Радиоуглеродный метод и его применение в современной науке // Вестник РАН. 2011. Т. 81. № 2. С. 127–133.
- Кузьмин Я.В. Геоархеология: естественнонаучные методы в археологических исследованиях. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2017. 395 с. (находится в свободном доступе: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000582914/SOURCE1?view=true>).
- Druzhinina O., Molodkov A., Bitinas A., Bregman E. The oldest evidence for human habitation in the Baltic Region: a preliminary report on the chronology and archaeological context of the Riadino-5 archaeological site // Geoarchaeology. 2016. Vol. 31. № 2. P. 156–164.
- Fischer A., Heinemeier J. Freshwater reservoir effect in ^{14}C dates of food residue on pottery // Radiocarbon. 2003. Vol. 45. № 3. P. 449–466.
- O'Malley J.M., Kuzmin Y.V., Burr G.S., Donahue D.J., Jull A.J.T. Direct radiocarbon AMS dating of the earliest pottery from the Russian Far East and Transbaikalia // Mémoires de la Société Préhistorique Française. 1999. Vol. 26. P. 19–24 [Supplément 1999 de la Revue d'Archéométrie].
- Taylor R.E., Berger R. Radiocarbon dating of the organic portion of ceramic and wattle-and-daub house construction materials of low carbon content // American Antiquity. 1968. Vol. 33. № 3. P. 363–366.
- Walker M. Quaternary Dating Methods. Chichester: John Wiley & Sons, 2005. 286 p.
- Zaitseva G., Skripkin V., Kovaliukh N., Possnert G., Dolukhanov P., Vybornov A. Radiocarbon dating of Neolithic pottery // Radiocarbon. 2009. Vol. 51. № 2. P. 795–801.