

ПАЛЕОЭКОЛОГИЯ

Э.П. Зазовская

Институт географии РАН
Старомонетный пер., 29, Москва, 119017
E-mail: zaszovsk@gmail.com

РАДИОУГЛЕРОДНОЕ ДАТИРОВАНИЕ — СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В АРХЕОЛОГИИ¹

Изложены базовые принципы радиоуглеродного датирования. Рассмотрены история развития метода и современное состояние. Обсуждаются сложности, возникающие при радиоуглеродном датировании, и подходы, позволяющие корректно представлять полученные результаты. Описана процедура калибровки радиоуглеродных данных и введения поправки на изотопное фракционирование. Освещена проблема эффекта морского и пресноводного резервуара при датировании археологических объектов. Даны подробные рекомендации для отбора образцов при радиоуглеродном датировании. Показаны особенности датирования и интерпретации полученных данных для основных углеродосодержащих материалов, применяющихся при датировании археологических объектов.

Ключевые слова: радиоуглеродное датирование, археология, датирующие фракции, эффект резервуара, ускорительная масс-спектрометрия.

DOI: 10.20874/2071-0437-2016-32-1-151-164

Введение

Радиоуглеродный анализ, бесспорно, занимает ведущее место среди инструментальных методов датирования, используемых в палеогеографии и археологии. Разрешающая способность метода составляет около 70 000 лет [Taylor, Southon, 2007], однако на практике, для рутинных исследованиях возраста, предел измерений в настоящее время — 50 000–55 000 лет. Метод был разработан группой американских ученых во главе с У. Либби [Libby, 1952]. В 1960 г. за это открытие ему была вручена Нобелевская премия по химии. Внедрение в практику археологии радиоуглеродного датирования произвело настоящую революцию в мышлении исследователей, которая продолжается до сих пор [Renfrew, 1999]. «Правильные» и «неправильные» радиоуглеродные даты и возможность их применения при построении археологических хронологий обсуждаются на всех конференциях, где речь заходит о времени существования культур и отдельных памятников археологии. Несомненным преимуществом радиоуглеродного метода является независимость физических измерений времени от любых экспертных исторических и археологических оценок.

Принцип радиоуглеродного датирования

В природе углерод встречается в трех видах (называемых изотопами) с разными массами — 12, 13, 14. Изотопы с массами 12, 13 являются стабильными. Изотоп с массой 14 — радиоактивный и имеет период полураспада, равный 5730 ± 40 лет [Godwin, 1962]. Образование радиоуглерода (радиоактивного изотопа углерода — ^{14}C) в атмосфере Земли происходит под действием космических лучей из атомов азота. Окисляясь до $^{14}\text{CO}_2$, он участвует в глобальном углеродном цикле как компонент CO_2 . Благодаря фотосинтезу молекулы $^{14}\text{CO}_2$ попадают в ткань растений. В растущих зеленых растениях уровень ^{14}C остается достаточно стабильным из-за его непрерывного поступления из атмосферы и постоянного распада. Обмен радиоуглерода с окружающей средой прекращается после смерти объекта (или выхода его из обменных процессов — например, погребение почв или седиментов искусственными/или естественными насыпями), после чего ^{14}C подвергается радиоактивному распаду — активность ^{14}C (количество) в

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-06-12003 офи_м.

таким образом уменьшается по закону радиоактивного распада. Таким образом, возраст исследуемого объекта, содержащего углерод, может быть определен путем измерения количества оставшегося ^{14}C в образце с учетом известной активности живого образца.

Основные допущения метода

В радиоуглеродном датировании принимается, что содержание ^{14}C в природе сегодня такое же, как и в прошлом (в то время, когда существовал древний человек), т.е. что оно постоянно во времени, не зависит от географического положения и каких-либо других факторов. Однако уже на заре радиоуглеродного метода было замечено некоторое несоответствие полученных радиоуглеродных дат известным археологическим датам, например, артефактов египетского Древнего царства [Libby, 1952]. Более поздними исследованиями было показано, что, поскольку радиоуглерод образуется в земной атмосфере под действием космических лучей, интенсивность которых меняется во времени, существуют вариации содержания ^{14}C в обменном резервуаре Земли (рис. 1) и радиоуглеродный возраст датируемого материала может оказаться не эквивалентным календарному возрасту.

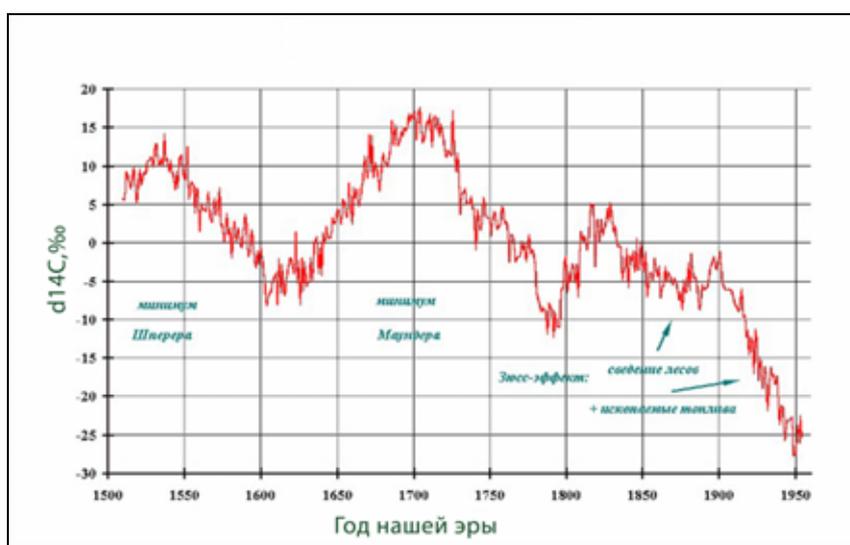


Рис. 1. Вариации содержания радиоуглерода в атмосфере по кольцам деревьев за последние 400 лет (по: [Stuiver et al., 1993]).

Естественный уровень концентрации ^{14}C в атмосфере был нарушен и в результате антропогенного воздействия. Со второй половины прошлого века имеет место понижение уровня за счет сжигания ископаемого топлива, не содержащего ^{14}C (т.е. содержание ^{14}C в атмосфере и соответственно во всех организмах как бы разбавляется), — эффект Зюсса; с конца 1950-х гг. началось резкое увеличение уровня ^{14}C в земной атмосфере в результате наземных испытаний атомного оружия (рис. 2).

Из вышесказанного очевидно, что необходима процедура, которая переводит полученный радиоуглеродный возраст в календарный (или астрономический). Такой процедурой стала калибровка радиоуглеродных данных, основанная на использовании образцов, параллельно продатированных радиоуглеродным и другим независимым методом. Последний должен быть реальным методом абсолютного датирования. Таким является дендрохронологический метод. В настоящее время калибровочная кривая, основанная на дендрохронологических данных, укладывается в хронологический отрезок 13 900 лет [Reimer et al., 2013]. Часть калибровочной кривой, составленная на основе анализа древесины, достоверна для образцов наземного и атмосферного происхождения. Для радиоуглеродной временной шкалы за пределами возможностей дендрохронологии калибровочные кривые были построены на основе датирования по урановым рядам (с использованием изотопов урана) и по содержанию радиоуглерода в образцах морского происхождения — кораллов и раковин фораминифер.

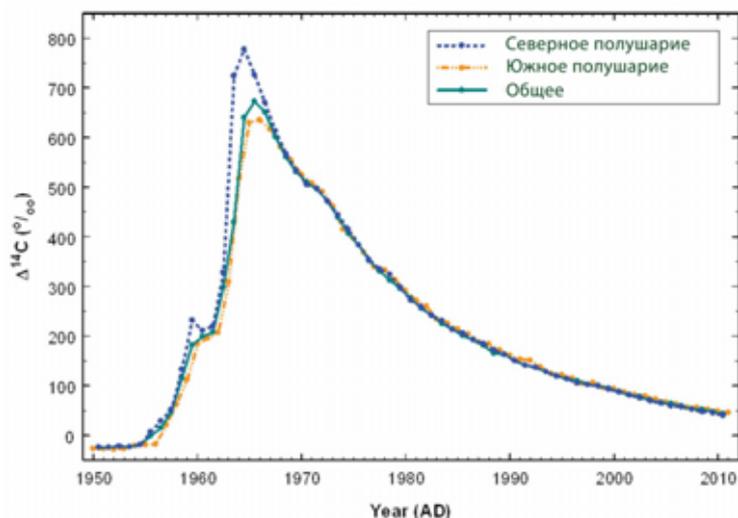


Рис. 2. Изменение концентрации радиоуглерода в атмосфере в результате испытаний атомного оружия (по: [Hua Quan et al., 2013]).

Калибровочная кривая Intcal09 — первая калибровочная кривая, которая охватывает диапазон измеряемого радиоуглеродного возраста до 50 000 лет. Часть кривой за пределами дендрохронологии является морской и корректируется с учетом резервуарного эффекта (см. далее). В настоящее время опубликована калибровочная кривая, созданная на основе датирования образцов наземного происхождения — слоистых глин из оз. Сугетцу, Япония [Bronk Ramsey, 2012]. Эти данные использованы при построении последней обновленной калибровочной кривой Intcal13 [Reimer et al., 2013], используемой при калибровке радиоуглеродных данных. Калибровка радиоуглеродных данных — стандартная процедура; при публикации дат необходимо указывать, калиброванные они или нет. Необходимо понимать, что при оперировании в интерпретациях календарными интервалами (т.е. реальным временем) следует использовать только калиброванные данные. Калибровка полученных дат проводится с помощью специальных программ, которые находятся в открытом доступе в Интернете. Наиболее распространенные калибровочные программы: CALIB — Университет Белфаста (<http://calib.qub.ac.uk/calib/>), OxCal — Оксфордский университет (<https://c14.arch.ox.ac.uk/login/login.php?Location=oxcal/OxCal.html>), CalPal — Университет Келна (<http://www.calpal-online.de>). Все эти программы используют одни и те же калибровочные кривые, которые разрабатываются совместно всем радиоуглеродным сообществом. Отличаются эти программы только интерфейсом, набором статистических и графических возможностей.

Еще один фактор осложняющий радиоуглеродное датирование,— эффект изотопного фракционирования. Фракционирование — процессы, изменяющие массу изотопов и их относительное содержание в образце. Радиоуглеродное датирование предполагает измерение в образцах концентрации радиоактивного изотопа ¹⁴C. Но за счет изотопного фракционирования в природе и/или в лаборатории содержание ¹⁴C в исследуемом образце может меняться. Как уже говорилось, кроме радиоактивного изотопа, углерод встречается в виде двух стабильных изотопов ¹²C и ¹³C, различающихся по массе и имеющих среднее относительное содержание 98,9 и 1,1 % соответственно. Химические реакции и процессы в живых организмах идут с разными скоростями, что нарушает естественное соотношение изотопов, т.е. происходит фракционирование. Это может быть вызвано биологическими (например, фотосинтез или потребление пищи), химическими (например, химические реакции), физическими (испарение) или техническими (при измерениях) причинами. Содержание стабильных изотопов можно измерить в образце с помощью изотопных масс-спектрометров. Относительное содержание изотопа ¹³C (соотношение ¹³C/¹²C в образце к их отношению в стандарте) выражается величиной δ («дельта») и измеряется в промилле (‰).

Фракционирование лучше всего продемонстрировать на примере процесса фотосинтеза в растениях. Атмосферный CO₂ имеет значение δ¹³C около -7 ‰. При поступлении CO₂ в процессе фотосинтеза растения усваивают преимущественно более легкий изотоп ¹²C, и изотопный

состав углерода в растениях оказывается легче, чем в атмосфере, т.е. соотношение изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в растениях меньше, чем в атмосфере. Для растений группы С3, представляющих 95 % биомассы Земли, $\delta^{13}\text{C}$ составляет около -25 ‰. Растения группы С4 (растения преимущественно аридных условий) имеют среднюю величину $\delta^{13}\text{C} = -12,6$ ‰. При этом наблюдается соответственно и уменьшение содержания еще более тяжелого изотопа ^{14}C . Так как разница в массе между ^{12}C и ^{13}C составляет одну единицу, а между ^{12}C и ^{14}C — две единицы, то фракционирование ^{14}C относительно ^{12}C примерно в два раза больше, чем ^{13}C относительно ^{12}C . Исходя из этого $\delta^{14}\text{C} = 2 \delta^{13}\text{C}$.

Таким образом, содержание ^{14}C в образце (которое мы измеряем для определения возраста) зависит как от возраста образца (количество ^{14}C уменьшается во времени по закону радиоактивного распада), так и от эффекта фракционирования, а содержание стабильного изотопа ^{13}C зависит только от фракционирования, так как он не подвержен радиоактивному распаду и его концентрация в образце остается неизменной. Из-за изотопного фракционирования радиоуглеродный возраст образцов с одним и тем же календарным возрастом, но с различными значениями $\delta^{13}\text{C}$ будет отличаться, поэтому вводится поправка на изотопное фракционирование. Для этого необходимо в датированном образце измерить $\delta^{13}\text{C}$. Стандартная величина фракционирования для ^{14}C , по которой рассчитывается радиоуглеродная дата, определяется исходя из значения -25 ‰. В соответствии с международными соглашениями (смотри далее) если величина $\delta^{13}\text{C}$ в образце отличается от -25 ‰, необходимо вводить в дату поправку на изотопное фракционирование. Разница в 1 ‰ дает разницу в радиоуглеродном возрасте около 16 радиоуглеродных лет. Например, для растений группы С4 с $\delta^{13}\text{C} = -12,6$ ‰ разница в 12,4 ‰ дает разницу в радиоуглеродном возрасте 198 лет ($12,4 \text{ ‰} \times 16 = 198$), если не вводить поправку на изотопное фракционирование. С увеличением $\delta^{13}\text{C}$ в образце по сравнению с -25 ‰ радиоуглеродный возраст уменьшается, т.е. происходит омоложение.

Следует помнить, что все даты, полученные с помощью ускорительной масс-спектрометрии (AMS), уже имеют поправку на изотопное фракционирование, так как ускорительные масс-спектрометры могут одновременно измерять в одном образце ^{12}C , ^{13}C и ^{14}C . Даты, полученные в радиометрических лабораториях, рассчитаны исходя из стандартного значения $\delta^{13}\text{C} = -25$ ‰ (это компонент конвенционального радиоуглеродного возраста), для введения поправки на изотопное фракционирование необходимо осуществлять дополнительные измерения соотношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ в образце на масс-спектрометре и вводить поправку при расчете даты или калибровке радиоуглеродных данных. При подаче материала необходимо отмечать, что дата имеет поправку на изотопное фракционирование. Таким образом, если мы сравниваем дату, полученную в AMS лаборатории, с датой, полученной в радиометрической лаборатории (если, например, речь идет об образцах из одного археологического контекста и одного углеродосодержащего материала), то для корректного сравнения нужно знать, была ли введена в радиометрическую дату поправка на изотопное фракционирование.

Для того чтобы избежать разночтений в представлении радиоуглеродных данных, существуют международные соглашения, на которых базируется радиоуглеродное датирование, которые до сих пор принимают все радиоуглеродные лаборатории мира [Mook, Streurman, 1983]:

1. Предполагается, что вещество, подлежащее датированию, находилось в изотопном равновесии с CO_2 современной ему атмосферы.
2. Концентрация ^{14}C в атмосфере постоянна.
3. Используется оригинальный («Либби») период полураспада, соответствующий 5568 годам.
4. Поправка на изотопное фракционирование вводится путем измерения $\delta^{13}\text{C}$ образца и приводится к стандартному значению -25 ‰.
5. Даты отсчитываются от 1950 г. н.э., что выражается отметкой BP — в годах от настоящего времени (лет назад).
6. Концентрация ^{14}C в атмосфере в 1950 г. определяется относительно первичного стандарта (щавелевой кислоты).

Возраст образца, рассчитанный таким образом, называется конвенциональный (договорной) ^{14}C -возраст и выражается в годах от настоящего времени — лет назад, BP (отсчитанных назад от 1950 г.).

Несколько пояснений к соглашениям. Изначально У. Либби был определен период полураспада радиоуглерода 5568, позднее он был уточнен — 5730 ± 40 лет [Godwin, 1962]. Тем не

менее при расчете радиоуглеродного возраста используется «период полураспада Либби». Такое соглашение было принято, чтобы избежать путаницы и сохранить возможность сравнения новых измерений ^{14}C возраста с полученными ранее данными. Разница между реальным периодом полураспада и периодом полураспада Либби составляет 3 % и учитывается при калибровке радиоуглеродных данных калибровочной программой. ^{14}C возраст обозначается BP (before present), что означает — столько-то лет назад, но дата отсчитывается не от сегодняшнего дня, а от 1950 г. Это тоже может легко создать путаницу, поэтому важно использовать отметку BP только в оговоренном смысле (от 1950 г.). Для нас, жителей XXI в., уже не очень удобно отсчитывать даты от 1950 г., и, возможно, в ближайшем будущем радиоуглеродное сообщество пересмотрит форму представления данных.

Резервуарный эффект

Все приведенные выше соглашения относятся к материалам наземного происхождения, которые находятся в равновесии с атмосферным $^{14}\text{CO}_2$. Однако существуют экосистемы, в которых такое равновесие отсутствует. В таких экосистемах может наблюдаться резервуарный эффект — непредвиденный возраст датироваемых материалов, вызванный отсутствием равновесия с атмосферным $^{14}\text{CO}_2$. В настоящее время выделяют два основных резервуарных эффекта: морской и пресноводный (речной/озерный). В океанической воде за счет разных скоростей обмена углеродом между атмосферой и глубинными и поверхностными слоями воды активность ^{14}C на глубине значительно ниже. В результате подъема воды с глубины поверхностный слой воды имеет активность значительно ниже, чем она могла быть, если бы существовало равновесие CO_2 с атмосферой (на 5 %) [Lanting, van der Plicht, 1998]. Такая разница в 5 % эквивалентна 400 ^{14}C годам. Значение поправки на резервуарный эффект для морских образцов в 400 лет определено разницей датировок синхронных водных и наземных образцов и является поправкой на морской резервуарный эффект. В первоначальных исследованиях при датировании образцов морского происхождения (кости морских млекопитающих, рыбы, раковины, морские растения и т.п.) от радиоуглеродной даты отнимали 400 лет и получали, как считалось, реальную дату образца [Berger et al., 1966; Lanting, van der Plicht, 1998]. Однако детальные исследования показали, что существуют региональные тренды и, как следствие, дополнительные региональные поправки [Olsen et al., 2013]. База данных морских резервуарных эффектов для разных районов мирового океана «CHRONO Marine Reservoir Database» находится в открытом доступе в Интернете, постоянно пополняется и обновляется [<http://calib.qub.ac.uk/marine/>].

В случае пресной воды резервуарный эффект может присутствовать не во всех речных (озерных) системах. Для его идентификации необходимы дополнительные исследования. Однако если морские или речные организмы (рыбы, раковины, кораллы и т.п.) происходят из системы, где резервуарный эффект есть, то он закономерно проявляется у животных и людей, в системе питания которых (частично или полностью) присутствуют компоненты пресноводного/морского происхождения. При радиоуглеродном датировании таких образцов (костей человека или животного) получается «мнимый радиоуглеродный возраст», отличающийся от возраста синхронных наземных образцов, не подверженных резервуарному эффекту. Классической работой, демонстрирующей морской резервуарный эффект, является датирование морских млекопитающих (моржей, китов и белых медведей из Гренландии) с известным временем гибели [Tauber, 1979]. Эта серия включает также кости двух людей из археологических раскопок с предполагаемым календарным возрастом (табл. 1).

Как видно из табл. 1, все исследуемые образцы имеют мнимый возраст около 400 лет, что согласуется с резервуарным эффектом, установленным для северной Атлантики. Резервуарный эффект показывают и даты, полученные по костям эскимосов, в системе питания которых присутствовали продукты морского происхождения. Наличие в диете исследуемых людей морских компонентов подтверждается данными стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) для коллагена их костей (об идентификации диеты человека с помощью стабильных изотопов можно узнать в специальной литературе, напр.: [Kohn, 1999; Fischer et al., 2007]). Позднее влияние морского резервуарного эффекта на радиоуглеродный возраст, полученный по коллагену костей человека, использующего в своей диете продукты морского происхождения, было подтверждено многочисленными работами (напр.: [Arneborg et al., 1999; Савинецкий, Хасанов, 2004]).

**Радиоуглеродный возраст морских млекопитающих и эскимосов
с известной датой гибели (по: [Tauber, 1979])**

Лабораторный номер	Образец	Время гибели (AD)	¹⁴ C возраст (BP)	δ ¹³ C (‰)
K-346	Тюлень	1886	480±50	-16,1
K-347	Морж	1915	590±50	-10,5
K-348	Белый медведь	1932	430±50	-14,5
K-349	Кит	1931	450±50	-17,2
K-350	Эскимос	1750±50	570±65	-13,0
K-351	Эскимос	1750±50	560±60	-12,6

Образцы речного и озерного происхождения (кости и мясо рыб, карбонат раковин и мясо пресноводных моллюсков) могут показывать резервуарный эффект часто значительно больше, чем эффект морского резервуара. Не будем останавливаться на механизмах возникновения этого эффекта, а приведем примеры, его демонстрирующие. Серия дат, полученная по образцам современных (выловленных в настоящее время) пресноводных рыб из каналов Нидерландов, показала, что поправка на резервуарный эффект варьируется от 400 до 4000 лет [Lanting, van der Plicht, 1998]. Резервуарный эффект, зафиксированный для р. Рейн в Западной Европе, составляет 1200 лет [ibid.]. Для рыб, выловленных в оз. Деер-Хулсун (Северо-Западный Прикаспий) в 2004–2005 гг., был показан резервуарный эффект 500 лет [Ван дер Плихт и др., 2007]. Употребление человеком в пищу рыбы (из водоема, где резервуарный эффект присутствует), как морской, так и пресноводной, вызывает обеднение ¹⁴C коллагена его костей, т.е. в организм человека попадает углерод, в котором ¹⁴C меньше, и он «разбавляет» углерод, в котором концентрация ¹⁴C равновесна с концентрацией углерода в атмосфере. При датировании таких костей человека обнаруживается эффект резервуара, т.е. мы получаем даты древнее, чем они могли быть в реальности.

В классической работе Я. Лантингена и Х. ван дер Плихта [Lanting, van der Plicht, 1998] были продатированы кости средневековых голландских дворян и святых с известной датой смерти (написанной на надгробиях). Практически у всех был обнаружен эффект резервуара, особенно у представителей дворянства, живших в XI–XIII вв., где он достигает 400 лет. Еще один наглядный пример выявления эффекта резервуара приведен в работах Г. Кука и К. Бонсала с соавт. [Cook et al., 2001, 2002; Bonsall et al., 2004], посвященных изучению мезолитического населения, проживавшего по берегам Дуная. Было выявлено, что многочисленные даты, полученные по костям человека, древнее, чем даты, полученные по углям, и противоречат стратиграфии изученных памятников. Одним из предположений, объясняющим такое противоречие, стало влияние резервуарного эффекта. Оно было подтверждено парным датированием фрагментов кости человека и застрявшего в скелете наконечника стрелы, изготовленного из кости оленя (поселение Липинский Вир). Полученная по наконечнику стрелы радиоуглеродная дата — 7800 л.н. соответствует датам по углю и предложенным хронологическим рамкам бытования археологического памятника. Дата по кости человека — 8300 л.н., т.е. она древнее костяного наконечника на 500 радиоуглеродных лет. Анализ стабильных изотопов углерода и азота (¹³C и ¹⁵N) показал, что структура питания исследуемого индивида на 80 % состояла из рыбы, что и явилось источником удреждения костей человека [Cook et al., 2001].

В настоящее время в практике радиоуглеродных исследований накоплен огромный фактический материал о влиянии пресноводного резервуарного эффекта на радиоуглеродный возраст, полученный по коллагену костей человека, в том числе в практике российской археологии (напр.: [Fernandes et al., 2012; Higham et al., 2010; Lillie et al., 2009; Shishlina et al., 2007, 2012, 2014; Wood et al., 2013]).

Отбор образцов для радиоуглеродного датирования

Получение надежных и «правильных» радиоуглеродных дат во многом зависит от отбора образцов и сохранности материала, предназначенного для радиоуглеродного датирования. Отбор образцов не сложен и при соблюдении простых рекомендаций может быть выполнен даже неспециалистом. Образцы должны быть репрезентативными для датирования — не переотложенными и отражающими реальный возраст изучаемого объекта (слоя). При отборе образцов важно понимать, что именно (какое археологическое событие) вы хотите продатировать, какое происхождение могут иметь образцы. Не стоит руководствоваться только наличием образца,

Радиоуглеродное датирование — современное состояние, проблемы, перспективы развития...

что безусловно в некоторых случаях уже бывает удачей. Отбирая образцы для радиоуглеродного датирования, нужно придерживаться следующих рекомендаций:

— предпочтительно из одного археологического контекста датировать парные образцы разных углеродосодержащих материалов, например: кость человека — древесина, кость человека — уголь, кость человека — кость животного и т.п.;

— необходимо отбирать серии образцов, при большом количестве проб можно будет выбрать оптимальные по всем параметрам объекты для датирования;

— если образцы планируется подвергать дополнительным (кроме радиоуглеродного) исследованиям, то оптимально пробы для всех анализов брать от одного образца. Например, если планируется проводить исследования изотопного состава коллагена костей, то образец необходимо отделить именно от той кости, которая отправляется на датирование;

— отобранные для радиоуглеродного датирования образцы не подвергаются никакой предварительной обработке (мытьё, отбор корешков, чистка, размалывание и т.п.). Все процедуры обработки образцов происходят в лаборатории при контроле специалистов и с исполнением соответствующих протоколов исследования;

— образцы отбираются в герметичную пластиковую тару: пакеты, контейнеры (можно использовать стекло) — и хранятся в прохладных и темных условиях (по возможности в холодильнике);

— при отборе микрообразцов для датирования с помощью AMS рекомендуется отбирать образцы с использованием стерильных перчаток и в стерильную упаковку;

— каждый образец должен иметь этикетку с информацией о нем. Нельзя класть этикетки внутрь пакетов или контейнеров. Желательно, чтобы образец имел двойную упаковку и этикетка дублировалась;

— для влажных образцов, если их транспортировка в лабораторию происходит не сразу и нет возможности хранения отобранных образцов в холодильнике, возможна сушка. Сушку проводят в тени (без воздействия прямых солнечных лучей), образцы прикрывают крафтовой бумагой и тщательно следят, чтобы в них не попали посторонние примеси. Обычно сушке подвергаются образцы костей, древесина, уголь. Образцы почв, седиментов (торфа, гиттии, органические остатки и т.п.) сушить не надо. Они отбираются в герметичную упаковку и хранятся в прохладных условиях;

— образцы, отобранные в условиях мерзлоты, предпочтительнее доставить в лабораторию в замороженном виде;

— вес образца зависит от его сохранности (степени загрязнения, содержания в нем органического углерода и т.д.). Ориентировочные веса для разных углеродосодержащих материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ориентировочный вес образца для радиоуглеродного датирования

Датируемый материал	Вес образца, необходимый для датирования в AMS лаборатории	Вес образца, необходимый для датирования в радиометрической лаборатории, г
Кость	2–10 г	От 200
Уголь	10–50 мг	От 20
Древесина	20–50 мг	От 50
Органические седименты (включая почвы)	2–10 г	От 200
Торф, гиттии	1–2 г	50–100
Фитолиты (выделенные)	300 мг	Не датируются
Растительные остатки и семена	10–20 мг	От 20
Пыльца (выделенная)	20 мг	Не датируется
Керамика (нагар)	15–50 мг	Не датируется
Раковины, кораллы, CaCO ₃	20–50 мг	От 50
Текстиль	50–100 мг	Не датируется
Экскременты	50–100 мг	От 20
Волосы	20–50 мг	От 20

В каждом конкретном случае и при датировании в разных лабораториях возможны уточнение и корректировка веса.

Этапы радиоуглеродного датирования

После поступления в лабораторию образцы подвергаются химической обработке: выделяется датирующая фракция (например, коллаген из кости) и, что не менее важно, удаляется посторонний, загрязняющий образец углерод. Все методы, применяемые для этого в мировых и отечественных лабораториях, условно можно разделить на две группы: стандартизированные и применяемые в разных модификациях в лабораториях и авторские специальные методики для разных материалов, например — тонкая очистка сильнозагрязненных образцов, выделение датирующих фракций: почвы — отдельные пулы органического углерода, негидролизующий остаток органического вещества (ОВ), гуминовые кислоты (ГК); микрофилтрация коллагена, отдельные аминокислоты из коллагена для АМС-датирования, обработка древесины для датирования отдельных древесных колец и т.д. [Чичагова, Зазовская, 2004; Bronk, 2008; Brock et al., 2010, 2013; Staff et al., 2014].

Существует два типа радиоуглеродных лабораторий — использующие сцинтилляционные счетчики активности радиоуглерода и ускорительную масс-спектрометрию (AMS). В лабораториях первого типа после химической обработки образца и выделения датирующей фракции углерод образца переводят в счетное вещество. При использовании жидкостных сцинтилляционных счетчиков счетным веществом чаще всего является бензол (C_6H_6) из-за высокого содержания в его молекуле углерода (92 %) и хороших сцинтилляционных свойств. В полученном бензоле на альфа-бета-спектрометре измеряют активность радиоуглерода в образце, стандарте и фоновом образце и по полученным данным рассчитывают радиоуглеродный возраст. При использовании ускорительной масс-спектрометрии из полученных препаратов получают графит, прессуют его в специальные мишени, которые используются для подсчета количества изотопов ^{14}C на ускорителе. Оба метода дают высокую сходимость и воспроизводимость результатов. Основным принципиальным отличием для пользователя является масса образца, необходимая для анализа (табл. 2). Как было отмечено выше, следует помнить, что даты, полученные с помощью AMS, уже имеют поправку на изотопное фракционирование; даты, полученные с помощью сцинтилляционного метода, нуждаются во введении такой поправки. Появление ускорительной масс-спектрометрии произвело настоящую революцию в радиоуглеродном датировании. Стало возможным проводить датирование не только маленьких (в доли миллиграммов) образцов, но и совершенно новых для датирования материалов — отдельных аминокислот, липидов из остатков пищи, включений в керамическом тесте и самой керамики, углерода в железных артефактах, углероднеспецифических органических соединений. В археологических исследованиях возможность датирования микрообразцов позволила получить даты для ценных артефактов, от которых просто невозможно взять образец большой массы, так как они являются объектами культурного наследия, например текстиля, икон, старинных книг и т.п. Стало возможным датировать такие палеоэкологические объекты, как отдельные пыльцевые зерна, фитолиты, микроорганизмы, что позволяет детализировать палеоэкологические реконструкции на археологических объектах.

Сегодня в мире имеется более 50 AMS лабораторий. В нашей стране такой полноценно работающей лаборатории нет. В Новосибирске на базе ЦКП «Геохронология кайнозоя» с 2007 г. создается первая в России радиоуглеродная AMS лаборатория. Получены первые даты, идут работы по усовершенствованию стабильности измерений [Rastigeev et al., 2010; Марченко и др., 2013]. В 2015 г. в радиоуглеродной лаборатории Института географии РАН введен в эксплуатацию уникальный комплекс оборудования для графитизации углерода и производства мишеней для AMS-датирования. Графитизатор AGE-3 в комплексе с элементным анализатором VarioIsotope собран в Швейцарском техническом университете (ETH) и может производить до 21 образца графита в сутки и соответственно мишеней с графитом для измерения радиоуглеродного возраста [Чичагова, Зазовская, 2015]. Проведено сверточное датирование стандартов и образцов известного возраста, получены первые радиоуглеродные даты из полученных на установке графитов. Измерения возраста проводятся на ускорительном масс-спектрометре в Центре геохронологических исследований Университета Джорджии (США). В настоящее время налажено массовое производство графита из микрообразцов (полученные результаты измерений имеют двойной индекс: $IGAN_{AMS}-UGANS$). Также проводятся измерения на ускорительном масс-спектрометре в Новосибирске. Ускорительная техника совершенствуется, повышаются точность счета и пользовательские характеристики. Если в начале ускоритель представлял собой огромную машину длиной десятки метров, занимающую ангар, и требовал большого количества техниче-

ского персонала, то сейчас во многих лабораториях мира уже активно используется компактная MICADAS — Mini Carbon Dating System, созданная в Швейцарском технологическом университете (ETH). Эта машина занимает площадь от 10 м² и не требует многочисленного обслуживающего персонала. Внедрение такой техники в практику радиоуглеродных исследований позволяет надеяться, что и в России в ближайшем будущем появятся современные AMS лаборатории.

Специфика датирования разных материалов в археологии

При определении возраста собственно археологических объектов предпочтение отдается таким традиционным углеродосодержащим материалам, которые могут наиболее точно отражать возраст исследуемых объектов: уголь, древесина, кость.

Кости человека и животного остаются наиболее широко используемым материалом для датирования археологических культур. Это легко объяснимо, так как именно кость из погребения может однозначно сопоставляться с изучаемым событием. Кость является хорошим материалом и с точки зрения выделения «датирующей фракции» и очистки ее от загрязняющих примесей. Методики выделения коллагена, основной «датирующей фракции», применяющейся при датировании ископаемых костей, позволяют получать «чистые», не загрязненные посторонним углеродом препараты. Конечно, наличие резервуарного эффекта очень осложнило интерпретацию радиоуглеродных данных, полученных по костям человека, и вызвало неоднозначную реакцию среди археологов. Очевидно, что отказываться от использования дат, полученных по коллагену костей человека, не рационально. Для выявления резервуарного эффекта необходимо датировать парные образцы разного происхождения из одного археологического контекста (кость человека — кость животного, кость человека — древесина, уголь, текстиль), а также проводить дополнительные изотопные исследования для реконструкции системы питания человека и выявления в его диете морского и/или пресноводного компонентов [Ван дер Плихт и др., 2007].

Древесина, уголь, растительные остатки, семена являются надежными и широко применяемыми в археологии материалами для датирования. Эти образцы наземного происхождения, как было описано выше, используются и для параллельного датирования при изучении резервуарного эффекта. Напомним, что на основе датирования годовых колец древесины построена и часть радиоуглеродной калибровочной кривой. Однако и при интерпретации данных, полученных по таким надежным материалам, имеются свои особенности. Необходимо помнить, что в некоторых случаях на радиоуглеродный возраст древесины может оказать влияние «эффект старого дерева», так как внутренняя часть древесины долгорастущего дерева отличается по возрасту от внешней и, если дерево долгоживущее (дуб, сосна, ясень и др.), возраст, определенный по разным частям древесины одного и того же объекта, может различаться до 400 лет. Другой аспект «эффекта старой древесины» заключается в возможном вторичном использовании древесины (например, для погребальных конструкций используется не только что срубленное дерево, а взятое из уже функционирующего какое-то время хозяйственно-бытового строения). Радиоуглеродный возраст древесины в этом случае будет отражать не время погребения, а момент рубки дерева для его первоначального применения в бытовых целях.

Еще одним археологическим материалом, активно вошедшим в практику радиоуглеродного датирования с развитием AMS технологий, является текстиль — фрагменты тканей и одежды. Материалы, из которых создаются текстильные изделия (шелк, хлопок, лен), — короткоживущие, поэтому установленный по ним радиоуглеродный возраст отражает, по сути, возраст создания изделия. Эти материалы легки в очистке, фракционирование контролируется измерением соотношения стабильных изотопов в образце, состав образца можно определить применяя микроскопические методы. Подробный анализ методов отбора, пробоподготовки и измерения радиоуглеродного возраста образцов текстиля в AMS лабораториях приведен в работе И. Хайджес с соавт. [Hajdas et al., 2014].

Датирование керамики с помощью ¹⁴C стало широко возможным с применением AMS. В настоящее время почти все известные репрезентативные даты по керамике получены с использованием AMS. Возможности, которые дает техника ускорительной масс-спектрометрии, и сложности, сопровождающие пробоподготовку и датирование керамики, делают нецелесообразным датирование керамики с использованием бета-счетчиков [Cook et al., 2006]. Количество органического вещества в образце керамики очень мало (как в составе самого керамического теста, так и в разнообразных включениях в нем), и оно соответственно может быть разного происхож-

дения. При корректном проведении всех процедур отбора и подготовки керамического материала к анализу мы получим радиоуглеродную дату, которая говорит или о времени производства керамики, или о времени ее использования [Hedges et al., 1992]. От происхождения датированного в керамике углерода зависит интерпретация полученных данных. Наиболее информативным с точки зрения археологии является остаточный атмосферный углерод, переживший окисление во время обжига и включившийся в состав керамического теста. Датируя этот углерод, мы получаем дату обжига, т.е. реальную дату создания предмета [ibid.]. Этот углерод может быть извлечен из керамического теста, однако при этом существует множество трудностей, связанных с тем, что керамический черепок имеет собственный углерод, входящий в состав глины, из которой он произведен. Большинство глин содержат заметное количество углерода, часть которого вполне может быть окислена при обжиге [Gabasio et al., 1986]. Глины могут содержать карбонаты, усложняющие интерпретацию полученных дат. Карбонаты легко идентифицировать в тесте керамики (например, морфологическими и изотопными методами), но это требует дополнительных исследований черепка перед датированием. Также во время обжига при недостатке кислорода формируются продукты неполного сгорания, такие как сажа и копоть. Эти продукты могут адсорбироваться на керамике во время обжига. Если использовались древесина, торф или уголь (имеющие свой возраст или несущие мертвый углерод, как каменный уголь), то возникает эффект «старого дерева»; таким образом, дата, полученная по керамике, может быть удревнена [Delque, 1995]. Для датирования могут быть использованы примеси, входящие в состав керамики (растительные остатки, солома, раковины или шамот). Присутствие раковин в качестве примеси усложняет процедуру датирования, так как они могут быть подвержены влиянию эффекта резервуара.

В последние годы стало развиваться еще одно направление — датирование нагаров на внутренней или внешней поверхности керамики [Philipsen, 2010]. Однако и здесь исследователи столкнулись с проблемной ситуацией. При датировании нагаров необходимо идентифицировать продукты нагара, чтобы учесть возможное влияние эффекта морского и пресноводного резервуаров [Fischer, 2003], отделить растения группы C4 (например, кукурузу). Для этого чаще всего используются методы изотопной геохимии, а также фитолитный и палинологический анализы.

Органическое вещество (ОВ) погребенных почв, культурных слоев поселений и педоседиментов представляет достаточно сложный для интерпретации ^{14}C -данный материал, так как не всегда датирует время события (создания, существования памятника, погребения и т.д.). Тем не менее во многих случаях (отсутствие других материалов для датирования или их плохая сохранность) радиоуглеродное определение возраста ОВ почв и заполнителя культурного слоя дает возможность получать с достаточной степенью точности необходимые и единственно возможные даты [Чичагова и др., 2008]. Выбор объектов датирования, возможные интерпретации достаточно подробно описаны в литературе [Зазовская, Чичагова, 2014; Чичагова, Зазовская, 2004].

Редкими пока, но уже введенными в практику радиоуглеродных исследований являются такие представляющие для археологов интерес материалы датирования, как углеродистые составляющие из металлических артефактов [Leroy et al., 2012], карбонатные цементы из построек [Ringbom et al., 2014].

Заключение

Радиоуглеродный метод, как любой инструментальный метод, быстро развивается и совершенствуется. Это позволяет как с более высокой точностью датировать традиционные объекты исследования, так и определять возраст материалов, которые в прошлом были непригодны для датирования радиоуглеродным методом. Однако это приводит к сложности и неоднозначности интерпретации результатов и, как следствие, вызывает недовольство конечных пользователей полученными в лабораториях датами. Возможно, археолог не должен понимать, как происходят ускорение частиц при датировании с помощью ускорительной масс-спектрометрии, очистка образца от примесей постороннего углерода, что происходит с образцами при синтезе бензола или производстве графита, но, для того чтобы использовать радиоуглеродные даты в хронологических построениях, необходимо знать и понимать, какие эффекты могли повлиять на результат определения возраста исследуемого объекта. Тесное сотрудничество между археологами и специалистами — сотрудниками радиоуглеродной лаборатории позволяет правильно провести все этапы исследования и интерпретации полученных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ван дер Плихт, Шишлина Н.И., Хеджес Р.Е.М., Зазовская Э.П., Севастьянов В.С., Чичагова О.А. Резервуарный эффект и результаты датирования катакомбных культур Северо-западного Прикаспия // РА. 2007. № 2. С. 39–47.
- Зазовская Э.П., Чичагова О.А. Радиоуглеродное датирование органического вещества почв и седиментов: Опыт применения в археологическом почвоведении // Материалы Всерос. науч. конф. с международным участием по археологическому почвоведению, посвященной памяти проф. В.А. Демкина. Пушкино, 2014. С. 25–29.
- Марченко Ж.В., Панов В.С., Орлова Л.А. Начальные результаты по датированию археологических памятников эпохи голоцена на УМС в ЦКП СО РАН «Геохронология кайнозоя»: Экспериментальные ^{14}C и сравнительный анализ данных // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. Новосибирск: ИАЭТ СО РАН, 2013. № XIX. С. 244–250.
- Савинецкий А.Б., Хасанов Б.Ф. Динамика добычи китов древними эскимосами на побережье Чукотки (по калиброванным радиоуглеродным датам) // OPUS: Междисциплинарные исследования в археологии. М., 2004. № 3. С. 188–196.
- Чичагова О.А., Зазовская Э.П. Радиоуглеродный метод // Естественно-научные методы исследования культурных слоев древних поселений. М.: НИА-Природа, 2004. С. 34–46.
- Чичагова О.А., Хохлова О.С., Зазовская Э.П., Горячкин С.В. Радиоуглеродный анализ и проблемы памяти почв // Память почв: Почва как память биосферно-геосферно-атмосферных взаимодействий. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 182–203.
- Чичагова О.А., Зазовская Э.П. Радиоуглеродное датирование: Прошлое, настоящее, будущее — развитие идей И.П. Герасимова // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. № 81. С. 160–176.
- Arneborg J., Heinemeier J., Lynnerup N., Nielsen H.L., Rud N., Sveinbjörnsdóttir A.E. Change of diet of the Greenland Vikings determined from stable Carbon isotope analysis and ^{14}C dating of their bones // Radiocarbon. 1999. Vol. 41. P. 157–168.
- Berger R., Taylor R.E., Libby W.F. Radiocarbon content of marine shells from the Californian and Mexican west coast // Science. 1966. Vol. 153. P. 864–866.
- Bonsall C., Cook G.T., Hedges R.E.M., Higham T.F.G., Pickard C. Radiocarbon and stable isotope evidence of dietary change from the Mesolithic to the Middle Ages in the Iron Gates: new results from Lepinski Vir // Radiocarbon. 2004. Vol. 46. N 1. P. 293–300.
- Brock F., Higham T., Ditchfield P., Bronk Ramsey C. Current pretreatment methods for AMS radiocarbon dating at the Oxford Radiocarbon Accelerator Unit (ORAU) // Radiocarbon. 2010. 52. N 1. P. 103–120.
- Brock F., Geoghegan V., Thomas B., Jurkschat K., Higham T.F.G. Analysis of bone «collagen» extraction products for radiocarbon dating // Radiocarbon. 2013. Vol. 55. N 2–3. P. 445–463.
- Bronk Ramsey C. Radiocarbon dating: Revolutions in understanding // Archaeometry. 2008. N 50, 2. P. 249–275.
- Cook G.T., Bonsall C., Hedges R.E.M., McSweeney K., Boroneant V., Pettitt P.B. A freshwater diet-derived ^{14}C reservoir effect at the Stone Age sites in the Iron Gates gorge // Radiocarbon. Vol. 43. 2001. P. 453–460.
- Cook G.T., Bonsall C., Hedges R.E.M., McSweeney K., Boroneant V., Bartosiewicz L., Pettitt P.B. Problems of dating human bones from the Iron Gates // Antiquity. 2002. Vol. 76. P. 28–47.
- Godwin H. Half-life of Radiocarbon // Nature. 1962. N 195. P. 984.
- Cook G.T., van der Plicht J. Radiocarbon dating // Encyclopedia of Quaternary Science. 2006. S.A. Elias, ed. Elsevier. P. 289–291.
- Delque Kolic E. Direct radiocarbon dating of pottery: Selective heat treatment to retrieve smoke-derived carbon // Radiocarbon. 1995. Vol. 37. N 2. P. 275–284.
- Fischer A., Olsen J., Richards M., Heinemeier J., Sveinbjörnsdóttir A.E., Bennike P. Coast-inland mobility and diet in the Danish Mesolithic and Neolithic: Evidence from stable isotope values of humans and dogs // Journ. of Archaeol. Science. 2007. Vol. 34. P. 2125–2150.
- Fernandes R., Bergemann S., Hartz S., Grootes P., Nadeau M.-J., Rakowski A., Hüls M. Mussels with meat: Bivalve tissue-shell radiocarbon age differences and archaeological implications // Radiocarbon. 2012. Vol. 54. N 3–4. P. 953–965.
- Gabasio M., Evin J., Amal G.B., Andrieux P. Origins of carbon in potsherds // Radiocarbon. 1986. Vol. 28. N 2A. P. 711–718.
- Hajdas I., Cristì C., Bonani G., Maurer M. Textiles and radiocarbon dating // Radiocarbon. 2014. Vol. 56. N 2. P. 1–7.
- Hedges R., Tiemei Chen, Housley R.A. Results and Methods in the Radiocarbon Dating of Pottery // Radiocarbon. 1992. Vol. 34. P. 906–915.
- Higham T., Warren R., Belinskij A., Härke H., Wood R.E. Radiocarbon dating, stableisotope analysis, and diet-derived offsets in ^{14}C ages from the Klin Yarsite, Russian north Caucasus // Radiocarbon. 2010. Vol. 53. P. 653–670.
- Hua Quan, Barbetti M., Rakowski A. Z. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010 // Radiocarbon. 2013. Vol. 55. N 4. P 2059–2072.
- Kohn M.J. You are what you eat // Science. N 283. 1999. P. 335–336.

- Lanting J.N., van der Plicht J. Reservoir effects and apparent ^{14}C ages // Journ. of Irish Archaeology. 1998. N 9. P. 151–165.
- Leroy S., Delque-Kolic E., Dumoulin J.P., Moreau C., Dillmann P. Proposition of a methodology for the radiocarbon dating of ancient iron alloys // 21st International radiocarbon conference: Abstract book. P., 2012. P. 59.
- Libby W.F. Radiocarbon dating. Chicago, 1952.
- Lillie M., Budd Ch., Potekhina I., Hedges R. The radiocarbon reservoir effect: new evidence from the cemeteries of the middle and lower Dnieper basin, Ukraine // Journ. of Archaeol. Sciences. 2009. Vol. 36. P. 256–264.
- Mook W.G., Streurman H.J. Physical and chemical aspects of radiocarbon dating // Proc. Groningen Symp. ^{14}C and Archaeology PACT Publ. 1983. N 8. P. 31–55.
- Philippesen B. Terminal Mesolithic Diet and Radiocarbon Dating at Inland Sites in Schleswig-Holstein // Landscapes and Human Development: The Contribution of European Archaeology. Bonn, 2010. P. 21–36.
- Renfrew C. Before civilization: The Radiocarbon revolution and Prehistoric Europe. L., 1999. 320 p.
- Ringbom A., Lindroos A., Heinemeier J., Sonck-Koota P. 19 years of mortar dating: Learning from experience // Radiocarbon. 2014. Vol. 56. N 2. P. 619–635.
- Olsen J., Rasmussen T.L., Reimer P.J. North Atlantic marine radiocarbon reservoir ages through Heinrich event H4: A new method for marine age model construction // Marine Tephrochronology. 2014. Geological Society of London. Special publications. P. 398.
- Stuiver M., Reimer, P.J. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program // Radiocarbon. 1993. Vol. 35. P. 215–230.
- Ramsey B.C., Staff R.A., Bryant C.L., Brock F., Kitagawa H., van der Plicht J., Scholaut G., Marshall M.H., Brauer A., Lamb H.F., Payne R.L., Tarasov P.E., Haraguchi T., Gotanda K., Yonenobu H., Yokoyama Y., Tada R., Nakagawa T. A complete terrestrial radiocarbon record for 11.2 to 52.8 kyr BP // Science. 2012. N 338. P. 370–374.
- Rastigeev S.A., Frolov A.R., Goncharov A.D., Klyuev V.F., Konstantinov S.G., Konstantinov E.S., Kutnykova L.A., Parkhomchuk V.V., Petrichenkov M.V., Petrozhitski, A.V. First radiocarbon measurements at BINP AMS // RuPAC. Contributions to the Proceedings: 22nd Russian Particle Accelerator Conference. 2010. P. 309–312.
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hafliadason H., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J. Intcal13 and Marine13 Radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years calBP // Radiocarbon. 2013. Vol. 55. N 3. P. 1869–1887.
- Shishlina N. I., van der Plicht J., Hedges R.E.M., Zazovskaya E.P., Sevastianov V.S., Chichagova O.A. The catacomb cultures of the North-west Caspian steppes: ^{14}C chronology, reservoir effect, and paleodiet // Radiocarbon. 2007. Vol. 49. 2. P. 713–726.
- Shishlina N., Zazovskaya E., van der Plicht J., Sevastyanov V. Isotopes, plants, and reservoir effects: Case study from the Caspian Steppe Bronze Age // Radiocarbon. 2012. Vol. 54. N 3–4. P. 749–760.
- Shishlina N., Sevastyanov V., Zazovskaya E., van der Plicht J. Reservoir Effect of Archaeological Samples from Steppe Bronze Age Cultures in Southern Russia // Radiocarbon. 2014. Vol. 56. N 2. P. 767–778.
- Taylor R.E., Southon J. Use of natural diamonds to monitor ^{14}C AMS instrument backgrounds // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2007. B 259. P. 282–287.
- Tauber H. ^{14}C activity of Arctic Marine Mammals // Radiocarbon dating, proceedings of the 9th Intern. Radiocarbon Conf. Berkeley, Univ. of California press. 1979. P. 447–452.
- Wood R.E., Higham T.F.G., Buzilova A., Suvorov A., Heinemeier J., Olsen J. Freshwater radiocarbon reservoir effects at the burial ground of Minino, Northwest Russia // Radiocarbon. 2013. Vol. 55. N 1. P. 163–177.

E.P. Zazovskaya

Institute of Geography RAS
Staromonetny Pereulok, 29, Moscow, 119017
E-mail: zaszovsk@gmail.com

RADIOCARBON DATING — MODERN STATE, PROBLEM, PROSPECTS OF DEVELOPMENT AND USE IN ARCHAEOLOGY

Basic principles of radiocarbon dating are presented in the article. History of the method development and modern state are shown. Difficulties appeared under the radiocarbon dating and approaches, permitting to present the received results correctly are discussed. The procedure of radiocarbon data calibration is described, references on calibration programs, which can be used, are given. Effect of isotope fractionation and its influence on radiocarbon age of examined sample is described in details. It is shown how the corrections on isotope fractionation are bringing in. Problem of marine and freshwater reservoirs under the archeological objects are described. Examples of the influence of reservoir effect on radiocarbon age received on collagen man bones. Detailed recommendations for sampling for radiocarbon dating are given. Approximate mass of different type of

samples as for dating with the help of LSC techniques (Liquid scintillation counting) and for AMS (Accelerator Mass Spectrometry) dating is presented. All stages of radiocarbon dating are described in details, starting from field sampling up to receiving the radiocarbon data. Review of radiocarbon condition in the World practice and in Russia is given. Possibilities of modern Russian radiocarbon dating Laboratories are shown. At present, the first steps are made for using mass spectrometer acceleration in radiocarbon dating in Geochronological Cenozoic Center, RAS Siberian Branch and in the Institute of Geography, RAS. Specific features of dating and interpretations of received data for the main archeological materials, used under the dating of archeological objects is described, such as carbon, wood, man and animal bones, textile, ceramics, soils and sediments, metallic artifacts, carbon inclusions.

Key words: radiocarbon dating, archaeology, dating fraction, reservoir effect, accelerator mass spectrometry.

DOI: 10.20874/2071-0437-2016-32-1-151-164

REFERENCES

- Arneborg J., Heinemeier J., Lynnerup N., Nielsen H.L., Rud N., Sveinbjörnsdóttir A.E., 1999. Change of diet of the Greenland Vikings determined from stable Carbon isotope analysis and ^{14}C dating of their bones. *Radiocarbon*, vol. 41, pp. 157–168.
- Berger R., Taylor R.E., Libby W.F., 1966. Radiocarbon content of marine shells from the Californian and Mexican west coast. *Science*, vol. 153, pp. 864–866.
- Bonsall C., Cook G.T., Hedges R.E.M., Higham T.F.G., Pickard C., 2004. Radiocarbon and stable isotope evidence of dietary change from the Mesolithic to the Middle Ages in the Iron Gates: New results from Lepinski Vir. *Radiocarbon*, vol. 46, no. 1. P. 293–300.
- Brock F., Higham T., Ditchfield P., Bronk Ramsey C., 2010. Current pretreatment methods for AMS radiocarbon dating at the Oxford Radiocarbon Accelerator Unit (ORAU). *Radiocarbon*, 52, 1, pp. 103–120.
- Brock F., Geoghegan V., Thomas B., Jurkschat K., Higham T.F.G., 2013. Analysis of bone «collagen» extraction products for radiocarbon dating. *Radiocarbon*, vol. 55, 2–3, pp. 445–463.
- Bronk Ramsey C., 2008. Radiocarbon dating: Revolutions in understanding. *Archaeometry*, 50, 2, pp. 249–275.
- Chichagova O.A., Khokhlova O.S., Zazovskaya E.P., Goriachkin S.V., 2008. Radiouglerodnyi analiz i problema pamiati pochv [Radiocarbon analysis and problem of soil memory]. *Pamiat' pochv. Pochva kak pamiat' biosferno-geosferno-atroposfernykh vzaimodeistvii*, Moscow: Isdatelstvo LKI, pp. 182–203.
- Chichagova O.A., Zazovskaya E.P., 2004. Radiouglerodnyi metod [Radiocarbon dating method]. *Estestvenno-nauchnye metody issledovaniia kul'turnykh sloev drevnikh poselenii*, Moscow: NIA-Priroda, pp. 34–46.
- Chichagova O.A., Zazovskaya E.P., 2015. Radiouglerodnoe datirovanie: Proshloe, nastoiashchee, budushchee — razvitie idei I.P. Gerasimova [Radiocarbon dating: Past, present-day and future — development of I.P. Gerasimov ideas]. *Biulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, vol. 81, pp. 160–176.
- Cook G.T., Bonsall C., Hedges R.E.M., McSweeney K., Boroneant V., Pettitt P.B., 2001. A freshwater diet-derived ^{14}C reservoir effect at the Stone Age sites in the Iron Gates gorge. *Radiocarbon*, vol. 43, pp. 453–460.
- Cook G.T., Bonsall C., Hedges R.E.M., McSweeney K., Boroneant V., Bartosiewicz L., Pettitt P.B., 2002. Problems of dating human bones from the Iron Gates. *Antiquity*, vol. 76, pp. 28–47.
- Cook G.T., van der Plicht J., 2006. Radiocarbon dating. *Encyclopedia of Quaternary Science*. S.A. Elias: ed. Elsevier, pp. 289–291.
- Delque Kolic E., 1995. Direct radiocarbon dating of pottery: Selective heat treatment to retrieve smoke-derived carbon. *Radiocarbon*, vol. 37, 2, pp. 275–284.
- Fernandes R., Bergemann S., Hartz S., Grootes P., Nadeau M.-J., Rakowski A., Hüls M., 2012. Mussels with meat: Bivalve tissue-shell radiocarbon age differences and archaeological implications. *Radiocarbon*, vol. 54, 3–4, pp. 953–965.
- Fischer A., Olsen J., Richards M., Heinemeier J., Sveinbjörnsdóttir A.E., Bennike P., 2007. Coast-inland mobility and diet in the Danish Mesolithic and Neolithic: Evidence from stable isotope values of humans and dogs. *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, pp. 2125–2150.
- Gabasio M., Evin J., Arnal G.B., Andrieux P., 1986. Origins of carbon in potsherds. *Radiocarbon*, vol. 28, 2A, pp. 711–718.
- Godwin H., 1962. Half-life of Radiocarbon. *Nature*, 195, pp. 984.
- Hajdas I., Cristi C., Bonani G., Maurer M., 2014. Textiles and radiocarbon dating. *Radiocarbon*, vol. 56, no. 2, pp. 1–7.
- Hedges R., Tiemei Chen, Housley R.A., 1992. Results and Methods in the Radiocarbon Dating of Pottery. *Radiocarbon*, vol. 34, pp. 906–915.
- Higham T., Warren R., Belinskij A., Härke H., Wood R.E., 2010. Radiocarbon dating, stableisotope analysis, and diet-derived offsets in ^{14}C ages from the Klin Yarsite, Russian north Caucasus. *Radiocarbon*, vol. 53, pp. 653–670.
- Hua Quan, Barbetti M., Rakowski A.Z., 2013. Atmospheric radiocarbon for the period 1950–2010. *Radiocarbon*, vol 55, no. 4, pp. 2059–2072.
- Kohn M.J., 1999. You are what you eat. *Science*, no. 283, pp. 335–336.

- Lanting J.N., van der Plicht J., 1998. Reservoir effects and apparent ^{14}C ages. *Journal of Irish Archaeology*, no. 9, pp. 151–165.
- Leroy S., Delque-Kolic E., Dumoulin J.P., Moreau C., Dillmann P., 2012. Proposition of a methodology for the radiocarbon dating of ancient iron alloys. *21st International radiocarbon conference*, Abstract book, Paris, p. 59.
- Libby W.F., 1952. *Radiocarbon dating*, Chicago.
- Lillie M., Budd Ch., Potekhina I., Hedges R., 2009. The radiocarbon reservoir effect: new evidence from the cemeteries of the middle and lower Dnieper basin, Ukraine. *Journal of Archaeological Sciences*, vol. 36, pp. 256–264.
- Marchenko Zh.V., Panov V.S., Orlova L.A., 2013. Nachal'nye rezul'taty po datirovaniu arkheologicheskikh pamiatnikov Epokhi golotsena na UMS v TSKP SO RAN «Geokhronologiyakainozoi»: Eksperimental'nye ^{14}C i sravnitel'nyi analiz dannykh [The first results of radiocarbon dating archaeological sites of Holocene on UMS in the collective center SO RAN «Geochronology of Cenozoic»: Experimental ^{14}C dates and comparative analysis of data]. *Problemy arkheologii, Etnografii, antropologii Sibiri i sopredel'nykh territorii*. Novosibirsk, vol. XIX, pp. 244–250.
- Mook W.G., Streurman H.J., 1983. Physical and chemical aspects of radiocarbon dating. *Proc. Groningen Symp. ^{14}C and Archaeology* PACT Publ, no. 8, pp. 31–55.
- Olsen J., Rasmussen T.L., Reimer P.J., 2014. North Atlantic marine radiocarbon reservoir ages through Heinrich event H4: A new method for marine age model construction. *Marine Tephrochronology*. Geological Society of London. Special publications, p. 398.
- Philippson B., 2010. Terminal Mesolithic Diet and Radiocarbon Dating at Inland Sites in Schleswig-Holstein. *Landscapes and Human Development: The Contribution of European Archaeology*, Bonn, pp. 21–36.
- Ramsey B.C., Staff R.A., Bryant C.L., Brock F., Kitagawa H., van der Plicht J., Schlolaut G., Marshall M.H., Brauer A., Lamb H.F., Payne R.L., Tarasov P.E., Haraguchi T., Gotanda K., Yonenobu H., Yokoyama Y., Tada R., Nakagawa T., 2012. A complete terrestrial radiocarbon record for 11.2 to 52.8 kyr BP. *Science*, no. 338, pp. 370–374.
- Rastigeev S.A., Frolov A.R., Goncharov A.D., Klyuev V.F., Konstantinov S.G., Konstantinov E.S., Kutnykova L.A., Parkhomchuk V.V., Petrichenkov M.V., Petrozhitskii A.V., 2010. First radiocarbon measurements at BINP AMS. *RuPAC. Contributions to the Proceedings: 22nd Russian Particle Accelerator Conference*, pp. 309–312.
- Renfrew C., 1999. *Before civilization: The Radiocarbon revolution and Prehistoric Europe*, London, 320 p.
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hafliðason H., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E. M., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J., 2013. Intcal13 and Marine13 Radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years calBP. *Radiocarbon*, vol. 55, no. 3, pp. 1869–1887.
- Ringbom A., Lindroos A., Heinemeier J., Sonck-Koota P., 2014. 19 years of mortar dating: Learning from experience. *Radiocarbon*, vol. 56, no 2, pp. 619–635.
- Savinetskii A.B., Khasanov B.F., 2004. Dinamika dobychi kitov drevnimi Eskimosami na poberezh'e Chukotki (po kalibrovannym radiouglerodnym datam) [Dynamics of whale kill of ancient Eskimos on the coast of Chukotka (for calibrated radiocarbon dates)]. *OPUS: Mezhdisciplinarnye issledovaniia v arkheologii*, Moscow, vol. 3, pp. 188–196.
- Shishlina N. I., van der Plicht J., Hedges R.E.M., Zazovskaya E.P., Sevastianov V.S., Chichagova O.A., 2007. The catacomb cultures of the North-west Caspian steppes: ^{14}C chronology, reservoir effect, and paleodiet. *Radiocarbon*, vol. 49, 2, pp. 713–726.
- Shishlina N., Zazovskaya E., van der Plicht J., Sevastyanov V., 2012. Isotopes, plants, and reservoir effects: Case study from the Caspian Steppe Bronze Age. *Radiocarbon*, vol. 54, no. 3–4, pp. 749–760.
- Shishlina N., Sevastyanov V., Zazovskaya E., van der Plicht J., 2014. Reservoir Effect of Archaeological Samples from Steppe Bronze Age Cultures in Southern Russia. *Radiocarbon*, vol. 56, no. 2, pp. 767–778.
- Stuiver M., Reimer P.J., 1993. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, vol. 35, pp. 215–230.
- Tauber H., 1979. ^{14}C activity of Arctic Marine Mammals. *Radiocarbon dating, proceedings of the 9th International Radiocarbon Conference*, Berkeley, University of California press, pp. 447–452.
- Taylor R.E., Southon J., 2007. Use of natural diamonds to monitor ^{14}C AMS instrument backgrounds. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 259, pp. 282–287.
- Van der Plicht, Shishlina N.I., Hedges R.E.M., Zazovskaya E.P., Sevast'ianov V.S., Chichagova O.A., 2007. Rezervuarnyi effekt i rezul'taty datirovaniia katakombnykh kul'tur Severo-zapadnogo Prikaspiya [Reservoir effect and results of ^{14}C dating of Catacomb cultures of the North-West Caspian Steppe Area: A case study]. *Rossiiskaia Arkheologiya*, vol. 2, pp. 39–47.
- Wood R.E., Higham T.F.G., Buzilova A., Suvorov A., Heinemeier J., Olsen J., 2013. Freshwater radiocarbon reservoir effects at the burial ground of Minino, Northwest Russia. *Radiocarbon*, vol. 55, no. 1, pp. 163–177.
- Zazovskaya E.P., Chichagova O.A., 2014. Radiouglerodnoe datirovanie organicheskogo veshchestva pochvi sedimentov: Opyt primeneniya v arkheologicheskom pochvovedenii [Radiocarbon dating of organic matter in soils and sediments: The experience of the application of the archeological soil science]. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem po arkheologicheskomu pochvovedeniiu, posviashchennoi pamiati prof. V.A. Demkina*, Puchino, pp. 25–29.