

Л.А. Кутнякова

Институт археологии и этнографии СО РАН

Новосибирск, Россия

E-mail: bkharat.mail@yandex.ru

Применение анализа методом Байеса для уменьшения ошибок датировки археологических коллекций

Анализ найденных артефактов, в т.ч. с целью понять время их возникновения и использования, составляет существенную часть работы археологов. Для проведения таких исследований применяется множество методик, которые в целом можно разделить на методы относительной и абсолютной датировки. Абсолютная датировка возникла с появлением радиоуглеродного анализа и в настоящее время использует множество методов, однако наиболее распространенным все также является радиоуглеродный метод датировки, позволяющий получить возраст органических образцов не старше 50 тыс. лет. Увеличение точности приборов позволяет получить радиоуглеродный возраст с высокой точностью, однако при этом начинают уже играть существенную роль неконтролируемые ошибки, связанные с подготовкой и историей хранения образцов. Данная статья описывает некоторые особенности и применение байесовского анализа к анализу датировок археологических образцов и подавлению случайных ошибок и сдвигов датировки. Байесовский метод позволяет корректно и во всей полноте учесть результаты абсолютной датировки в последовательностях стратифицированных образцов. Это позволяет, благодаря учету контекста, существенно повысить точность датировки. На примере нескольких сгенерированных тестовых наборов показаны методы и возможности уменьшения влияния случайных неконтролируемых ошибок при моделировании распределения дат с применением специализированного программного пакета OxCal для случая если все образцы явно относятся к одному событию и для случая многофазной модели с возможностью учета дополнительной стратиграфической информации. Показаны методы оценки соответствия данных и выбранной гипотезы их распределения и методы оценки достоверности моделирования.

Ключевые слова: AMS, радиоуглеродное датирование, байесовский анализ.

L.A. Kutnyakova

Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS

Novosibirsk, Russia

E-mail: bkharat.mail@yandex.ru

Applying Bayesian Analysis to Suppress Dating Errors in Archaeological Collections

Analyzing the discovered artifacts, which entails establishing the time of their origin and use, is an important part of the work of archaeologists. Many methods used for such studies may generally be divided into the methods of relative and absolute dating. Absolute dating emerged with the beginning of radiocarbon analysis and currently employs many methods. However, radiocarbon dating which makes it possible to date organic samples of not older than 50,000 BP is used most frequently. Although increasing instrumental accuracy ensures high accuracy of radiocarbon dating, it is accompanied by uncontrolled errors associated with sample preparation and storage history. This article describes the application of Bayesian analysis for dating archaeological samples and suppression of errors and shifts in dating. The Bayesian method fosters correct and complete analysis of absolute dating results in the sequences of stratified samples, which in turn significantly increases the accuracy of dating due to consideration of context. The methods and capabilities for reducing the impact of random uncontrolled errors in modeling date distributions are demonstrated using several generated test datasets with the specialized OxCal software package. This is illustrated for the case where all samples clearly related to a single event, and for the case of a multiphase model allowing for inclusion of additional stratigraphic information. Methods for assessing the correspondence between the data and chosen distribution hypothesis, as well as methods for evaluating the reliability of the modeling, are also presented.

Keywords: AMS, radiocarbon dating, Bayesian analysis.

Введение

Нахождение временного контекста для получаемых археологических объектов – это важная ступень археологического анализа. Первые методики такого анализа базировались на глубине залегания найденных образцов и развились в стратиграфические методы, позволяющие получить последовательность культурно-исторических событий в определенной географической области. Развитие естественных наук и техники привело к появлению разных методов абсолютной датировки. Такие методы позволяют получить абсолютный временной интервал от сегодняшнего дня до некоторой точки отсчета, связанной с временем использования или существования археологических образцов.

Абсолютная датировка в археологии

Часть методов основаны на анализе изотопного состава образца. Часть используют другие эффекты, например, термолюминесцентный метод датировки керамики по накопленной за счет космического излучения силе термолюминисценции позволяет узнать, как давно был произведен обжиг изделия. Для деревянных изделий, в которых сохранился набор годовых колец, могут использоваться дендрохронологические методы поиска корреляции с известными образцами для определения точного возраста. Самый распространенный и, наверное, самый полезный в смысле абсолютного изотопного датирования метод – это радиоуглеродный анализ. В нем анализируется содержание в образце изотопа углерода 14, этот изотоп в атмосфере образуется из азота под действием солнечной радиации и поглощается растениями вместе с обычными изотопами углерода. Далее углерод по пищевой цепочке попадает во все другие живые организмы. В отличии от обычного углерода 12 и углерода 13, изотоп ^{14}C радиоактивный и распадается с периодом полураспада примерно 5 730 лет. Так что, определив концентрацию радиоуглерода относительно концентрации стабильных изотопов углерода и зная закон радиоактивного распада, можно определить дату смерти растения или животного [Арсланов, 1987; Кулькова, 2011].

Современные ускорительные масс-спектрометры (далее – AMS) достигли такой точности, что могут подсчитывать число атомов ^{14}C в исследуемом образце. Это позволяет сильно уменьшить, до десятков миллиграмм, размер пробы, которая уничтожается для определения концентрации [Растигейев и др., 2016]. При этом данные об относительной концентрации могут быть подсчитаны с очень высокой точностью. Это то, что называется радиоуглеродной датой. Однако это не совсем возраст в археологическом смысле. С повышением точности анализа было довольно быстро обнаружено, что концентрация радиоуглерода в атмосфере варьирует в зависимости от активности солнца, климата, типа исследуемого биома (водный он

или сухопутный). Для того, чтобы получить датировку с учетом этих факторов используют графики пересчета, построенные на основе радиоуглеродного анализа образцов, возраст которых был независимо определен дендрохронологическими методами [Weninger et al., 2011]. Для такого пересчета существуют специально написанные программные пакеты и библиотеки, наиболее широкое распространение из них получил пакет OxCal. Для пересчета может использоваться большой набор калибровочных кривых. Для стандартных датировок используется кривая IntCal20/SHCal20 (стандарт для северного или южного полушария, уточненный в 2020 г.), для датировки морских образцов используется кривая Marine 20. Полученный в программе интервал показывает ошибку, которая определяется статистикой (т.е. числом измерений атомов) и известными ошибками цепочки артефакт – проба – радиоуглеродный возраст. Однако всегда стоит иметь ввиду, что возможны еще и скрытые ошибки, т.е. такие, о которых не известно при анализе: например, загрязнение образца современным или наоборот древним углеродом, сдвиг концентрации в самом образце из-за неизвестных исследователю причин. Удревнение даты, как пример, произойдет при контакте образца с любым продуктом нефтепереработки или выхлопными газами: в ископаемой нефти и угле радиоуглерод отсутствует. А контакт, например, со спиртом будет способствовать омоложению артефакта. Так же, если анализируется дерево, то его датировка позволит найти время, когда дерево было срублено, и оно не обязательно совпадает с временем, когда оно было последний раз использовано и перешло в статус предмета изучения археологией.

Моделирование возраста методами байесовской статистики

Если образец один – то в силу того, что ошибка неизвестна, бороться с описанными и им подобными эффектами можно только тщательным контролем пути от получения образца до даты. Если же датируется группа образцов с известным стратиграфическим или культурным контекстом, существует еще один путь повышения точности определения даты и согласования абсолютной датировки с археологическими данными. Он основан на построении модели распределения дат. Для этого пользуются методами байесовской статистики, суть которых, если говорить общими словами, заключается в уточнении или корректировке вероятности события с помощью учета взаимосвязанных с ним событий. Датировка рассматривается как варьируемый, уточняемый параметр, который должен удовлетворять заданной модели расположения дат.

Несмотря на то, что теорема Байеса была опубликована в XVIII в., практическое применение методов, использующих байесовский подход, началось относительно недавно, когда стали доступны адекватные вычислительные мощности. Математическое содержа-

ние данных методов и алгоритмы, лежащие в основе библиотек и программ [Ramsey, 2009a], находятся за рамками данной работы, однако стоит выделить терминологию, которая в связи с ними используется. Так, гипотеза расположения дат называется априорной моделью, а набор датировок рассматривается как вероятность. Фактическое (изначальное) распределение вероятности для каждой даты задается в результате калибровки полученного радиоуглеродного возраста функцией распределения. Далее начинается варьирование вероятности с целью получения наилучшей корреляции с априорной моделью. При этом первая дата выбирается случайно, следующие же пересчитываются по теореме Байеса. По сути, производится перебор всех решений с выбором наиболее подходящих. Полученные распределения называются апостериорными распределениями вероятности [Ramsey, 2009a; Bayliss, Ramsey, 2004] и представляют собой модель распределения дат, которая является наиболее удовлетворяющей заданной гипотезе.

Есть несколько наиболее широко используемых априорных моделей. Самая простая, в некотором смысле эквивалентная комбинированию разных измерений одного образца [Ward, Wilson, 1978], – это предположение, что все образцы имеют одинаковый возраст. В простейшем случае для такой модели не требуется байесовская статистика. В силу того, что мы считаем концентрацию одинаковой, мы можем пытаться объединять измерения до проведения калибровки, и это представляет собой усреднение нормально распределенной величины. Однако если кроме радиоуглеродных дат используется дополнительная информация о возрасте или об ошибках распреде-

ления дат, то используется уже байесовская модель [Энговатова, Зайцева, Черкинский, 2020]. Более сложная гипотеза использует стратиграфическую информацию, устанавливая соотношения между возрастом образцов [Bayliss, Ramsey, 2004]. Вариантом такой модели является использование дендрохронологической информации, позволяющей установить точный временной интервал между отдельными датировками [Ramsey, 2008] (в терминах OxCal такая модель именуется D-sequence (D-последовательность). Третья модель учитывает глубину залегания образцов и строит априорную модель в виде последовательности [Ramsey, 2008]. Особенno часто такое моделирование используется в геохронологии.

Исследуем вопрос, насколько применение байесовской статистики позволяет уменьшить ошибки. Возьмем два модельных набора данных сгенерированных по следующим правилам: взят одинаковый радиоуглеродный возраст 1000 ± 20 , к нему добавлен случайный сдвиг в 100 лет и одна дата из набора взята существенно выбивающаяся из гипотезы: 500 ± 20 . В одном наборе 9 дат в другом 25. На гистограмме на рис. 1 сверху отображены полученные случайные наборы.

Правила выбора модельного набора продиктованы следующими соображениями: радиоуглеродная data и статистическая ошибка AMS, указываемая для измерений, подсчитывается с учетом привязки к двум стандартным концентрациям. Вместе с каждой группой образцов производится измерение концентрации радиоуглерода для калибровочного современного образца и образца без радиоуглерода, прошедших все те же стадии обработки. Это позволяет исключить внесение направленного сдвига концентрации

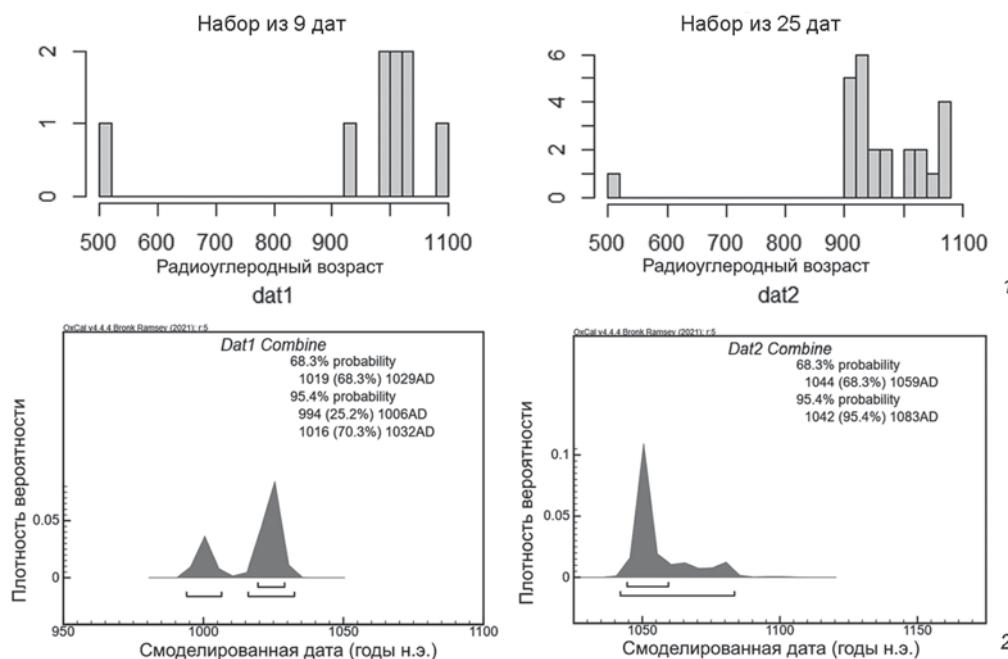


Рис. 1. Результат байесовского моделирования даты на основе модели анализа выбросов для набора 1 (dat1) и набора 2 (dat2).

1 – гистограммы для тестовых распределений наборов дат; 2 – результаты байесовского моделирования с гипотезой равного возраста.

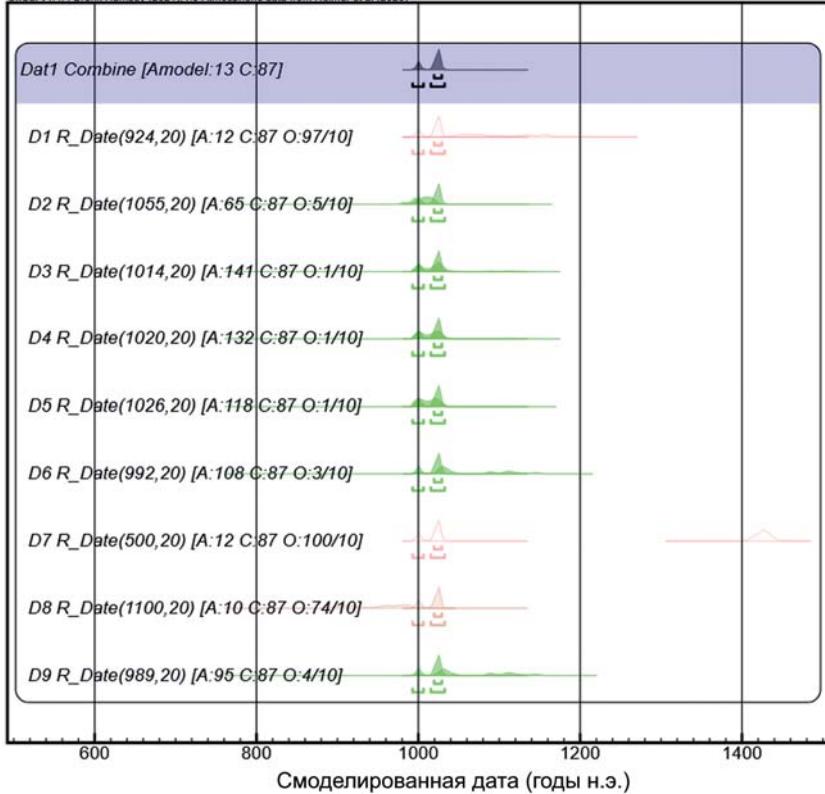


Рис. 2. Отображение результатов моделирования для каждой из дат набора 1.

на этапах обработки проб и измерения. На основе полученных для стандартных образцов измерений и величины набранной статистики для измеряемого образца вычисляется значение радиоуглеродного возраста и ошибка измерений σ [Introduction...]. Случайная ошибка в 100 лет на фоне указанного стандартного отклонения (σ) в 20 лет большая величина, которая моделирует неизвестную, т.е. не учитываемую при измерении, ошибку. Наличие такой ошибки приведет к тому, что при попытке использовать стандартные методы объединения (конъюнкции) данных как относящихся к одному событию для того, чтобы данные удовлетворяли критерию достоверности χ^2 , потребуется добавить к ним фактическую ошибку, оценив дисперсию имеющегося распределения. Такой анализ возможен средствами OxCal применением команды $R_Combine([], \sigma_{\text{факт}})$.

При таком объединении ошибка получается, конечно же, существенной. Хотя для больших наборов данных (сотни дат) это оправданный путь, т.к. при объединении при большой статистике итоговая ошибка будет убывать как \sqrt{n} , возможен альтернативный подход, использующий байесовское моделирование с априорной гипотезой равенства календарного возраста.

Особенно это актуально в случае, если есть некоторая, независимая от радиоуглеродных дат, привязка к возрасту, которую таким образом можно учесть. Для этого также можно воспользоваться средствами OxCal, где объединение дат уже после калибровки

выполняется командой $Combine$. При этом, однако, нет возможности прямо указать дополнительную ошибку распределения, поэтому требуется модифицировать модель, добавив к датам информацию, что кроме ошибки измерений есть дополнительная и на основе этой информации ввести веса, с которыми учитывать датировки. Такая модель была внедрена в программу OxCal и представлена в работе [Christen, 1994] и [Ramsey, 2009b]. Модель, вкратце, состоит в следующем: у измерения даты есть дополнительная ошибка, распределенная в соответствии с распределением Стьюдента (т.е. она убывает медленнее нормального распределения). Показатель распределения мы не знаем, изначальные его границы определяем как весь диапазон радиоуглеродного датирования. Учитываем также, что измерение может оказаться смещенным от правильного времени на существенную величину, введя вероятность выброса – т.е.

того, что какие-то датировки будут существенно выделяться на фоне остальных, введя некоторую начальную вероятность такого события. Ее можно оценить из данных, но не рекомендуется ставить ее ниже 5 %, чтобы не вызвать проблем со сходимостью модели: у нас в каждом наборе одна такая датировка, так что для первого набора можно брать 10 %, а для второго 5 %. Далее применяем байесовское MCMC-моделирование* распределения вероятностей и находим наиболее удовлетворяющие нашему набору данных апостериорные распределения. Описание модели языком CQL2 (OxCal) для первого набора приведено ниже.

```

Outlier_Model(<<TScaled>>, T(5), U(0,4), >>t);
Combine(<<EquTimeModel>>)
{
  R_Date(<<D1>>, 924,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D2>>, 1039,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D3>>, 1014,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D4>>, 1020,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D5>>, 1026,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D6>>, 992,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D7>>, 500,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D8>>, 1100,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
  R_Date(<<D9>>, 989,20){Outlier(<<TScaled>>, 0.1);};
}

```

* Monte Carlo Markov chain (метод Монте-Карло с цепочками Маркова).

Результаты моделирования для обоих наборов данных приведены на рис. 1, 2.

На рис. 2 показаны отображаемые в выводе OxCal для первого набора апостериорные вероятности того, что в соответствии с моделью данные являются выбросом. Видно, что дата D7 (внесенная в набор дата 500 ± 20) признана ошибочной со 100 % вероятностью. Еще две даты: D1 (924 ± 20) и D8 (1100 ± 20) отмечены как ошибочные с вероятностью 97 и 74 % соответственно. Эта вероятность дает вес, с которой при объединении будут учитываться соответствующие данные.

Указанный подход к анализу датировок с ошибками неясной величины можно применять и в случае многофазных моделей, т.е. моделей использующих стратиграфическую информацию [Bayliss, Ramsey,

2004]. Подготовим модельный ряд, состоящий из следующих радиоуглеродных дат: фаза 1 – три даты 1200 ± 20 , фаза 2 – девять дат 1000 ± 20 про которые мы знаем, что возраст должен быть одинаков и еще 3 даты 1000 ± 20 , относящихся к этому же слою, и фаза 3 – три даты 800 ± 20 . Мы знаем расположение во времени фаз и обладаем дополнительной информацией, что во второй фазе часть датировок относится к одному и тому же событию. Ко всем датам добавим унитарно распределенную в интервале $-100 \div 100$ лет случайную добавку, моделирующую внесение неизвестной нам и большой, относительно статистической, ошибки.

Результаты моделирования простой трехфазной модели (три даты – фаза I Sum, 12 дат – фаза II Sum, 3 даты – фаза III Sum) показана на рис. 3, 1. Именно

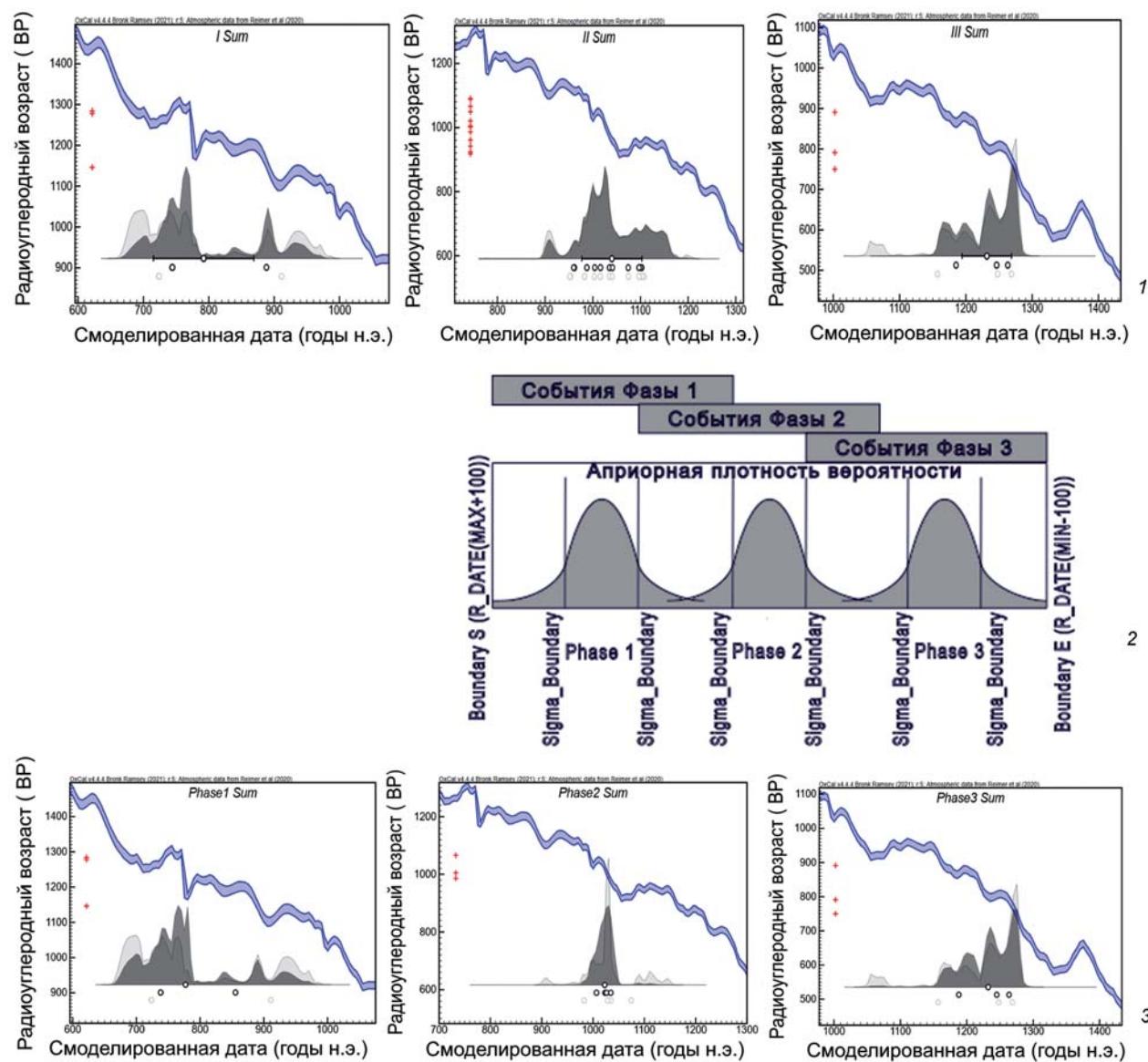


Рис. 3. Результаты моделирования возраста для набора 3.

1 – для простой трехфазной модели; 2 – для модели с нормально распределенной внутри фазы вероятностью; 3 – результаты байесовского моделирования с учетом особенностей модели.

такая модель по умолчанию применяется при анализе связанных групп событий. При этом события внутри одной группы полагаются независимыми [Чечушков, Молчанова, Епимахов, 2020].

Видно, что суммарная вероятность определяется нашей внесенной ошибкой. В целом это понятно: в данной модели нет серьезно связывающих даты условий. Для улучшения качества моделирования нужна дополнительная информация. Условия генерации тестового набора дают одно существенное условие. Для реальных данных аналогичной силы ограничения можно вынести из, например, глубины нахождения образцов, или из дендрохронологического анализа части из них в комплексе с контекстом. Для рассматриваемых тестовых данных это условие, что каждая фаза относится к своему, довольно узкому диапазону. В модели это можно учесть, введя для каждой фазы нормальное распределение вероятности с неопределенными границами (рис. 3, 2).

Кроме того, используя описанный ранее анализ выбросов во временной области, введем в модель и объединение датировок. Результаты обработки дат в соответствии с описанной моделью показаны на рис. 3, 3.

Достоверность анализа

При байесовском МCMC-моделировании для каждого шага контролируется соответствие получаемой апостериорной вероятности априорной модели, так что, как уже указывалось, в случае успешного моделирования будет найдено наиболее удовлетворяющее модели распределение вероятности возраста. Выводятся индексы согласия временных распределений и модели: общий индекс согласия модели с данными A_{model} , индекс согласия для каждой даты A (показывающий вышло ли смоделированное распределение за границы дисперсии исходного) и кумулятивный индекс согласия $A_{overall}$, показывающий общее согласие для всех индивидуальных индексов. Низкий уровень согласия (меньше 60 %) модели указывает что модель не соответствует данным [Ramsey, 2009a]. Несоответствие части индивидуальных индексов вполне может вызываться наличием смещений в датировках, однако большое количество несогласованных датировок указывает на проблемы с моделью. Все это верно для всех моделей, кроме модели выбросов – outlier, для которой низкие общие индексы показывают на высокое количество данных, воспринимающихся как выброс, а низкий индивидуальный индекс показывает вероятность, что данное измерение с точки зрения модели является выбросом. В силу этого, качество этой модели требуется контролировать по апостериорному распределению вероятности ошибки и интервалу, получаемым после анализа [Ramsey, 2009b]. И то и другое должно иметь быстрый спад примерно на размере дисперсии, в противном случае модель требует изменения.

Заключение

Развитие методов байесовского моделирования дало мощный инструмент для анализа хронологии археологических образцов, позволяя для получаемых радиоуглеродных дат учет дополнительной информации, полученной стратиграфическими методами либо при помощи других методов абсолютной датировки, путем конъюнкции данных, построения однофазных (учет внешних временных ограничений) или многофазных (учет стратиграфической информации) априорных моделей. В работе показаны возможности подавления «неучтенных» в радиоуглеродных датировках временных ошибок при помощи добавления в априорную модель анализа выброса данных средствами OxCal. На примере сгенерированных наборов со случайной ошибкой продемонстрировано как можно получить модель с большой эффективностью даже на относительно малых наборах дат с большой неучтенной ошибкой.

Благодарности

Исследование проведено в рамках проекта НИР ИАЭТ СО РАН № FWZG-2025-0009 «Центральная Азия в каменном веке: культура, хронология, палеоэкология».

Список литературы

- Арсланов Х.А.** Радиоуглерод: Геохимия и геохронология. – Л.: Изд-во Ленинград. гос. ун-та, 1987. – 300 с.
- Кулькова М.А.** Радиоуглерод (^{14}C) в окружающей среде и метод радиоуглеродного датирования: Учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во Рос. гос. педагог. ун-та им. А.И. Герцена, 2011. – 40 с.
- Растигеев С.А., Гончаров А.Д., Клюев В.Ф., Константинов Е.С., Кутнякова Л.А., Пархомчук В.В., Петрожицкий А.В., Фролов А.Р.** Ускорительный масс-спектрометр с селекцией ионов в высоковольтном терминале // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2016. – Т. 13, № 7. – С. 1438–1443.
- Чечушков И.В., Молчанова В.В., Епимахов А.В.** Абсолютная хронология поселений позднего бронзового века Каменный Амбар и Устье I в Южном Зауралье: возможности байесовской статистики // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. – 2020. – № 2 (49). – С. 5–19. – doi:10.20874/2071-0437-2020-49-2-1
- Энговатова А.В., Зайцева Г.И., Черкинский А.В.** Датировка разгрома Ярославля по данным радиоуглеродного датирования // Радиоуглерод в археологии и палеоэкологии: прошлое, настоящее, будущее. – СПб.: Изд-во ИИМК РАН, 2020. – С. 114–118. – doi:10.31600/978-5-91867-213-6
- Bayliss A., Ramsey C.B.** Pragmatic Bayesians: a Decade of Integrating Radiocarbon Dates into Chronological Models // Tools for constructing chronologies: tools for crossing disciplinary boundaries / eds. C.E. Buck, A.R. Millard. – London: Springer, 2004. – P. 24–41. – doi:10.1007/978-1-4471-0231-1_2

Christen J.A. Summarizing a set of radiocarbon determinations: a robust approach // *J. of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*. – 1994. – Vol. 43, No. 3. – P. 489–503. – doi:10.2307/2986273

Introduction to Radiocarbon Determination by the Accelerator Mass Spectrometry Method [Электронный ресурс]. // Beta analytics – URL: <https://www.radiocarbon.com/PDF/AMS-Methodology.pdf> (дата обращения: 31.09.2025).

Ramsey C.B. Bayesian analysis of radiocarbon dates // *Radiocarbon*. – 2009a. – Vol. 51, No. 1. – P. 337–360. – doi:10.1017/S0033822200033865

Ramsey C.B. Dealing with outliers and offsets in radiocarbon dating // *Radiocarbon*. – 2009b. – Vol. 51, No. 3. – P. 1023–1045. – doi:10.1017/S0033822200034093

Ramsey C.B. Deposition models for chronological records // *Quaternary Science Reviews*. – 2008. – Vol. 27, iss. 1–2. – P. 42–60. – doi:10.1016/j.quascirev.2007.01.019

Ward G.K., Wilson S.R. Procedures for comparing and combining radiocarbon age determinations: a critique // *Archaeometry*. – 1978. – Vol. 20, No. 1. – P. 1–31. – doi:10.1111/j.1475-4754.1978.tb00208.x

Weninger B., Edinborough K., Clare L., Jöris O. Concepts of probability in radiocarbon analysis // *Documenta Praehistorica*. – 2011. – Vol. 38. – P. 1–20.

Society Series C: Applied Statistics. Oxford: Oxford Univ. Press, 1994. Vol. 43, No. 3. P. 489–503. doi:10.2307/2986273

Engovatova A., Zaiseva G., Cherkinsky A. The date of the Yaroslavl defeat on base of the radiocarbon dating. In *Radiouglerod v arkheologii i paleoekologii: proshloe, nastoyashchee, budushchee*. St. Petersburg: IIMK RAS Publ., 2020. P.114–118. (In Russ). doi:10.31600/978-5-91867-213-6

Introduction to Radiocarbon Determination by the Accelerator Mass Spectrometry Method. URL: <https://www.radiocarbon.com/PDF/AMS-Methodology.pdf> (Accessed:31.09.2025).

Kulkova M.A. Radiouglerod (^{14}C) v okruzhayushchey srede i metod radiouglerodnogo datirovaniya: Uchebno-metodicheskoe posobie. St. Petersburg: Gertsen Russian State Pedagog. Univ. Press, 2011. 40 p. (In Russ).

Ramsey C.B. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009a. Vol. 51, No. 1, P. 337–360. doi:10.1017/S0033822200033865

Ramsey C.B. Dealing with outliers and offsets in radiocarbon dating. In *Radiocarbon*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009b. Vol. 51, No. 3. P. 1023–1045. doi:10.1017/S0033822200034093

Ramsey C.B. Deposition models for chronological records. In *Quatern. Sci. Reviews*. Amsterdam: Elsevier Publ., 2008. Vol. 27, Iss. 1–2. P. 42–60. doi:10.1016/j.quascirev.2007.01.019

Rastigeev S.A., Goncharov A.D., Klyuev V.F., Konstantinov E.S., Kutnyakova L.A., Parkhomchuk V.V., Petrozhitskii A.V., Frolov A.R. Accelerator mass spectrometer with ion selection in high-voltage terminal. In *Physics of Particles and Nuclei Letters*. Road Town: Pleiades Publ., 2016. Vol. 13, No. 7. P. 923–926.

Ward G.K., Wilson S.R. Procedures for comparing and combining radiocarbon age determinations: a critique. *Archaeometry*. Hoboken: Wiley-Blackwell Publ., 1978. Vol. 20, No. 1. P. 19–31. doi:10.1111/j.1475-4754.1978.tb00208.x

Weninger B., Edinborough K., Clare L., Jöris O. Concepts of probability in radiocarbon analysis. *Documenta Praehistorica*, Ljubljana: Univ. of Ljubljana Press, 2011. Vol. 38, P. 1–20.

Кутнякова Л.А. <https://orcid.org/0000-0002-5065-1755>

Дата сдачи рукописи: 31.08.2025 г.

Chechushkov I.V., Molchanova V.V., Epimakhov A.V. The absolute chronology of the Late Bronze Age settlements Kammenyi Ambar and Ust'ye I in the Southern Trans-Urals and its Bayesian analysis. In *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*. Yekaterinburg: Ural-Press Publ., 2020. No. 2 (49). P. 5–19. (In Russ). doi:10.20874/2071-0437-2020-49-2-1

Christen J.A. Summarizing a set of radiocarbon determinations: a robust approach. In *J. of the Royal Statistical*