

РАДИОУГЛЕРОДНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЯКУТИИ

М. И. Парфёнов



*Михаил Иванович Парфёнов,
научный сотрудник Института
мерзлотоведения
им. П. И. Мельникова СО РАН.*

Радиоуглеродный метод определения абсолютного возраста является одним из наиболее распространённых в ядерной геохронологии. Метод был разработан американским химиком Уиллардом Ф. Либби (Willard Libby) в 1946 – 1949 гг. В марте 1949 г. Уиллард Ф. Либби, Эрнст С. Андерсон и Джеймс Р. Арнольд опубликовали статью [1], в которой была показана возможность определения возраста геологических или исторических событий, случившихся сотни и тысячи лет назад, вплоть до отметок в 40 – 50 тыс. лет. При этом предложенный метод обладал достаточно высокой точностью и надёжностью.

Первая радиоуглеродная лаборатория в СССР была организована в Геохимическом институте им. В. И. Вернадского АН СССР, где применялся вначале сеточно-стенной счётчик Гейгера-Мюллера с твердым углеродом, как носителем ^{14}C , а затем и пропорциональный газовый счётчик [2]. В 1957 г. под руководством чл.-кор. АН СССР Е. И. Старика радиоуглеродные лаборатории были созданы в Ленинградском отделении института археологии и в Радиевом институте им. В. Г. Хлопина АН СССР. В этих лабораториях применялся уже сцинтилляционный метод детектирования. К 1987 г. в стране насчитывалось 30 радиоуглеродных лабораторий [2]. В настоящее время, по данным международного журнала Radiocarbon (An International Journal of Cosmogenic Isotope Research), в России всего несколько лабораторий проводят радиоуглеродное датирование, в том числе три в Москве и четыре в Санкт-Петербурге [3]. В Сибири усилиями трёх институтов Новосибирского научного центра Сибирского отделения РАН (Институт археологии и этнографии, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера и Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева) организован центр коллективного пользования «Геохронология кайнозоя», где, кстати сказать, созда-

на первая в стране установка для ускорительной масс-спектрометрии.

Следует отметить, что четвертичная геология и археология были и остаются главными областями использования радиоуглеродного метода [4]. В археологии применение независимого способа определения возраста стало поистине революционным и в значительной степени изменило существовавшие археологические концепции. Проводить серьёзные археологические работы без применения радиоуглеродного датирования в настоящее время невозможно. Широко применяется радиоуглеродный метод также в палеогеографии, палеоклиматологии, вулканологии, геокриологии, гляциологии, гидрогеологии, геофизике, океанологии, биологии, медицине и других науках. С его помощью, например, установлены хронологические этапы основных тёплых и холодных эпох за последние 40 – 50 тыс. лет [2], особенно для последних 11 тыс. лет (эпоха голоцена). Радиоуглеродный метод стал важнейшим инструментом в изучении процесса вымирания крупных млекопитающих в конце новейшего геологического периода – плейстоцена (от 2,59 млн. до 11,7 тыс. лет назад). На основе массового радиоуглеродного датирования ископаемых остатков мамонтов, шерстистых носорогов и ряда других видов животных удалось установить время и место их окончательного вымирания [4, 5]. Одним из важнейших достижений стало определение возраста костей и бивней мамонтов с о. Врангеля (Северо-Восток России): останки оказались удивительно «молодыми» – от 9000 до 3700 лет назад [6]. На сегодняшний день это самые поздние мамонты, существовавшие на Земле. Не менее интересны результаты радиоуглеродного датирования костей ископаемого гигантского оленя с рогами размахом около 4 м: его последние представители обитали на Южном Урале и в Западной Сибири вплоть до 7700 лет

назад [7]. В последнее время с помощью прямого датирования (ускорительная масс-спектрометрия) скорлупы яиц азиатского страуса полученные данные о его существовании в Монголии и Северном Китае до 8900 лет назад [8].

Измерения содержания ^{14}C в морской воде прочно вошли в практику океанологических исследований, а также в изучение грунтовых вод суши [9] и минеральных источников. Динамично развивающимся направлением можно назвать исследование содержания ^{14}C в таких объектах, как метеориты и ледники [9, 10]. Радиоуглеродный метод помогает в изучении астрофизических явлений – колебаний солнечной активности, взрывов сверхновых звезд и др. [9, 11]. Часто радиоуглерод используется как трэйсер различных природных процессов.

Исходные предположения Либби, на которых строится метод радиоуглеродного датирования, заключаются в том, что соотношение изотопов углерода в атмосфере во времени и пространстве не меняется, а содержание изотопов в живых организмах в точности соответствует текущему состоянию атмосферы. Однако, как было установлено в дальнейшем, эти предположения справедливы лишь приблизительно. Содержание изотопа ^{14}C в атмосфере зависит от многих факторов, таких как:

- интенсивность космических лучей и активности Солнца;
- состояние атмосферы и магнитосферы;
- широта местности;
- вулканическая деятельность (углерод, содержащийся в вулканических выбросах, «древний», практически не содержащий ^{14}C);
- круговорот углекислого газа в природе;
- проведение атмосферных ядерных испытаний, в результате которых в 50-х – 60-х годах XX в. был зафиксирован существенный выброс (около 0,5 т) радиоуглерода в атмосферу (бомбовый эффект) (рис. 1);
- сжигание большого количества ископаемого топлива (углерод, содержащийся в нефти, природном газе и угле – «древний», практически не содержащий ^{14}C) – так называемый эффект Зюсса, возникший с началом промышленной революции в XIX в.

Углерод, являющийся одной из основных составляющих биологических организмов, находится в земной атмосфере в виде стабильных изотопов ^{12}C (98,89%) и ^{13}C (1,11%) и радиоактивного ^{14}C , который присутствует в крайне малых количествах (около 10–10⁻¹⁰–10⁻¹²%). «Винновиками» образования ^{14}C в верхних слоях атмосферы (в основном, на высоте 12 – 15 км) являются нейтроны, образующиеся, главным образом, при расщеплении ядер атмосферных газов космическим излучением. Как известно [2, по ссылке на Lingenfelter, Ramaty, 1970 и Lal, Peters, 1967], высокоэнергетическое (первичное) косми-

ческое излучение, представляющее собой галактические и солнечные космические лучи, практически полностью состоит из положительно заряженных частиц: протонов, α -частиц и ядер более тяжелых атомов. В α -частицах и более тяжелых ядрах сосредоточена значительная часть нуклонов (протонов, нейтронов) и энергии излучения, и именно они в конечном счете ответственны за образование ^{14}C . Интенсивность первичных космических лучей на нашей планете сильно зависит от геомагнитной широты. В магнитном поле Земли заряженные космические лучи испытывают отклонение, поэтому интенсивность их минимальна на экваторе и максимальна на геомагнитных полюсах. При столкновении высокоэнергетической первичной заряженной частицы с атомами атмосферных газов происходит расщепление ядер мишени и первичной частицы, в результате которого вылетают вторичные протоны, нейтроны, заряженные и нейтральные π - и K -мезоны и гипероны. Эти высокоэнергетические частицы являются ядерно-активными компонентами и при последующих столкновениях с атомами атмосферных газов расщепляют их, образуя новые вторичные частицы. Измерения высотной зависимости интенсивности нейтронов (n) на различных широтах показали, что их максимальная интенсивность отмечается на экваторе на высоте около 15 км (давление 120 мбар), а на геомагнитных полюсах – на высоте 18,5 км (70 мбар).

Изотоп ^{14}C постоянно образуется при столкновении вторичных нейтронов от космических лучей с ядрами атмосферного азота (рис. 2):

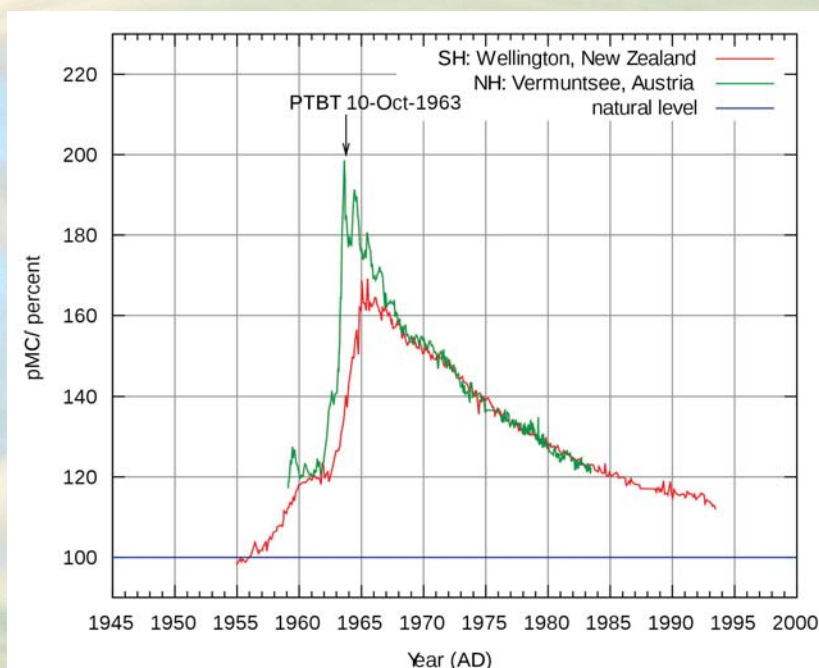
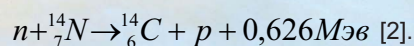


Рис. 1. Изменение атмосферной концентрации радиоуглерода ^{14}C , вызванное ядерными испытаниями в разные годы. Синим цветом показана естественная концентрация ^{14}C , зеленым – уровень радиоуглерода в Австрии (Вермунтзее), красным – уровень радиоуглерода в Новой Зеландии (Веллингтон) (<http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/welling.html>).

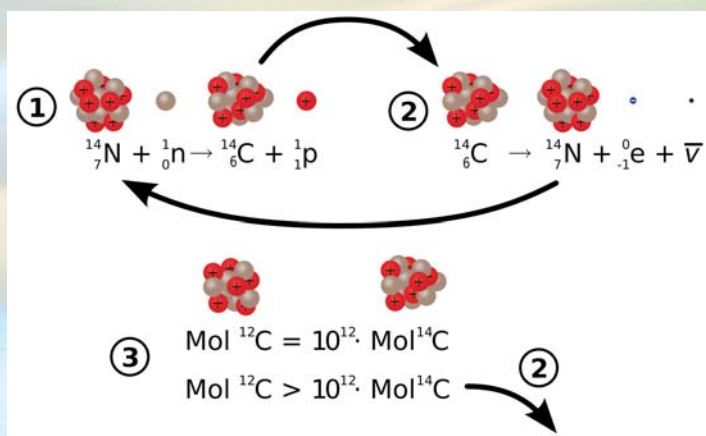
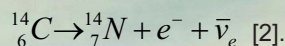


Рис. 2. Физика образования радиоуглерода ${}^{14}\text{C}$ (1), распада ${}^{14}\text{C}$ (2) и условия равновесия для живых и неравновесия для умерших организмов, в которых радиоуглерод распадается без пополнения извне (3)
 (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:C14_methode_physikalische_grundlagen.svg).

В среднем за год в атмосфере Земли образуется около 7,5 кг радиоуглерода при общем его количестве 75 т. Образование радиоуглерода на поверхности Земли вследствие естественной радиоактивности пренебрежимо мало.

Радиоизотоп углерода ${}^{14}\text{C}$ подвержен β -распаду с периодом полураспада $T_{1/2} = 5730 \pm 40$ лет:



Соотношение радиоактивного и стабильных изотопов углерода в атмосфере и биосфере Земли примерно одинаково из-за активного перемешивания атмосферы, поскольку все живые организмы постоянно участвуют в углеродном обмене, получая углерод из окружающей среды, а изотопы, в силу их химической неразличимости, участвуют в биохимических процессах практически одинаковым образом. Удельная активность углерода в живых организмах соответствует атмосферному содержанию радиоуглерода и составляет примерно 0,3 распада в секунду на 1 грамм углерода. С гибелью организма углеродный обмен прекращается. После этого стабильные изотопы сохраняются, а радиоактивный (${}^{14}\text{C}$) постепенно распадается, поэтому его содержание в останках постепенно уменьшается. Зная исходное соотношение содержания изотопов углерода в организме и определив их текущее соотношение в биологическом материале масс-спектрометрическим методом или измерив активность методами дозиметрии, можно установить время, прошедшее с момента гибели организма.

Образец углерода для измерения активности обычно вводится в жидкий сцинтиллятор либо в газ, которым наполняется пропорциональный счётчик. В последнее время для малых содержаний ${}^{14}\text{C}$ или очень небольших масс образцов (не-

сколько миллиграммов) используется ускорительная масс-спектрометрия для определения содержания ${}^{14}\text{C}$. Это, во-первых, существенно снизило возможность загрязнения образцов, так как позволило проводить их более глубокую очистку, а во-вторых, расширило область применения метода радиоуглеродного датирования на такие объекты, как отдельные зёрна злаковых, останки насекомых, углеродные включения в керамику, металлические изделия, чугун, проведение аутентификации произведений искусств, выявление подделок вин и других напитков [12]. Тем не менее основным методом в радиоуглеродном датировании остаётся спектрометрия, базирующаяся на использовании жидких сцинтилляторов и газонаполненных счётчиков. Типичный вес образца для этого метода – от нескольких граммов до десятков миллиграммов углерода, а время измерения – от одного дня до нескольких суток.

Предельный возраст объекта, который может быть точно определён радиоуглеродным методом, – около 60 000 лет. Поскольку радиоактивный распад подчиняется экспоненциальному закону, то за это время содержание ${}^{14}\text{C}$ уменьшается примерно в 1000 раз (около 1 распада в час на 1 грамм углерода).

Какие же объекты можно датировать радиоуглеродным методом? Очевидно, что остатки когда-либо живших организмов удовлетворяют условию обмена с атмосферой. Это дерево, древесный уголь, кости, торф, артефакты животного и растительного происхождения. К другим материалам можно отнести озёрные и морские осадки, почвы и даже карстовые образования – сталактиты и сталагмиты.

Для жидкосцинтилляционных установок углерод образца, необходимый для определения возраста, переводят в другое вещество, а именно в какой-либо органический растворитель (обычно в бензол). Синтез бензола производится на лабораторных химических установках (рис. 3).



Рис. 3. Химическая лаборатория для получения бензола для установки Quantulus 1220 (ИМЗ СО РАН, г. Якутск).

В бензоле растворяют сцинтиллирующую добавку. Сцинтиллятор – это вещество, которое выдает световой импульс на акт возбуждения ионизирующей частицей. Причем амплитуда импульса пропорциональна энергии частицы. Световые импульсы регистрируются специальными приборами – фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Опять-таки производится селекция по энергии. Следует отметить, что за счет некоторых технологических усовершенствований фоновые уровни для жидкосцинтилляционных спектрометров удалось заметно снизить и сделать их лучше, чем у газонаполненных счётчиков.

Для расчёта возраста образца необходимо учесть вариабельность содержания радиоуглерода в атмосфере и возможное его изотопное фракционирование. Изотопное фракционирование учитывается на стадии расчёта «радиоуглеродного» возраста, т.е. возраста, рассчитанного из измеренной активности образца. Вариабельность же атмосферного содержания радиоуглерода учитывается при калибровке. Если бы атмосфера всегда имела постоянное содержание ^{14}C , то тогда калибровка была бы не нужна. Для перехода же к календарному возрасту в календарных годах радиоуглеродный возраст подвергают калибровке. Она заключается в том, что на графике с одной кривой, где по оси X отложены календарные года, а по оси Y – радиоуглеродные, находят календарные года, соответствующие определённому радиоуглеродным (рис. 4).

В настоящее время для правильного применения метода построены калибровочные кривые, учитывающие изменение соотношения изотопов для различных эпох и географических регионов, а также проведён учёт

специфики накопления радиоактивных изотопов в живых существах и растениях. Одним из источников калибровочных данных является дендрохронология. Калибровка делается очень тщательно и подтверждается многими независимыми методами. Калибровочные кривые постоянно совершенствуются. Однако, как указывает В. Левченко [12], возможны случаи, когда калибровочная кривая не будет точно отражать атмосферное радиоуглеродное содержание для какого-либо конкретного образца. Это происходит в случаях, когда исследуемый объект формировался в непосредственной близости от сильного, но локального источника углерода с заметно смещённым изотопным балансом. Речь идёт о растениях, произрастающих вблизи источников углекислого газа. Так, для растений из крупных современных мегаполисов зафиксировано обеднение радиоуглеродом по сравнению с их «дикими» аналогами. Возможен и другой случай, когда растение произрастало рядом с природными источниками углекислого газа вулканического происхождения. Тогда естественно ожидать заметного обеднения его радиоуглеродом.

Подводя итог вышесказанному, можно отметить следующее:

- современный радиоуглеродный метод обеспечен прочной теоретической и экспериментальной базой;
- при определении возраста образца учитываются вариации содержания радиоуглерода в прошлом;
- измерение ведётся с очень высокой точностью;
- вопросы консервации объекта после его выхода из углеродного оборота хорошо изучены, и применяемые общепринятые методики позволяют минимизировать, а чаще, вообще, избежать загрязнения образца «современным» углеродом.

В настоящее время в лаборатории радиоуглеродного анализа Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН успешно запущен и используется низкофоновый жидко-сцинтилляционный спектрометрический радиометр Quantulus 1220 (производство Perkin Elmer, Inc., США) (рис. 5). Прибор предназначен для измерения предельно низких уровней альфа- и бета-активности. Область применения включает в себя радиоуглеродное датирование и исследование состояния окружающей среды, в которых требуется определение наличия малых количеств альфа- и бета-излучателей. Помимо ^{14}C и ^3H , прибор позволяет анализировать такие радиоизотопы, как ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{222}Rn и другие альфа- и бета-излучатели. Как известно, присутствие радиоактивных нуклидов в пище и окружающей среде негативно отражается на здоровье человека. Особенно это относится к стронцию-90, тритию, цезию-137. В частности, цезий-137 является одним из главных компонентов радиоактивного загрязнения биосферы. Стронций по своим химическим свойствам очень близок к кальцию, поэтому подобно ему может накапливаться в костных тканях человека. Аналогичная ситуация отме-

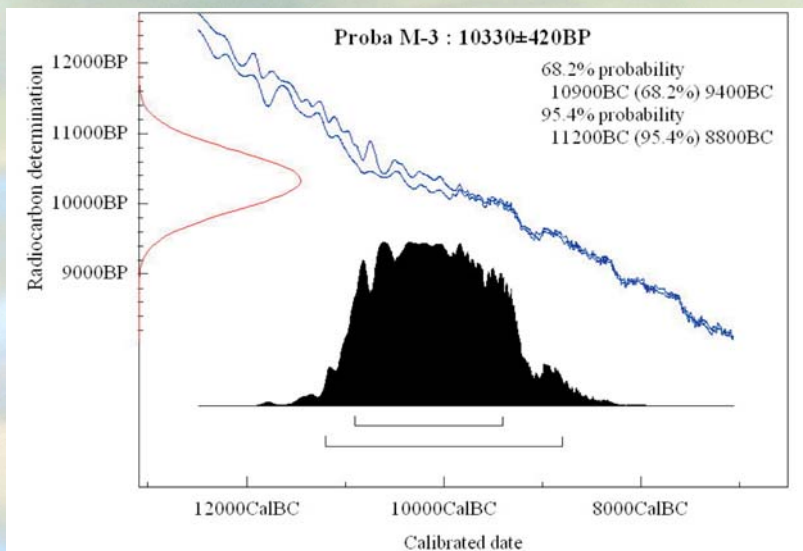


Рис. 4. Калибровочная кривая и данные определения календарного возраста аллювиальных отложений Сергеляхской террасы р. Лены на установке Quantulus 1220 Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, 2012 г., аналитик М. И. Парфёнов).

Синим цветом показаны калибровочные кривые, красным – кривая измеренного радиоуглеродного возраста с учётом погрешности (10330±420 BP, BP – Before Present, до настоящего времени), чёрным – калиброванный, календарный возраст образца с вероятностью определения 68,2 и 95% (BC – Before Christmas, до нашей эры).



Рис. 5. Общий вид спектрометрического низкофонового радиометра Quantulus 1220 (лаборатория радиоуглеродного анализа Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск).

чена и для трития, который, в силу сходства его химических свойств с водородом, легко попадает в организм человека, где становится частью химических соединений с кислородом, серой, азотом. При распаде трития и превращении его в ^3He молекула, в которую входил тритий, распадается. Проникновение трития в протоплазму клетки способно серьезно повредить генетический аппарат за счёт бета-излучения. В частности, может распаться цепочка ДНК. Исследования поведения трития в биологических объектах, свидетельствуют о его подчас тысячекратном накоплении в живых организмах и пищевых цепочках.

Уникальный по своим характеристикам прибор Quantulus 1220 позволяет измерять содержание трития в воде без дополнительной пробоподготовки на уровнях до 1 Бк/л (1 распад в секунду в литре жидкости), а стронция – на уровне 0,1 Бк/проба. Эффективность регистрации по тритию составляет 66%, по углероду – 95%. Чтобы повысить точность низкофоновых измерений, должны быть максимально учтены факторы, влияющие на сам процесс измерения. Замысел и построение системы Quantulus эффективно обеспечивают оптимизацию условий измерения и проверку правильности данных. Это достигается с помощью:

- конструкции, оптимизированной для уменьшения фона;
- измерений, основанных на методе использования нескольких многоканальных анализаторов;
- электронного подавления шумов;
- использования персонального компьютера с большой ёмкостью памяти и высокой производительностью для последующей проверки правильности процесса анализа и его оптимизации.

Quantulus 1220 имеет пассивную и активную защиту и, с точки зрения подавления фона, обладает рекордными характеристиками по сравнению с любыми жидкостно-сцинтилляционными радиометрами в мире. Измерения, которые можно проводить в обычной лаборатории с использованием этого прибора, до сих пор осуществлялись низкофоновыми радиометрами только в специальных подземных сооружениях. Например, прибор для радиоуглеродного датирования, использовавшийся ранее в Институте мерзлотоведения СО РАН, был помещен в подземную лабораторию, чтобы снизить фон от космического излучения. Сверхнизкофоновые показатели Quantulus 1220 обеспечиваются за счёт уникального сочетания активной и пассивной защиты. Мощная пассивная защита состоит из низкоактивного свинца вокруг блока детектирования с максимальной толщиной 200 мм сверху, 100 мм на боковых стенках и 150 мм внизу. Активная защита от космических лучей и фонового гамма-излучения состоит из жид-

костно-сцинтилляционного охранного детектора, который работает на антисовпадениях с основным детектором. Внешний контейнер активной защиты изготовлен из бескислородной меди, что является дополнительной пассивной защитой от внешних излучений и просматривается двумя ФЭУ по схеме совпадений. Радиометр Quantulus 1220 способен обеспечить фон по ^{14}C 0,4 имп/мин, а по тритию – 0,13 имп/мин.

Остановимся вкратце на методе LSC (Liquid Scintillation Counting), т.е. методе, основанном на работе с жидкостно-сцинтилляционными счётчиками. Для этого метода источник бета-частиц находится в непосредственной близости с жидким сцинтиллятором, что позволяет, в отличие от многих других методов, избежать потерь за счёт поглощения излучения в веществе. К тому же метод LSC имеет наиболее оптимальную (4π) геометрию. LSC счётчик способен измерять с большой точностью очень малые количества радиоактивных веществ. При этом измеряемая скорость счёта пропорциональна количеству радиоактивного вещества, находящегося в образце (т.е. его активности, или DPM – disintegrations per minute). Однако существует целый ряд эффектов, препятствующих прямому измерению активности. Эти эффекты объединяются общим термином – гашение. Образец для измерения, как правило, состоит из радиоактивного вещества, смешанного с растворителем и сцинтиллятором, так называемый измерительный коктейль. Типичным сцинтиллятором для радиоуглеродного метода является 2,5-дифенилоксазоль. Наиболее эффективными растворителями являются алкилбензолы и циклопарафины. Примечательно, что бензол, который может быть легко синтезирован из датируемого образца, также является сцинтилляционным растворителем. Для ре-

гистрации ^3H в водных образцах в качестве сцинтиллятора применяется, в частности, OptiPhase «HiSafe», Ultima Gold (PerkinElmer, Inc) и др. [13].

Бета-частицы при столкновении возбуждают молекулы растворителя, а те, в свою очередь, передают избыточную энергию молекулам сцинтиллятора, которые при этом излучают вспышку света. Световая вспышка преобразуется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) в поток фотоэлектронов – электрический импульс, который усиливается и поступает в счетчик импульсов. Все эти процессы происходят очень быстро, буквально наносекунды.

Интенсивность вспышки, или, другими словами, количество фотонов, образующихся в сцинтилляторе в результате единичного бета-распада, прямо пропорционально энергии бета-излучения. В свою очередь, количество фотоэлектронов в ФЭУ (т.е. амплитуда электрического импульса) прямо пропорционально количеству фотонов, попавших на фотокатод. Таким образом, амплитуда электрического импульса на выходе ФЭУ прямо пропорциональна энергии бета-излучения. Влияние эффекта гашения приводит к уменьшению количества фотонов, достигающих фотокатода ФЭУ, что выражается в уменьшении амплитуды импульсов и сокращении количества импульсов, зарегистрированных счетчиком. На практике это выражается в смещении энергетического спектра в область низких энергий, а также в уменьшении значения счёта. Борьба с эффектом гашения возможно, используя набор эталонов с разными уровнями гашения и подбирая эталон, наиболее близко соответствующий измеряемому образцу.

В заключение отметим, что в лаборатории радиоуглеродного анализа ИМЗ СО РАН на приборе Quantulus 1220 в последнее время получена серия радиоуглеродных дат образцов древесины, торфа, древесного детрита из различных отложений голоцена. В частности, определён радиоуглеродный возраст органического материала (древесный детрит) из аллювия Сергеляхской террасы р. Лены, глубина 11 м (объект исследования находится в подземной лаборатории ИМЗ СО РАН). Полученная дата – 10330 ± 420 BP – прекрасно согласуется с результатами предшественников: 10385 ± 150 (ИМ-964 16.02.1989, В. В. Костюкевич). Кроме того, были проведены контрольные измерения образцов древесины и торфа в лаборатории Института геохимии окружающей среды (Украина, г. Киев). Возраст древесины из повторно-жильного льда ледниковых отложений Верхоянского хребта, по нашим определениям, составил 3670 ± 90 BP. Возраст данного образца, по результатам Киевской радиоуглеродной лаборатории, – 3780 ± 90 BP. Хорошая сходимость результатов и воспроизводимость анализов двух лабораторий свидетельствуют о достоверности полученных данных.

Радиоуглеродный метод определения абсолютного возраста природных объектов используется в геохронологии, главным образом, при изучении геологического возраста мёрзлых пород и подземных льдов. Получаемые абсолютные датировки являются одной из наиболее важных составляющих в комплексных исследованиях, проводимых Институтом мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН с целью изучения эволюции криолитозоны и выполнения палеоклиматических и палеоландшафтных реконструкций окружающей среды, а также

долгосрочных прогнозов изменения климата и рельефа. Кроме решения геохронологических и геоэкологических проблем, наличие установки Quantulus 1220 в ИМЗ СО РАН позволяет существенно повысить уровень исследований в области четвертичной геологии, лимнологии, палеонтологии, радиобиологии и археологии, проводимых институтами Якутского научного центра СО РАН и другими научными организациями Якутии.

Радиоуглеродные исследования в ИМЗ СО РАН выполняются при поддержке РФФИ: проекты РФФИ 12-05-98507-р_восток_a, РФФИ 12-05-00951_a, РФФИ 12-05-97016-р_поволжье_a, РФФИ No. 11-05-00318_a.

Список литературы

1. Libby, W. F. Age determination by radiocarbon content : world-wide assay of natural radiocarbon / W. F. Libby, E. C. Anderson, J. R. Arnold // *Science*. – 1949. – Vol. 109, № 2827. – P. 227–228.
2. Арсланов, Х. А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология / Х. А. Арсланов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987.
3. Radiocarbon. An international journal of cosmogenic isotope research. – 2011. – Vol. 53, № 4. – P. 726.
4. Кузьмин, Я. В. Радиоуглеродный метод и его применение в современной науке / Я. В. Кузьмин // *Вестник Российской академии наук*. – 2011. – Т. 81, № 2. – С. 127–133.
5. Kuzmin, Y. V. The extinction of woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) and woolly rhinoceros (*Coelodonta antiquitatis*) in Eurasia : review of chronological and environmental issues / Y. V. Kuzmin // *Boreas*. – 2010. – Vol. 39, № 2. – P. 247–261.
6. Вартамян, С. Л. Остров Врангеля в конце четвертичного периода : геология и палеогеография / С. Л. Вартамян. – СПб.: Изд-во Ивана Лимбаха, 2007.
7. Stuart, A. J. Pleistocene to Holocene extinction dynamics in giant deer and woolly mammoth / A. J. Stuart, P. A. Kosintsev, T. F. G. Higham, A. M. Lister // *Nature*. – 2004. – Vol. 431, № 7009. – P. 684–689.
8. Janz, L. Dating North Asian surface assemblages with ostrich eggshell : implications for palaeoecology and extirpation / L. Janz, R. G. Elston, G. S. Burr // *J. of Archaeological Science*. – 2009. – Vol. 36, № 9. – P. 1982–1989.
9. Radiocarbon after Four Decades : An Interdisciplinary Perspective / Eds. Taylor R. E., Long A., Kra R. S. – New York–Berlin–Heidelberg : Springer-Verlag, 1992.
10. Вагнер, Г. А. Научные методы датирования в геологии, археологии и истории / Г. А. Вагнер. – М.: Техносфера, 2006.
11. Дергачёв, В. А. Применение радиоуглеродного метода для изучения природной среды прошлого / В. А. Дергачёв, В. С. Векслер. – Л.: Изд-во ФТИ АН СССР, 1991.
12. Левченко, В. Радиоуглерод и абсолютная хронология : записки на тему / В. Левченко / Интернет-ресурс: <http://hbar.phys.msu.ru/gorm/dating/wally-1.htm>.
13. Makinen, Pekka O. Handbook of Liquid Scintillation Counting / Makinen, Pekka O. Turku Institute of Technology, Department of Telecommunications, 1995. Turku.