

СЕЛЕКЦИЯ ИОНОВ В УСКОРИТЕЛЬНОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЕ ИЯФ СО РАН

В. В. Пархомчук, С. А. Растигеев

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Приводится описание особенностей ускорительного масс-спектрометра, созданного в ИЯФ для ЦКП «Геохронология кайнозоя», позволяющих существенно понизить фон при регистрации космогенного углерода ^{14}C . Приводятся результаты экспериментов по измерению фона и выделению чистого пучка радиоуглерода.

The description of the distinguishing features of the accelerator mass spectrometer created at BINP for CCU «Cenozoic Geochronology» for significant decrease of the background in the registration of the cosmogenic ^{14}C carbon is presented. The results of experiments for measurements of the background and for the clean radiocarbon beam separation are presented.

PACS: 07.75.+h

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный масс-спектрометр (УМС) предназначен для сверхчувствительного анализа изотопного состава углерода [1]. Содержание радиоактивного изотопа углерода массы 14 а.е.м. в современном объекте (растения, животные) находится на уровне 10^{-12} относительно основного изотопа. Когда объект отмирает, количество радиоуглерода уменьшается в два раза за каждые 5730 лет. Чувствительность УМС ограничена фоном «посторонних» ионов, преодолевших все степени селекции анализатора. Ионы близких масс ^{12}C , ^{13}C , ^{14}N , ^{16}O составляют основу фонового потока. Процессы рассеяния, ионизации, захвата электрона, изменения энергии при перезарядке ионов в электрическом поле при взаимодействии с остаточным газом и стенками вакуумного оборудования уменьшают возможности селекции. В концепцию созданного в ИЯФ УМС заложены дополнительные возможности по уменьшению ионного фона.

1. УМС ИЯФ

УМС ИЯФ базируется на электростатическом ускорителе тандемного типа с поворотом пучка в высоковольтном терминале [2]. Движение ионов в таком УМС представимо следующим образом. Анализируемые ионы образуются в результате бомбардировки поверхности образца ионами цезия. Выбитые с образца отрицательные ионы горизонтально ускоряются в ионном источнике до энергии инжекции (25 кэВ), далее поворачиваются

на 90° в магнитном поле и ускоряются вертикально вверх в первой ускорительной трубке к положительному потенциалу высоковольтного терминала (1 МВ). Ионы обдираются до зарядового состояния $3+$ в мишени на парах магния, затем поворачиваются на 180° электростатическим поворотом и ускоряются вниз во второй ускорительной трубке к потенциалу земли. Далее ионы поворачиваются на 90° в магнитном поле и регистрируются во времяпролетном детекторе частиц [3]. Следует отметить, что молекулярные ионы в зарядовых состояниях $3+$ и более нестабильны и сразу разваливаются, кроме того, атомы азота не образуют отрицательных ионов.

Электростатические ускорители тандемного типа являются основой большинства существующих УМС. Наиболее простая реализация тандемного ускорителя представима в виде двух ускорительных трубок, расположенных последовательно, пучок пролетает ускоритель по прямой. В нашем проекте акцентируется внимание на том, что поток фоновых частиц можно существенно снизить, используя фильтр по энергии в высоковольтном терминале (180° -й электростатический поворот). При этом фон ионов ^{14}N (масса которых слабо отличается от ^{14}C) может быть существенно подавлен данным фильтром, так как азот образуется из осколков молекул, развалившихся перед электростатическим поворотом при перезарядке, т.е. обладает меньшей энергией, чем ионы радиоуглерода. Если ионы азота не отфильтровывать после первой стадии ускорения, то на второй стадии ускорения их энергия может сравняться с энергией ионов радиоуглерода, что сделает практически невозможным их разделение в электромагнитных полях. Аналогичным образом эффективно подавляется фон углерода из молекулярных ионов $^{13}\text{CH}^-$ или $^{12}\text{CH}_2$ [4]. Изначально количество таких молекулярных ионов, выбиваемых с поверхности образца, на восемь и более порядков превосходит количество $^{14}\text{C}^-$ -ионов. Другой особенностью нашего проекта является использование мишени на парах магния в качестве перезарядной [5]. Такая мишень не ухудшает вакуум за пределами нагреваемого объема, уменьшая возможности фоновых ионов «проскочить» стадии селекции УМС.

2. СЕЛЕКЦИЯ ИОНОВ

На рис. 1 приведены типичные времяпролетные спектры для современного (1) и «мертвого» (2) углеродных образцов. Расположение основного пика (840 каналов) соответствует времени пролета ионов радиоуглерода. В качестве современного образца используется углеродная ткань, которая, как известно, производится из современной растительности. Происхождение углеродной ткани не требует подтверждающих ссылок, так как большое количество радиоуглерода в приведенном на рис. 1 спектре 1 демонстрирует тот факт, что углерод в ткани растительного происхождения. Графит МПГ используется в качестве «мертвого» образца, с достаточно малым содержанием радиоуглерода. Величина пика ^{14}C составляет $2 \cdot 10^{-3}$ в сравнении с пиком ^{14}C в современном образце, что соответствует радиоуглеродному возрасту объекта — более 50 тысяч лет (примерно девять периодов полураспада ^{14}C). Для современного образца пик радиоуглерода является доминирующим, влияние фоновых ионов незначительно. Для «мертвого» образца пики фоновых ионов соизмеримы с пиком ^{14}C , однако они существенно разнесены во времяпролетном пространстве.

На рис. 2 приводится распределение частиц в плоскости двух времяпролетных промежутков. Результаты на рис. 1 и 2 соответствуют одним и тем же экспериментальным данным. Следует отметить, что данные не характеризуют распределение плотности частиц

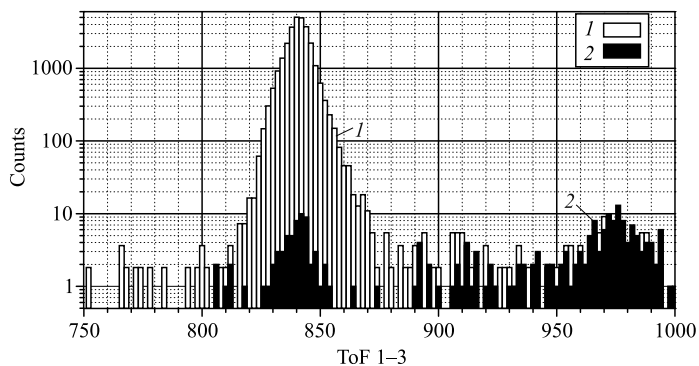


Рис. 1. Времяпролетные спектры радиоуглерода современного (1) и «мертвого» (2) углеродных образцов. Данные нормированы на ток стабильного изотопа углерода

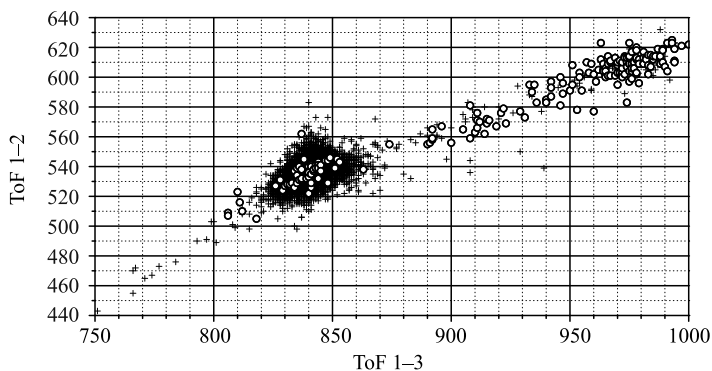


Рис. 2. Расположение ионов в двумерном времяпролетном пространстве для современного (крестики) и «мертвого» (кружки) углеродных образцов

в двумерном пространстве, а показывают расположение каждого иона. Отсутствие точек, случайным образом заполняющих пространство на рис. 2, свидетельствует о надежной работе детектора частиц и отсутствии случайных срабатываний детектора. Из рис. 2 видно, что время пролета фоновых ионов отличается по обеим осям графика, т. е. фоновые ионы отличаются по скорости от ^{14}C . Основная масса фоновых ионов обладает меньшей скоростью в сравнении с ^{14}C . Если предположить, что у ионов разных масс энергия на выходе УМС одинакова, то отличие в 1 а. е. м. от ^{14}C будет приводить к отличию во времени пролета ToF 1-3 в 30 каналов. Из спектра 1 рис. 1 видно, что интенсивность пика ^{14}C при смещении 30 каналов составляет примерно 10^{-3} от максимума. Хотя пик радиоуглерода для «мертвого» образца существенно меньше, чем для современного образца, тем не менее в обоих случаях наблюдаются соизмеримые по интенсивности пики фоновых ионов. Ясно, что данные пики фоновых ионов не являются ионами радиоуглерода другой энергии.

На рис. 3 приведен времяпролетный спектр ионов кислорода (1). При этом магнитное поле инжекционного магнита настраивалось на оптимальное прохождение ^{16}O , однако дипольным корректором по другому поперечному направлению пучок отклонялся

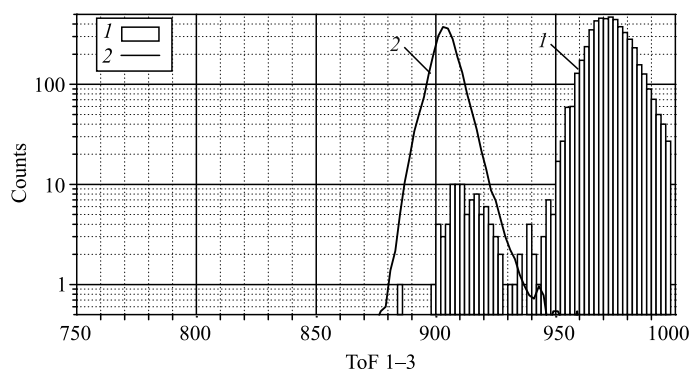


Рис. 3. Времяпролетный спектр ионного фона кислорода (1) и расположение пика ионов кислорода (2)

в сторону так, чтобы на выходе УМС интенсивность пучка уменьшилась до величины, «не опасной» для детектора частиц (несколько кГц). Остальные параметры УМС соответствовали оптимальному прохождению ^{14}C . Видны два пика, создаваемые ионами кислорода. Пик меньшей интенсивности соответствует ионам, прошедшим выпускной магнит с «правильной» энергией (4025 кэВ). В этом легко убедиться, если перестроить выпускной магнит на оптимальное прохождение $^{16}\text{O}^{3+}$, результат приведен в виде кривой 2. Основной пик спектра 1 на рис. 3 относится к ионам кислорода с уменьшенной энергией таким образом, чтобы их импульс соответствовал настроенному на оптимальное прохождение $^{14}\text{C}^{3+}$ выпускному магниту. Сравнивая рис. 1 и спектр 1 на рис. 3, можно сделать вывод, что при измерении радиоуглерода фоновые ионы с несколько большими временами пролета соответствуют, в первую очередь, ионам кислорода.

Другими близкими по массе ионами и потому формирующими заметный ионный фон являются основные, стабильные изотопы углерода ^{12}C и ^{13}C . На рис. 4 приведен времяпролетный спектр изотопов углерода. Настройка УМС производилась аналогично описанному к спектру 1 на рис. 3, с той лишь разницей, что инжекционный магнит настраивался на прохождение либо ^{12}C , либо ^{13}C -ионов. На рис. 4, спектр 1, виден пик ионов ^{13}C с «правильной» энергией. В диапазоне радиоуглерода в спектре наблюдается провал на два порядка, далее количество фоновых ионов увеличивается с уменьшением

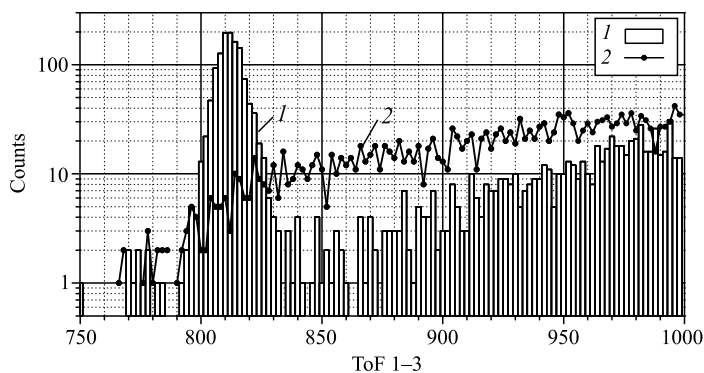


Рис. 4. Времяпролетные спектры ионного фона стабильных изотопов углерода ^{13}C (1) и ^{12}C (2)

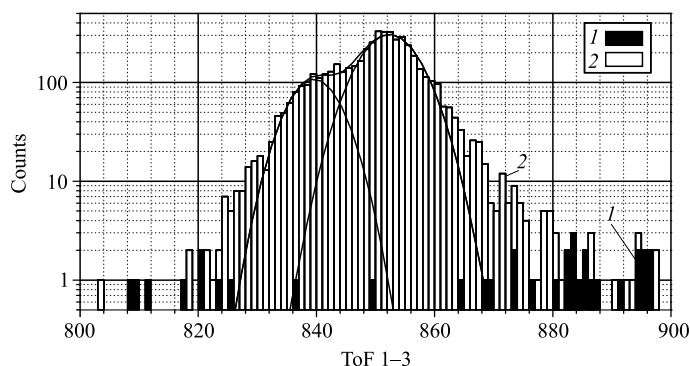


Рис. 5. Времяпролетные спектры ионного фона азота при рабочем значении поля электростатического фильтра в высоковольтном терминале (1) и при перестроенном для прохождения ионов азота (имитация отсутствия фильтра) (2)

энергии, оставаясь на порядок меньше основного пика. Сравнивая рис. 1 и спектр 1 на рис. 4, можно сделать вывод, что в спектре радиоуглерода присутствует небольшой пик ^{13}C , вклад фоновых ионов ^{13}C в диапазоне с большими временами пролета незначителен. Спектр ионов ^{12}C не имеет ярко выраженных пиков, что видно из кривой 2 рис. 4. Из данного спектра видно, что интенсивность попадания ионов ^{12}C в диапазон радиоуглерода несколько меньше, чем интенсивность ионов ^{12}C в области больших времен пролета. Поскольку на рис. 1 справа от пика радиоуглерода наблюдается провал интенсивности, можно сделать вывод, что вклад ионов ^{12}C в ионный фон при измерении радиоуглерода незначителен.

Азот не образует устойчивые отрицательные ионы. Для проверки возможного наличия ионов азота на выходе УМС производилась инжекция NH^- ионов в режим ускорения, аналогично описанному к спектру 1 на рис. 3, результат представлен на рис. 5, спектр 1. Основная масса ионов азота отфильтровывается электростатическим поворотом в высоковольтном терминале ускорителя, поскольку молекулы NH разваливаются перед поворотом. Ионы азота после развала молекул будут иметь кинетическую энергию 14/15 от кинетической энергии молекул NH . Столь существенное отличие в энергии позволяет отфильтровывать фоновые ионы азота не только в высоковольтном терминале, но даже на выходе УМС при прямолинейной конструкции тандемного ускорителя (без поворота после первой стадии ускорения). Однако процессы перезарядки во второй ускорительной трубке могут приводить к дополнительному ускорению ионов, компенсируя таким образом меньшую энергию ионов азота после первой стадии ускорения. Если кинетическая энергия азота и радиоуглерода одинакова на выходе ускорителя, то разделить их движением в электромагнитных полях практически невозможно из-за незначительной разницы в массах. Разделение возможно лишь по разнице ионизационных потерь из-за различия в зарядах ядер, при соизмеримых количествах ионов на выходе УМС. Надежность детекторов ионизационных потерь для ионов малой энергии ограничивается как необходимостью применения тонких, прочных, однородных входных окон (пленок), так и высокими требованиями на малые шумы применяемой электроники из-за слабых сигналов ионизационных потерь. В УМС ИЯФ отсеивание ионов азота производится до их попадания в оконечный детектор частиц. Тот факт, что на выход УМС могут попадать ионы азота с

кинетической энергией, равной радиоуглеродной, демонстрируется спектром 2 на рис. 5. Условия эксперимента идентичны условиям для спектра 1 рис. 5, однако поворот в высоковольтном терминале перестраивался на прохождение ионов азота (осколков NH) с зарядом 4+. На спектре 2 рис. 5 виден двугорбый пик. Правая составляющая пика соответствует большему времени пролета, чем для радиоуглерода (рис. 1), что определяется меньшей энергией азота, полученного из развалившихся молекул. Однако левая составляющая пика спектра 2 рис. 5 соответствует времени пролета ионов радиоуглерода. Данный пик определяется ионами азота, которые двигались во второй ускорительной трубке с зарядом 4+ на начальном этапе, далее перезарядились в 3+. Поскольку приобретаемая кинетическая энергия при ускорении пропорциональна заряду иона, а средний заряд был больше чем 3+ (заряд ионов радиоуглерода на второй стадии ускорения), сформировались ионы азота с идентичной с радиоуглеродом кинетической энергией. Отметим, что продемонстрированный спектром 2 на рис. 5 механизм прохода ионов азота лишь один из возможных. Без поворота в терминале во вторую ускорительную трубку будут попадать ионы со всеми возможными зарядовыми состояниями и существенным энергетическим разбросом, что увеличит прошедший фон азота по сравнению с представленным на данном рисунке. Следует добавить, что время набора статистики для спектров 1 и 2 рис. 5 одинаково. Из сравнения спектров 1 и 2 рис. 5 видно эффективное подавление фона азота фильтром по энергии в высоковольтном терминале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано эффективное подавление фона азота в УМС ИЯФ. Проведено изучение сопутствующего измерениям радиоуглерода ионного фона. Показано, что влияние ионного фона при измеряемой концентрации ионов радиоуглерода $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \sim 2 \cdot 10^{-15}$ (графит МПГ) незначительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tuniz C. et al.* Accelerator Mass Spectrometry: Ultrasensitive Analysis for Global Science // CRC. 1998. P. 18.
2. *Алиновский Н. И. и др.* // ЖТФ. 2009. Т. 79, вып. 9. С. 107.
3. *Алиновский Н. И. и др.* // ПТЭ. 2009. № 2. С. 90.
4. *Пархомчук В. В., Растигеев С. А.* // ЖТФ. 2009. Т. 79, вып. 10. С. 129.
5. *Клюев В. Ф., Пархомчук В. В., Растигеев С. А.* // ПТЭ. 2009. № 2. С. 101.