

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.384.8 + 681.518.5

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНЫМ МАСС-
СПЕКТРОМЕТРОМ ИЯФ СО РАН¹

©2024 г. Л. А. Кутнякова^{a,*}, Е. С. Константинов^b,
А. В. Петрожицкий^{a,b,c}, С. А. Растигеев^b, В. Б. Рева^b

^aИнститут археологии и этнографии

Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17

^bИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 11

^cЦентр коллективного пользования “УМС НГУ-ННЦ”

Новосибирского государственного университета

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова 2

*e-mail: bkharat.mail@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 29.03.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

Описаны основные принципы создания системы автоматизации ускорительного масс-спектрометра ИЯФ СОРАН, который был создан Институтом ядерной физики им. Будкера в рамках интеграционного проекта для нужд институтов Сибирского отделения РАН по оригинальному проекту. Установка представляет собой ионный ускоритель-танDEM с перезарядной мишенью с энергией частиц до 4 МэВ. Для управления установкой разработана распределенная система управления, что позволяет упростить модернизацию программных и аппаратных компонент комплекса. Использование среды LabVIEW для создания управляющих программ и пользовательских интерфейсов облегчает адаптацию системы и позволяет повысить эффективность работы установки.

~~Ключевые слова: ускорительный масс-спектрометр, система автоматизации ускорителя, распределенная система управления.~~

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “Ruра’23”, Новосибирск.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод ускорительной масс-спектрометрии появился в 70-х годах XX века. В нем, в отличие от метода регистрации распадов, происходит прямой подсчет атомов радиоуглерода (^{14}C) в образце. Работа ускорительного масс-спектрометра основана на формировании ионного пучка из углерода образца, последовательной очистке пучка от фоновых примесей и затем непосредственном подсчете ионов ^{14}C . Метод применим не только для изотопов углерода, с его помощью можно измерять содержание в образце и других редких долгоживущих космогенных и антропогенных изотопов, таких как ^{10}Be , ^{26}Al , ^{129}I и др. Ускорительный масс-спектрометр (УМС) ИЯФ СОРАН был создан Институтом ядерной физики им. Будкера в рамках интеграционного проекта для нужд институтов Сибирского отделения РАН по оригинальному проекту [1]. Основное назначение УМС ИЯФ СО РАН это радиоуглеродные (^{14}C) измерения образцов пользователей, которые он успешно проводит с 2011 г. [2]. После запуска ускоритель в течение 10 лет являлся единственным в России ускорительным масс-спектрометром. Установка представляет собой ионный ускоритель-тандем с перезарядной мишенью с энергией частиц до 4 МэВ, она построена по оригинальному проекту и имеет следующие отличительные параметры: тандемный электростатический ускоритель на интегрированном в структуру умножителе с напряжением +1 МВ на терминале с вертикальным расположением ускорительных трубок, перезарядка ионов C^- в состояние C^{3+} в мишени на основе пара магния, эффективное многоступенчатое подавление фоновых ионов [3] (в поворотных магнитах на входе и на выходе из ускорителя, в магниевой мишени, в 180-градусном электростатическом повороте перед второй ускорительной трубкой), времяпролетный финальный детектор, дополнительно отсеивающий фоновые ионы. Чувствительность УМС составляет $10^{-15} \text{ }^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, что позволяет использовать для анализа пробы с эквивалентной массой углерода порядка 1 мг, а это дает возможность использовать установку как для минимально разрушающих методов анализа в археологии, так и для биомедицинских исследований [4, 5]. УМС ИЯФ успешно используется для радиоуглеродных (^{14}C) измерений с 2011 года, в 2017 году установка была зарегистрирована как уникальная научная установка, а с 2020 года работает в составе совместной радиоуглеродной лаборатории Golden Valley имеющей международный индекс GV.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

С момента создания установка проходила несколько этапов, развиваясь от концепта и прототипов, подтверждающих заложенные в нее идеи, к комплексу, работающему на нужды пользователей. В силу этого для управления и сбора данных используется несколько довольно разнородных систем, часть из которых коммерчески доступные системы с широкой поддержкой, однако многие разработаны в ИЯФ и довольно уникальны, например

электроника детектора в формфакторе КАМАК, поэтому для управления установкой была выбрана концепция распределенной программной системы с относительно изолированными сегментами. Это позволяет упростить модернизацию программных и аппаратных компонент комплекса, ввиду того, что не требуется, заменяя отдельную подсистему, вносить исправления в основную часть программного кода.

Структура ускорительного масс-спектрометра показана на рис. 1. Комплекс состоит из ионного источника с селектором на 23 образца, ускорителя тандемного типа с перезарядной магниевой мишенью и электростатическим поворотом в высоковольтном терминале, масс-спектрометра с времяпролетным детектором на выходе и системы управления на базе одного компьютера архитектуры x86 под управлением ОС Windows.

Рис. 1. Структура ускорительного масс-спектрометра.

Для получения тока ионов углерода в состоянии 1- используется ионный источник распылительного типа с твердым катодом: в нем исследуемый образец является углеродным катодом, облучаемым пучком атомов цезия. Углеродные катоды предварительно химически подготовлены двухэтапным методом. На первом этапе из материала образца пользователя выделяется нужное вещество, не обменивавшееся углеродом с окружающей средой и, следовательно, несущее информацию о возрасте образца. Например, коллаген из костей или целлюлоза из древесины. На втором этапе, в процессе графитизации, из этого вещества выделяется чистый углерод. Твердый катод получается запрессовкой этого углерода в алюминиевый держатель.

Образцы вставлены в селектор, который представляет собой поворотный барабан на 23 позиции. Пучок отрицательных ионов поступает из источника в электростатический ускоритель-тандем с перезарядной мишенью. Такой тип ускорителя позволяет использовать ускоряющий промежуток для многократного ускорения постоянного тока ионов: входной пучок ускоряется положительным потенциалом 1МВ и попадает в высоковольтный терминал – изолированную платформу, находящуюся под высоким потенциалом. Там на пути пучка находится магниевая перезарядная мишень, в которой ионы “обдираются” на атомах магния, меняя свое зарядовое состояние до 3+ (тем самым уничтожая молекулярные комплексы 14-й массы, такие как ^{13}CH , $^{12}\text{CH}_2$).

Теперь положительные ионы могут снова ускориться тем же ускоряющим промежуток, а так как заряд теперь утроенный, то общая набранная ионами энергия будет составлять 4 МэВ для ускоряющего напряжения 1МВ. Электронно-оптическая система ускорителя построена так, чтобы осуществлять многократную (четырёхкратную, с учетом перезарядной мишени) фильтрацию целевых ионов в поворотных магнитах и электростатическом повороте [2]. На выходе ускорителя расположен масс-спектрометр с времяпролетным детектором,

который осуществляет дополнительную селекцию (по скорости и вектору движения) входящих ионов, позволяя вести подсчет единичных атомов нужного изотопа.

3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Управляющие блоки и блоки сбора данных установки можно разделить на три группы: первая – это блоки промышленной автоматизации серии ADAM4000, подключенные к системе управления по интерфейсу RS485 (в том числе и с оптоволоконной развязкой – для блоков, находящихся в высоковольтном терминале). Вторая группа – блоки управления и сбора данных разработки ИЯФ, использующие интерфейс связи CANbus со специализированным протоколом, так же разработанным в ИЯФ. И третья группа – это блоки управления на основе крейтов КАМАК. Для связи со всеми блоками используется один компьютер, оснащенный всеми тремя типами интерфейсных плат. Вся система управления, включая библиотеки для работы с оборудованием, построена с использованием среды LabVIEW. Структура программного обеспечения комплекса показана на рис. 2 и может быть логически разделена на четыре слоя: уровень драйверов интерфейсов, уровень библиотек для аппаратных устройств, уровень управляющего ядра с машиной состояний, управляющей функционированием приложений последнего уровня, уровня пользовательских программ, через которые оператор взаимодействует с установкой.

Рис. 2. Структура программного обеспечения УМС.

Последние три уровня полностью реализованы с использованием среды LabVIEW, для передачи информации от ядра на уровень прикладных программ используется механизм глобальных переменных среды LabVIEW. Это позволило создать простой и в то же время достаточно формализованный канал передачи и получения ключевых данных состояния. Изначально это делалось, чтобы максимально разделить собственно управляющее ядро и уровень прикладных программ, однако, эксплуатация показала, что такая архитектура позволяет обеспечить в том числе и бесперебойную модернизацию пользовательского программного обеспечения под нужды развития установки.

Механизм позволяет в том числе реализовывать путь модернизации программного комплекса через написание дополнительных приложений под конкретную задачу, что не требует длительной отладки и тестирования, и позволяет быстро реализовать требуемый функционал. Как пример, можно привести реализацию автоподстройки положения центра образца в барабане селектора, обеспечивающую компенсацию смещений при установке для получения максимального качества ионного тока при проведении измерений. Подстройка была реализована как отдельная утилита, запускающаяся оператором перед стартом измерений. Автоподстройка поочередно настраивает с помощью шагового двигателя

положение барабана, при котором достигается максимальный ток для каждой позиции, передает данные в ядро управления, и дальнейшие измерения образцов происходят уже с найденными положениями селектора. Такое архитектурное решение, с разделением уровня представления устройств и уровня прикладных программ и имплементацией некоего стандартизированного протокола для передачи данных между ними часто встречается в системах управления сложными комплексами. Однако обычно это реализуется в виде довольно сложных многопроцессорных и многосерверных систем в концепции клиент-серверного взаимодействия. Реализация логики работы комплекса при этом разделяется на критически важную часть, которая обеспечивается специальными аппаратными устройствами (типа ПЛК) с аппаратными же блокировками устройств, и часть уровня пользователя, которая уходит в состав прикладных приложений. Однако такой подход для системы управления УМС был бы, на взгляд авторов, неоправданным, как по затрачиваемым ресурсам, так и по потенциалу и, главное, требуемым ресурсам на модернизацию и развитие системы управления. Выбранный подход с выделенным отдельно ядром системы управления, сопрягающейся с прикладными программами, работающими в среде LabVIEW через механизм глобальных переменных этой среды, позволил создать гибкую, не требовательную к ресурсам систему, т.е. управление надежно работает с использованием единственного довольно слабого компьютера.

На рис. 3 слева показан типичный для обычного процесса измерения образцов интерфейс оператора. Основная часть информации показывает данные счетной статистики с детектора. Тут же сторожевой индикатор, который должен привлечь внимание оператора, если возникает (анализируемое по нескольким параметрам) несоответствие в поступающих с детектора данных. Это позволяет оператору вовремя отреагировать на сбой набора статистики с образцов, которые иначе могут обесценить и забраковать весь сеанс сбора данных. В левой части этого экрана в дополнение показываются критические параметры ионного источника, ускорителя и вакуума. Поскольку и ионный источник, и ускоритель-тандем – это технически очень сложные устройства с большим количеством высоковольтных элементов, то деструктивные процессы в них, если они начинаются, редко приводят к мгновенной потере работоспособности, намного чаще это выглядит как нарастающие токи утечек и нарастающие по частоте высоковольтные пробойи. Соответственно, данная часть с довольно детальной информацией, а не просто индикаторами – работа/ошибка, служит целям ранней диагностики проблем оператором установки. В штатной ситуации, когда все работает, эта часть не поглощает большого внимания оператора. Правый экран – экран контроля состояния ионного источника, он используется для работ по настройке установки.

Рис. 3. Экран программ набора статистики (слева) и контроля ионного источника (справа).

На рис. 4 приведены результаты проведения измерений “барабана” тестовых образцов с известной заранее концентрацией радиоуглерода. Слева показаны обработанные данные набора статистики по каналам счета атомов ^{14}C и измерения тока ^{13}C . На правом – результаты определения концентрации радиоуглерода для каждого образцы со статистической ошибкой порядка 1%.

Рис. 4. Обработанные результаты набора статистики и полученные концентрации радиоуглерода для набора тестовых образцов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начав работу с образцами пользователей в 2011 году в составе центра коллективного пользования ННЦ, установка продолжает использоваться для археологических, экологических и биомедицинских исследований, проводя радиоуглеродный анализ пользовательских образцов. В 2017 году установка была зарегистрирована как уникальная научная установка, а с 2020 года работает в составе совместной радиоуглеродной лаборатории Golden Valley, имеющей международный индекс GV, и в таком качестве успешно прошла международный кросс-тест GIRI по определению возраста археологических образцов [6].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиновский Н.И., Гончаров А.Д., Ключев В.Ф., Константинов С.Г., Константинов Е.С., Крючков А.М., Пархомчук В.В., Петриченко М.В., Растигеев С.А., Рева В.Б. // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 9. С. 107.
2. Растигеев С.А., Гончаров А.Д., Ключев В.Ф., Константинов Е.С., Кутнякова Л.А., Пархомчук В.В., Петрожицкий А.В., Фролов А.Р. // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13. № 7. С. 1438.
3. Пархомчук В.В., Растигеев С.А. // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9. № 4–5. С. 729.
4. Пархомчук Е.В., Петрожицкий А.В., Игнатов М.М., Кулешов Д.В., Калинин П.Н., Прокопьева Е.А., Кутнякова Л.А., Пархомчук В.В. // Траектория исследований – человек, природа, технологии. 2022. Т. 1. № 1. С. 61. https://doi.org/10.56564/27825264_2022_1_61
5. Rastigeev S.A., Frolov A.R., Goncharov A.D., Klyuev V.F., Konstantinov E.S., Kutnyakova L.A., Parkhomchuk V.V., Petrozhitskii A.V. // Phys. Part. Nuclei Lett. 2014. V. 11. № 5. P. 642. <http://doi.org/10.1134/S1547477114050240>
6. Petrozhitskiy A., Parkhomchuk E., Ignatov M., Kuleshov D., Kutnyakova L., Konstantinov E., Parkhomchuk V. // Radiocarbon Conference. 2024. P. 1. <http://doi.org/10.1017/RDC.2024.4>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структура ускорительного масс-спектрометра.

Рис. 2. Структура программного обеспечения УМС.

Рис. 3. Экран программ набора статистики (слева) и контроля ионного источника (справа).

Рис. 4. Обработанные результаты набора статистики и полученные концентрации радиоуглерода для набора тестовых образцов.

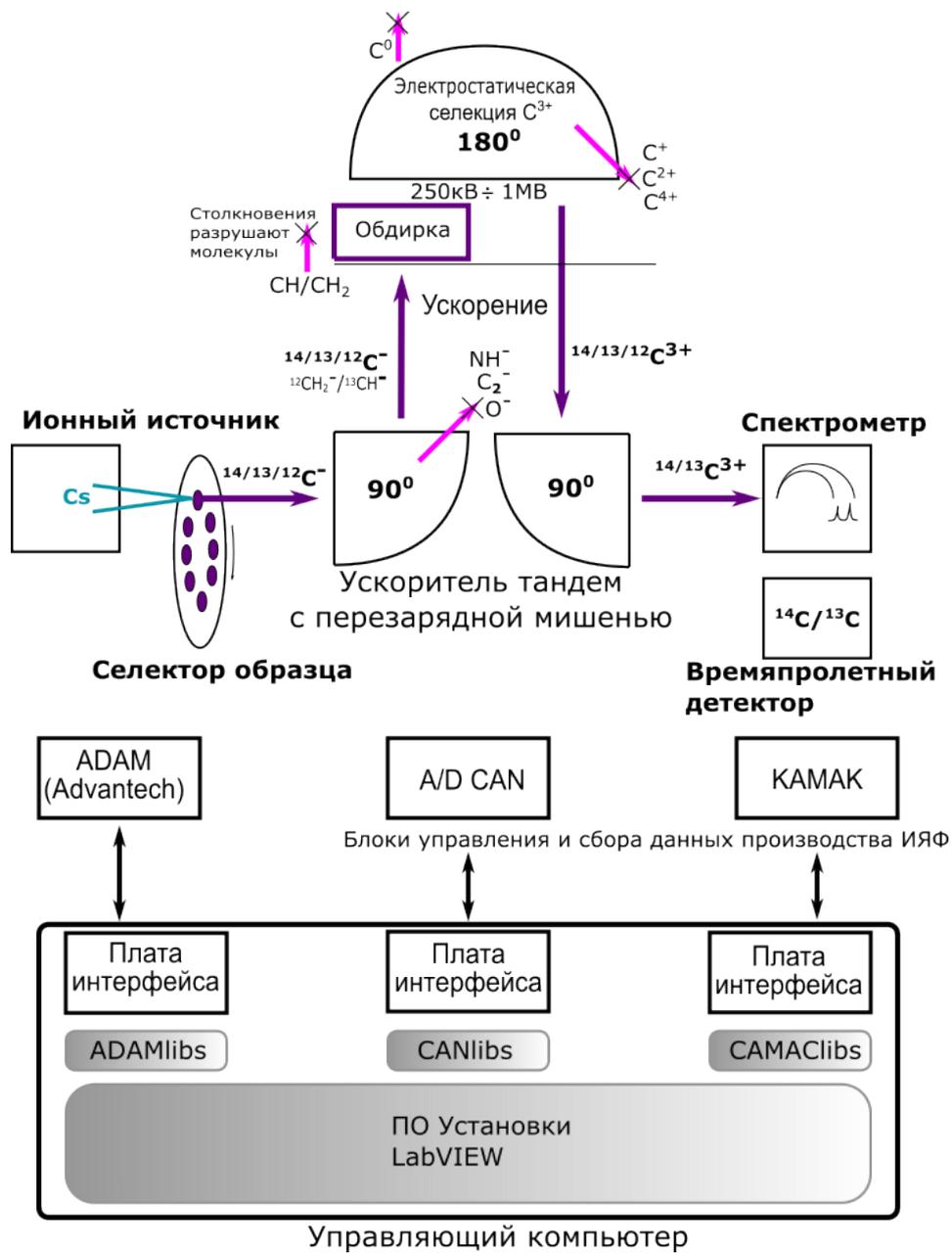


Рис. 1.

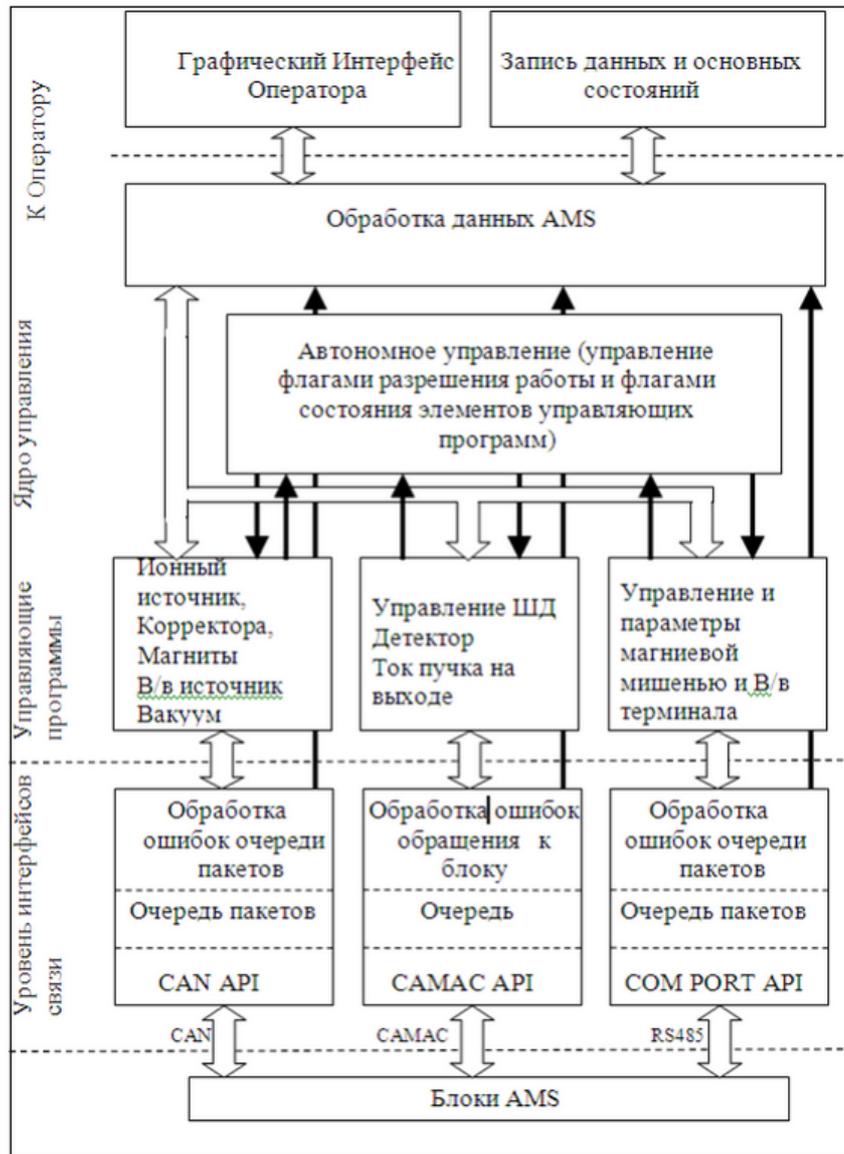


Рис. 2.

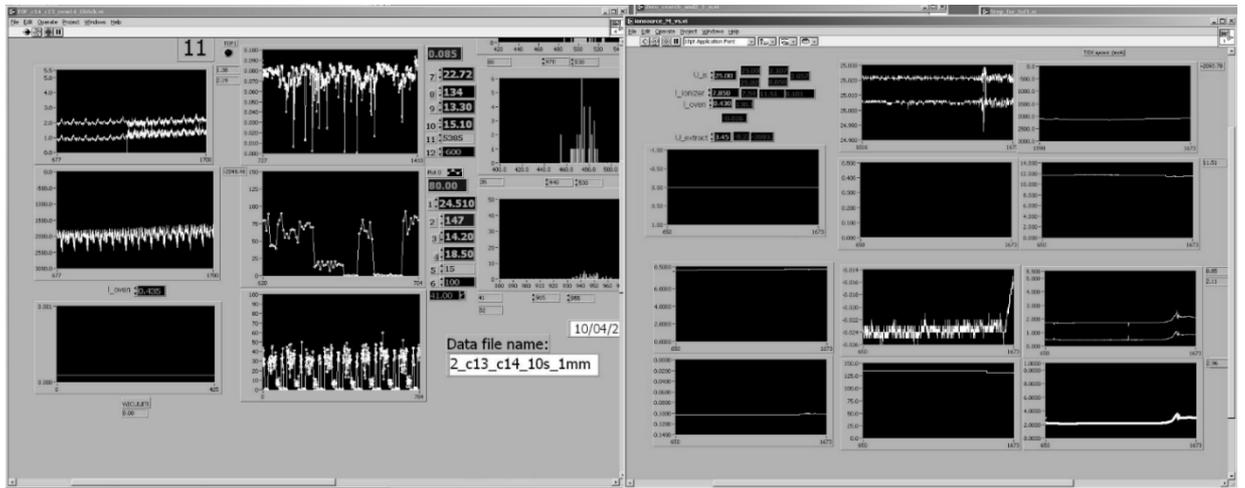


Рис. 3.

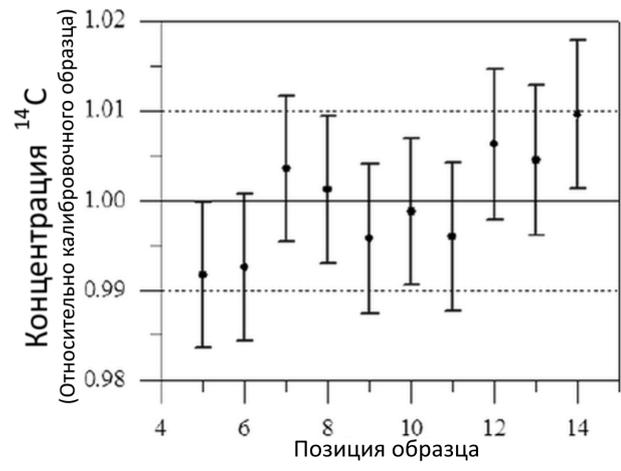
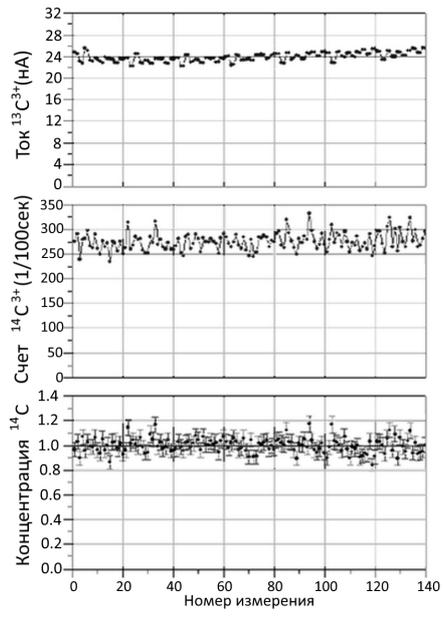


Рис. 4.

Для связи с авторами:

Кутнякова Любовь Александровна

Тел.: 8-913-902-02-94 (моб.)

E-mail: bkharat.mail@yandex.ru

E-mail: bkharat.mail@yandex.ru

~~Для связи с авторами:~~

~~Budker-IMP acceleration mass spectrometer automation system~~

~~This paper describes basic principles and functions that are applied for automatization accelerator mass spectrometer (AMS) developed by Budker institute with original project for needs of institutes of the Siberian branch of RAS within the framework of the integration project. The facility is a tandem ion accelerator with a charge exchange target with particle energies up to 4 MeV. The distributed control system using for facility control allows simplifying software and hardware components modernization. Applying the LabVIEW system for user interfaces and control programs allows for flexible adaptation for effective operation and control. BINP-AMS is used for radiocarbon (^{14}C) measurements from 2011 and was registered as the Unique Scientific Installation in 2017. From 2020 the facility is operating as part of the joint radiocarbon-AMS laboratory (short international index – GV)~~