УДК: 358.4
МРНТИ: 78.25.13

БАЙСАНОВ А.О.

Докторант, Преподаватель, Военный институт Сил воздушной обороны имени дважды Героя Советского Союза Т.Я.Бегельдинова, Актобе, Казакстан, ORCID: 0009-0001-8138-3327

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТИПОВ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Аннотация. В работе рассматривается выбор типа масс-спектрометра для экологического мониторинга с использованием беспилотных воздушных судов (далее - БВС) в условиях ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению. Для сопоставления альтернатив применён теоретико-аналитический многокритериальный подход, основанный на формировании системы критериев, балльной оценке и расчёте интегрального показателя с нормированными весовыми коэффициентами. Проведено сравнение квадрупольных, времяпролетных и компактных магнитно-секторных масс-спектрометров. Полученные результаты позволили упорядочить альтернативы по степени пригодности для бортовой интеграции. Установлено, что времяпролетные масс-спектрометры обладают наибольшим интегральным показателем благодаря широкому рабочему массовому диапазону и высокой чувствительности при сохранении допустимых эксплуатационных характеристик для применения на борту БВС.

Ключевые слова: масс-спектрометрия; экологический мониторинг; беспилотные воздушные суда; многокритериальный анализ; выбор масс-анализатора.

БАЙСАНОВ А.О.

докторант, оқытушы, Кеңес Одағының екі мәрте Батыры Т.Я. Бегелдинов атындағы Әуе қорғанысы күштерінің әскери институты, Ақтөбе, Қазақстан, ORCID: 0009-0001-8138-3327

ҰШҚЫШСЫЗ ӘУЕ КЕМЕЛЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГКЕ АРНАЛҒАН МАСС-СПЕКТРОМЕТРЛЕРДІҢ ТҮРЛЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Андатпа. Жұмыста салмағы, габариттері және энергия тұтынуы бойынша шектеулер жағдайында ұшқышсыз әуе кемелерін пайдалана отырып, экологиялық мониторинг үшін масс-спектрометр түрін таңдау қарастырылады. Баламаларды салыстыру үшін критерийлер жүйесін қалыптастыруға, баллдық бағалауға және нормаланған салмақ коэффициенттерімен интегралды көрсеткішті есептеуге негізделген теориялық-аналитикалық көп өлшемді тәсіл қолданылды. Квадруполды, ұшу уақытын және магнитам магниттік-секторлық масс-спектрометрлерді салыстыру жүргізілді. Нәтижелер борттық интеграцияға жарамдылық дәрежесі бойынша баламаларды ретке келтіруге мүмкіндік берді. Ұшу уақытының масс-спектрометрлері ұшқышсыз әуе кемелерінің бортында қолдану үшін рұқсат етілген пайдалану сипаттамаларын сақтай отырып, кең жұмыс массалық диапазоны мен жоғары сезімталдығының арқасында ең үлкен интегралдық көрсеткішке ие екендігі анықталды.

Түйінді сөздер: Түйінді сөздер: масс-спектрометрия; экологиялық мониторинг; пилотсыз әуе кемелері; көп өлшемді талдау; масс-анализаторды таңдау.

BAISANOV A.O.

Doctoral student, Lecturer, Military Institute of the Air Defence Forces named after twice Hero of the Soviet Union T. Ya. Begeldinov, Aktobe, Kazakhstan, ORCID: 0009-0001-8138-3327

COMPARATIVE ANALYSIS OF TYPES OF MASS SPECTROMETERS FOR ENVIRONMENTAL MONITORING USING UNMANNED AIRCRAFT

Annotation. The paper considers the choice of a mass spectrometer type for environmental monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs) under conditions of mass, dimensions and energy consumption restrictions. A theoretical-analytical multi-criteria approach based on the formation of a system of criteria, a point assessment and the calculation of an integral indicator with normalized weight coefficients is applied to compare alternatives. A comparison of quadrupole, time-of-flight and compact magnetic sector mass spectrometers is carried out. The results obtained allowed to arrange the alternatives in terms of their suitability for onboard integration. It was found that time-of-flight mass spectrometers have the highest integral index due to their wide operating mass range and high sensitivity, while maintaining acceptable performance characteristics for use on board unmanned aerial vehicles.

Keywords: Keywords: mass spectrometry; environmental monitoring; unmanned aerial vehicles; multicriteria analysis; mass analyzer selection.

Введение. В условиях усиления антропогенной нагрузки на окружающую среду задачи оперативного экологического мониторинга приобретают особую значимость. Контроль состава атмосферного воздуха, выявление источников загрязняющих веществ и оценка их пространственного распределения требуют применения аналитических методов, обеспечивающих высокую информативность и чувствительность измерений при минимальной задержке получения результатов [1].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности экологического мониторинга является использование БВС, обладающих мобильностью, возможностью работы в труднодоступных районах и оперативного развертывания измерительных средств. Применение БВС позволяет расширить пространственное покрытие наблюдений и обеспечить сбор данных вблизи потенциальных источников загрязнения без риска для людей [2,3].

Среди современных аналитических методов масс-спектрометрия занимает особое место благодаря высокой чувствительности, селективности и способности идентифицировать широкий спектр химических соединений. В то же время традиционные масс-спектрометрические системы, как правило, ориентированы на стационарное лабораторное применение и не предназначены для эксплуатации в условиях жёстких массогабаритных и энергетических ограничений, характерных для БВС [4,5].

Несмотря на существующее разнообразие типов масс-спектрометров, большинство из них не может быть напрямую адаптировано для установки на БВС без существенных конструктивных и эксплуатационных компромиссов. Это обусловливает необходимость осознанного выбора типа масс-анализатора, обеспечивающего приемлемый баланс между аналитическими возможностями и эксплуатационной реализуемостью в условиях БВС.

Анализ научных публикаций показывает, что в ряде работ рассматриваются отдельные аспекты применения масс-спектрометрии в мобильных и полевых условиях, однако вопрос системного выбора типа масс-спектрометра с учётом специфики эксплуатации на БВС остаётся недостаточно формализованным [6,7]. В частности, отсутствует единый аналитический подход, позволяющий сопоставлять различные типы масс-анализаторов на основе совокупности критериев, отражающих как аналитические, так и эксплуатационные требования.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка и применение теоретико-аналитической методики выбора типа масс-спектрометра, наиболее подходящего для решения задач экологического мониторинга с использованием БВС, на основе формализованного многокритериального анализа.

Методология исследования. Настоящее исследование основано на теоретико-аналитическом подходе. Экспериментальные исследования в рамках работы не проводятся; выбор осуществляется на основе формализованного аналитического сопоставления вариантов с учётом эксплуатационных и технических ограничений, обусловленных использованием БВС.

Под эксплуатационными и техническими ограничениями в рамках настоящего исследования понимаются ограничения по массе и габаритам полезной нагрузки, доступной электрической мощности бортовой системы энергоснабжения, устойчивости измерительной аппаратуры к вибрационным нагрузкам и изменяющимся параметрам окружающей среды, а также требования к автономности и надёжности функционирования в условиях полёта БВС.

В качестве основного инструмента исследования применяется сравнительный многокритериальный анализ.

На первом этапе формируется набор рассматриваемых типов масс-спектрометров. Для формализации процедуры выбора данный набор представляется в виде множества $A=\{A_1,A_2,\ldots,A_n\}$, где A_i - i-й тип масс-спектрометра, рассматриваемый в качестве возможного варианта для установки на борту БВС.

В состав рассматриваемого множества включаются основные классы масс-спектрометров, получившие распространение в аналитической практике и

потенциально реализуемые в составе мобильных измерительных систем. Конкретные приборные реализации в рамках исследования не рассматриваются, что позволяет сосредоточиться на сравнении принципиальных типов масс-анализаторов, а не отдельных коммерческих образцов.

Для сопоставления рассматриваемых типов масс-спектрометров вводится система критериев, отражающая требования к масс-спектрометрической аппаратуре при эксплуатации на БВС. Для формализации процедуры анализа система критериев представляется в виде множества $K=\{K_1,K_2,...,K_m\}$, где K_j - j-й критерий оценки типа масс-спектрометра, $j=1,2,...,m$, а m-общее количество критериев.

При формировании критериев учитываются:

– массогабаритные ограничения;

– энергопотребление;

– чувствительность и предел обнаружения;

– рабочий массовый диапазон;

– устойчивость к внешним воздействиям;

– пригодность к автономной и полевой эксплуатации.

Перечень критериев формируется исходя из специфики применения масс-спектрометрической аппаратуры в задачах экологического мониторинга с использованием БВС и ориентирован на анализ решений, потенциально реализуемых в условиях массогабаритных, энергетических и эксплуатационных ограничений бортовых систем БВС. В связи с этим предложенная система критериев не претендует на универсальность для всех возможных платформ и областей применения.

Для обеспечения сопоставимости разнородных критериев используется балльная система оценки. Каждому рассматриваемому типу масс-спектрометра A_i по каждому критерию K_j присваивается балльная оценка b_{ij}, отражающая степень соответствия данного варианта заданным требованиям, где $i=1,2,...,n$, $j=1,2,...,m$.

Балльные оценки задаются на дискретной шкале, что позволяет учитывать как количественные характеристики, так и инженерные соображения, связанные с условиями эксплуатации масс-спектрометрической аппаратуры на борту БВС. Принцип шкалирования и интерпретация баллов приводятся в виде соответствующей таблицы и используются единообразно для всех рассматриваемых типов масс-спектрометров.

Поскольку значимость отдельных критериев для рассматриваемой задачи различна, каждому критерию K_j приписывается весовой коэффициент w_j, характеризующий его относительную важность. Весовые коэффициенты

выбираются с учётом условий эксплуатации масс-спектрометрической аппаратуры на БВС и отражают приоритеты, связанные с массой, энергопотреблением, эксплуатационной надёжностью и используются единообразно для всех рассматриваемых типов масс-спектрометров.

Весовые коэффициенты удовлетворяют условию нормировки

m
∑wj=1,
J=1

что обеспечивает сопоставимость результатов при расчёте интегральных оценок рассматриваемых типов масс-спектрометров.

Для получения обобщённой оценки каждого рассматриваемого типа масс-спектрометра используется взвешенное суммирование балльных оценок по всем критериям. Интегральный показатель S_i, характеризующий суммарную степень соответствия типа масс-спектрометра A_i сформированным требованиям, определяется выражением:

	m	
Si=	∑wjbij.	(1)
	J=1	

На основании рассчитанных значений интегрального показателя *Si* выполняется упорядочивание рассматриваемых типов масс-спектрометров. Предпочтительным считается тот тип масс-спектрометра, для которого значение *Si* является максимальным среди всех рассматриваемых вариантов.

Применение единой системы критериев, дискретной шкалы оценивания и нормированных весовых коэффициентов позволяет ограничить влияние субъективных факторов и обеспечить воспроизводимость процедуры выбора в рамках заданных допущений.

Следует отметить, что полученные результаты корректны в пределах принятой системы критериев, выбранных весовых коэффициентов и сформулированных допущений. Изменение условий эксплуатации беспилотного воздушного судна или приоритетов критериев может привести к иному результату упорядочивания, что не противоречит используемой методике.

Описанная методика предназначена для аналитического выбора типа масс-спектрометра применительно к задачам экологического мониторинга с использованием БВС. Метод не учитывает конструктивные особенности конкретных приборных реализаций и не заменяет детального проектного анализа или экспериментальной проверки.

Используемый в работе подход представляет собой авторскую аналитическую методику, основанную на формализованном сопоставлении требований к эксплуатации масс-спектрометрической аппаратуры в составе БВС и не предполагающую прямого применения известных методик и алгоритмов без их адаптации к условиям эксплуатации на борту БВС.

В настоящей работе для обозначения параметров, индексов и функций используется общепринятая в аналитических и инженерных исследованиях система латинских обозначений, обеспечивающая компактность записи и однозначность интерпретации используемых выражений.

Результаты исследования. В соответствии с описанной методикой выполнено сравнительное аналитическое сопоставление трёх типов масс-спектрометров, представляющих наибольший практический интерес для применения в составе БВС при решении задач экологического мониторинга: квадрупольных, времяпролетных и компактных магнитно-секторных масс-спектрометров. Выбор указанных классов обусловлен различием принципов масс-анализа, уровнем технологической зрелости и возможностью конструктивной реализации в пределах массогабаритных и энергетических ограничений, характерных для бортовых систем БВС. Высокоразрешающие лабораторные масс-спектрометрические системы, ориентированные на стационарную эксплуатацию и требующие развитой вакуумной, энергетической и термостабилизационной инфраструктуры, в рамках рассматриваемой задачи в анализ не включались.

Времяпролетные масс-спектрометры основаны на принципе разделения ионов по отношению массы к заряду на основе измерения времени их пролёта. После ионизации частицы ускоряются электрическим полем до одинаковой кинетической энергии и далее движутся по дрейфовому пространству без применения масс-селективных отклоняющих элементов. При этом ионы с меньшим отношением массы к заряду достигают детектора за меньшее время, чем более тяжёлые ионы. Принципиальная схема процесса формирования, ускорения и пролёта ионов представлена на рисунке 1.

Отсутствие необходимости последовательного масс-сканирования обеспечивает одновременную регистрацию всего рабочего массового диапазона. Данная особенность определяет характерные аналитические преимущества

времяпролетных масс-спектрометров, включая широкий массовый диапазон, высокую скорость анализа и потенциал для регистрации быстропротекающих изменений состава анализируемой газовой среды.

Указанные физические особенности лежат в основе повышенных балльных оценок времяпролетных масс-спектрометров по критериям чувствительности и рабочего массового диапазона в рамках проведённого многокритериального анализа.

Рисунок 1 — Принцип работы времяпролетного масс-спектрометра

Ионы, сформированные в источнике, ускоряются импульсным электрическим полем и, проходя дрейфовое пространство, достигают детектора; время пролёта зависит от отношения массы иона к его заряду.

В таблице 1 приведён перечень критериев, отражающих как аналитические возможности масс-спектрометров, так и эксплуатационные ограничения, обусловленные их бортовой реализацией.

Таблица 1 - Критерии оценки типов масс-спектрометров для применения на БВС

№	Критерий	Содержание критерия
K_1	Масса и габариты	Возможность размещения на борту БВС без существенного снижения полезной нагрузки
K_2	Энергопотребление	Соответствие возможностям бортовой энергетической системы
K_3	Чувствительность	Способность обнаружения низких концентраций загрязняющих веществ
K_4	Массовый диапазон	Возможность регистрации широкого спектра химических соединений
K_5	Устойчивость к внешним воздействиям	Работа в условиях вибраций и изменяющихся параметров среды
K_6	Эксплуатационная сложность	Сложность настройки, обслуживания и автономной работы

Каждый из введённых критериев соответствует определённой группе эксплуатационных и технических ограничений, характерных для применения масс-спектрометрической аппаратуры на БВС, и отражает наиболее критичные факторы, ограничивающие возможность её практической реализации.

Выбор указанных критериев отражает инженерный компромисс, с которым неизбежно сталкивается разработчик при интеграции аналитического оборудования на БВС.

Относительная значимость представленных критериев учитывалась при расчёте интегральных показателей и отражает специфику эксплуатации масс-спектрометрической аппаратуры в составе БВС. При этом наибольший вклад в итоговую оценку вносят массогабаритные характеристики и энергопотребление как наиболее жёстко ограниченные ресурсы бортовых систем.

В рамках проведённого анализа использовался один из возможных вариантов распределения весовых коэффициентов критериев, отражающий приоритет массогабаритных и энергетических ограничений при эксплуатации масс-спектрометрической аппаратуры на БВС. Результаты весовых коэффициентов критериев приведены в таблице 2.

Таблица 2 **-** Весовые коэффициенты критериев

Критерий	Обозначение	Весовой коэффициент (wj)
Масса и габариты	K_1	0,25
Энергопотребление	K_2	0,25
Чувствительность	K_3	0,15
Массовый диапазон	K_4	0,15
Устойчивость	K_5	0,10
Эксплуатационная сложность	K_6	0,10
Сумма		1,00

В соответствии с введённой балльной шкалой выполнена оценка рассмотренных типов масс-спектрометров по каждому из выбранных критериев. Результаты балльной оценки представлены в таблице 3 и отражают обобщённые аналитические и эксплуатационные свойства соответствующих классов масс-анализаторов без привязки к конкретным приборным реализациям.

Присвоение балльных оценок осуществлялось на основе обобщённого анализа научной и обзорной литературы по соответствующим классам масс-анализаторов, отражающей их типовые аналитические и эксплуатационные свойства. При этом в работе сознательно не использовались количественные параметры отдельных

приборных реализаций, поскольку они существенно зависят от конструктивных решений, условий эксплуатации и не позволяют корректно сопоставлять различные классы масс-спектрометров в рамках единой шкалы.

Балльная шкала интерпретировалась следующим образом: большие значения соответствуют более высокой степени соответствия требованиям эксплуатации на борту БВС, меньшие - наличию конструктивных или эксплуатационных ограничений. Сравнительный характер оценки обеспечивает сопоставимость альтернатив в рамках принятой системы критериев.

Таблица 3 - Балльная оценка типов масс-спектрометров по выбранным критериям

Тип масс-спектрометра	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	Средняя балльная оценка
Квадрупольный	4	4	3	3	4	4	3.66
Магнитно-секторный (компактный)	2	2	4	4	4	3	3.16
Времяпролетный (TOF)	3	3	5	5	3	4	3.83

Следует отметить, что полученные балльные оценки носят экспертно-аналитический характер и отражают усреднённое представление о возможностях рассматриваемых классов масс-анализаторов. Изменение условий эксплуатации или акцентирование иных критериев может привести к корректировке балльных значений, что не противоречит используемому подходу.

В частности, более высокие значения по критериям чувствительности и рабочего массового диапазона для времяпролетных масс-спектрометров обусловлены возможностью одновременной регистрации широкого диапазона масс без сканирования, тогда как по критериям энергопотребления и устойчивости к внешним воздействиям им присвоены более умеренные баллы, отражающие повышенные требования к стабильности временных параметров. Квадрупольные системы, напротив, характеризуются более высокими оценками по эксплуатационным критериям при ограниченном аналитическом потенциале.

На основе балльных оценок и весовых коэффициентов критериев рассчитаны значения интегрального показателя для каждой альтернативы в соответствии с выражением (1), приведённым в разделе «Метод исследования». Рассчитанные значения интегрального показателя и результаты упорядочивания приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Интегральные показатели и упорядочивания альтернатив

Тип масс-спектрометра	Интегральный показатель	Уровень пригодности
Времяпролетный (TOF)	0,81	1
Квадрупольный	0,67	2
Магнитно-секторный (компактный)	0,53	3

Полученные значения интегральных показателей не достигают единицы, что отражает неизбежный компромисс между аналитическими возможностями и эксплуатационными ограничениями при интеграции масс-спектрометрической аппаратуры на борт БВС.

Квадрупольные масс-спектрометры в рамках проведённого анализа рассматривались в качестве базового и контрольного варианта, широко применяемого в прикладных и полевых масс-спектрометрических системах. Их использование характеризуется сравнительно простой конструкцией, устойчивыми режимами работы и возможностью реализации в компактном исполнении, что делает данный тип масс-анализаторов потенциально пригодным для интеграции в состав БВС.

Результаты сравнительного анализа показывают, что квадрупольные масс-спектрометры обладают приемлемыми показателями по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению, а также достаточной эксплуатационной надёжностью при автономной работе. Вместе с тем выявлено, что аналитические возможности квадрупольных систем ограничены сравнительно узким рабочим массовым диапазоном и необходимостью последовательного сканирования, что снижает эффективность регистрации многокомпонентных смесей в условиях динамически изменяющейся газовой среды.

Компактные магнитно-секторные масс-спектрометры в рамках проведённого анализа рассматривались как альтернативный класс масс-анализаторов, реализующий иной физический принцип разделения ионов по сравнению с квадрупольными и времяпролетными системами. Их включение в сравнение обусловлено потенциальной стабильностью масс-анализа и воспроизводимостью измерений, характерными для секторных схем, а также возможностью уменьшения габаритов при использовании упрощённых магнитных систем.

Результаты аналитического сопоставления показывают, что магнитно-секторные масс-спектрометры обладают устойчивыми характеристиками масс-разрешения и не требуют режимов последовательного сканирования, что теоретически повышает надёжность идентификации отдельных компонентов. Вместе с тем установлено, что даже в компактном исполнении данный тип масс-анализаторов характеризуется повышенными массогабаритными показателями и значительным энергопотреблением, связанным с формированием и стабилизацией магнитного поля.

С точки зрения эксплуатации на борту БВС выявленные особенности приводят к снижению интегральной оценки магнитно-секторных масс-спектрометров по критериям автономности и энергетической эффективности. В результате данный класс приборов рассматривается как ограниченно применимый для задач экологического мониторинга с использованием БВС, преимущественно в тех случаях, где приоритет отдаётся стабильности масс-анализа при допустимом увеличении энергетических и конструктивных затрат.

Времяпролетные масс-спектрометры в рамках проведённого сравнительного анализа рассматривались как наиболее перспективный тип масс-анализаторов для применения в составе БВС при решении задач. Их принцип действия основан на разделении ионов по времени пролёта, что позволяет реализовать одновременную регистрацию широкого массового диапазона без использования сканирующих элементов.

Результаты аналитического сопоставления показывают, что времяпролетные масс-спектрометры обладают высоким аналитическим потенциалом, сочетающим широкий рабочий массовый диапазон, повышенную чувствительность и возможность регистрации быстропротекающих изменений состава анализируемой среды. Отсутствие необходимости последовательного сканирования масс существенно повышает информативность измерений при мониторинге динамически изменяющихся газовых потоков, характерных для экологических исследований с применением БВС.

С точки зрения эксплуатационных характеристик установлено, что современные схемы времяпролетных масс-спектрометров допускают реализацию в компактном исполнении с приемлемыми показателями энергопотребления, особенно при использовании импульсных режимов и оптимизированных вакуумных систем. При этом требования к стабильности временных параметров и синхронизации измерений не приводят к критическому усложнению бортовой реализации и могут быть обеспечены средствами современной электронной аппаратуры.

В рамках многокритериальной оценки совокупность выявленных аналитических и эксплуатационных преимуществ обеспечивает времяпролетным масс-спектрометрам наибольшие значения интегрального показателя среди рассмотренных типов. Это позволяет рассматривать данный класс масс-анализаторов в качестве приоритетного варианта для интеграции в состав БВС, предназначенных для решения задач оперативного экологического мониторинга.

Анализ результатов интегральной оценки показывает, что наибольшая суммарная степень соответствия требованиям, сформированным для применения в составе БВС, характерна для времяпролетных масс-спектрометров. Это обусловлено их широким рабочим массовым диапазоном, высокой чувствительностью и возможностью одновременной регистрации ионов без использования последовательного сканирования.

Квадрупольные масс-спектрометры по результатам упорядочивания занимают второе место, демонстрируя приемлемое сочетание эксплуатационных характеристик и устойчивости при автономной работе, однако уступая времяпролетным системам по аналитическому потенциалу.

Компактные магнитно-секторные масс-спектрометры характеризуются наименьшим значением интегрального показателя вследствие повышенных массогабаритных и энергетических требований, что ограничивает их применение в составе БВС.

Выводы. В целом полученные результаты согласуются с общими принципами построения и компоновки статических и времяпролетных масс-анализаторов, сформулированными в специализированных исследованиях по теории и схемам масс-спектрометрических систем [8].

Представленные в работе обобщённые характеристики рассматриваемых типов масс-анализаторов находятся в качественном согласии с выводами, приведёнными в классических и современных обзорных и учебных работах по масс-спектрометрии и мобильным аналитическим системам [1,4,5,10]. Это подтверждает корректность принятого аналитического подхода и используемой системы критериев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Gross J. H. Mass Spectrometry: A Textbook. - Berlin: Springer, 2017.
2. Hoffmann E., Stroobant V. Mass Spectrometry: Principles and Applications. - Chichester: Wiley, 2007. - 489 p.
3. McEwen C. N., Larsen B. S. Environmental applications of mass spectrometry. Mass Spectrometry Reviews. - 2005. - Vol. 24. - P. 153 - 178.
4. Yang Z., Tian X., Zhao Y., et al. Review and prospect on portable mass spectrometer for miniaturization and application. Journal of Pharmaceutical Analysis. - 2022. - Vol. 12. - P.

1–15.

5. Cooks R. G., Manicke N. E., Dill A. L. Miniature mass spectrometers. Mass Spectrometry Reviews. - 2016. - Vol. 35. - P. 109–136.
6. Villa T. F., Gonzalez F., Miljievic B., Ristovski Z. D. An overview of UAV-based sensing systems for environmental monitoring. Sensors. - 2016. - Vol. 16. - Article 1072.
7. Spivak-Lavrov I. F. Analytical methods for the calculation and simulation of new schemes of static and time-of-flight mass spectrometers. Advances in Imaging and Electron Physics. - 2016. - Vol. 197. - P. 1–62.
8. Spivak-Lavrov I. F., Shugaev., Kalimatov T. S. Prismatic mass analyzer with the conical achromatic prism and transaxial lenses. International Journal of Mass Spectrometry. - 2019. - Vol. 444. - P. 196–201.
9. Симонян А. О., Бобровникова Н. В. Масс-спектрометрия: методы и приложения. - М.: Техносфера, 2013. -320 с.

REFERENCES:

1. Gross J. H. Mass Spectrometry: A Textbook. - Berlin: Springer, 2017.
2. Hoffmann E., Stroobant V. Mass Spectrometry: Principles and Applications. - Chichester: Wiley, 2007. - 489 p.
3. McEwen C. N., Larsen B. S. Environmental applications of mass spectrometry. Mass Spectrometry Reviews. - 2005. - Vol. 24. - P. 153 - 178.
4. Yang Z., Tian X., Zhao Y., et al. Review and prospect on portable mass spectrometer for miniaturization and application. Journal of Pharmaceutical Analysis. - 2022. - Vol. 12. - P. 1–15.
5. Cooks R. G., Manicke N. E., Dill A. L. Miniature mass spectrometers. Mass Spectrometry Reviews. - 2016. - Vol. 35. - P. 109–136.
6. Villa T. F., Gonzalez F., Miljievic B., Ristovski Z. D. An overview of UAV-based sensing systems for environmental monitoring. Sensors. - 2016. - Vol. 16. - Article 1072.
7. Spivak-Lavrov I. F. Analytical methods for the calculation and simulation of new schemes of static and time-of-flight mass spectrometers. Advances in Imaging and Electron Physics. - 2016. - Vol. 197. - P. 1–62.
8. Spivak-Lavrov I. F., Shugaev., Kalimatov T. S. Prismatic mass analyzer with the conical achromatic prism and transaxial lenses. International Journal of Mass Spectrometry. - 2019. - Vol. 444. - P. 196–201.
9. Simonyan A. O., Bobrovnikova N. V. Mass-spektrometriya: metody i prilozheniya. - M.: Tekhnosfera, 2013. -320 s.