

УДК 520.6.07

## ЛАЗЕРНЫЙ ИОНИЗАЦИОННЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР ЛАЗМА-ЛР НА БОРТУ МИССИЙ ЛУНА-25 И ЛУНА-27

© 2021 г. А. Е. Чумиков<sup>а</sup>, В. С. Чепцов<sup>а</sup>, \*, Н. Г. Манагадзе<sup>а</sup>, **Г. Г. Манагадзе<sup>а</sup>**

<sup>а</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*e-mail: cheptov.vladimir@gmail.com

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

После доработки 07.04.2021 г.

Принята к публикации 15.04.2021 г.

Лазерно-ионизационный времяпролетный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР в составе комплекса научной аппаратуры (КНА) космических аппаратов Луна-25 и Луна-27 позволяет проводить элементный и изотопный анализ твердых образцов (реголита и пыли) с высокой точностью и высоким пространственным разрешением. Принцип работы прибора заключается в полной атомизации и ионизации вещества лазерным импульсом, разделении ионов при их свободном разлете в зависимости от их массы и заряда и последующей регистрации времени пролета ионов от мишени до детектора. Прибор имеет небольшие габариты (130 × 206 × 254 мм), массу (2.8 кг) и рабочее электропотребление (8 Вт). Чувствительность элементного анализа составляет не менее 50 атомов на миллион атомов (ppm) в одном спектре и 5 ppm при анализе 100 спектров. Научные данные, полученные с прибором ЛАЗМА-ЛР, могут быть применены для решения широкого круга задач, таких как геологическая характеристика мест посадки космических аппаратов, анализ состава лунной пыли, поиск редкоземельных элементов, самородных металлов и сплавов, определение содержания химически связанной воды в реголите. Выполнение этих задач способствует как изучению фундаментальных вопросов, связанных с определением условий формирования и эволюции Луны, так и решению ряда прикладных проблем ее освоения.

**Ключевые слова:** ЛАЗМА, лазерная ионизационная масс-спектрометрия, элементный анализ, изотопный анализ, реголит, времяпролетная масс-спектрометрия

**DOI:** 10.31857/S0320930X21060025

### ВВЕДЕНИЕ

Лазерная ионизационная масс-спектрометрия (ЛИМС) рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных методов анализа элементного, изотопного и молекулярного состава вещества в космических экспериментах (Managadze и др., 2010; 2017; Tulej и др., 2012; Riedo и др., 2013a). Это связано с относительной простотой конструкции и надежностью приборов в сочетании с достаточно высокой точностью анализа и высоким пространственным разрешением. Первым лазерно-ионизационным масс-спектрометром, включенным в состав космической миссии, был прибор ЛИМА-Д на борту аппаратов Фобос-1 и Фобос-2 (Sagdeev, Zakharov, 1989; Pellinen и др., 1990; Managadze и др., 2010). Этот прибор позволял проводить дистанционные (с расстояния до 70 м) измерения элементного и изотопного состава реголита Фобоса. Несмотря на неудачу миссий Фобос, разработка и совершенствование приборов такого типа продолжались. В результате был создан лазерный времяпролетный масс-спектрометр ЛАЗМА, обладавший

меньшей массой и размерами, чем прототип, и в то же время в 100 раз большей чувствительностью и в 2 раза большим массовым разрешением (Managadze, Shutyaev, 1993; Managadze и др., 2010).

Масс-спектрометр ЛАЗМА был установлен на борту космического аппарата (КА) Фобос-Грунт. В ходе миссии планировался анализ элементного и изотопного состава реголита Фобоса (Манагадзе и др., 2011; Managadze и др., 2010). С помощью полученных данных предполагалось провести классификацию минералов реголита Фобоса, оценить неоднородность состава реголита, исследовать изотопные аномалии, определить концентрации связанной воды и др., что внесло бы вклад в понимание происхождения и эволюции Фобоса. К сожалению, в связи с неудачей проекта Фобос-Грунт выполнить эти задачи не удалось. Тем не менее ходе лабораторной отработки и наземных предполетных испытаний прибор хорошо себя зарекомендовал, что, вместе с указанными выше достоинствами метода, привело к включению подобного масс-анализатора в состав комплексов научной аппаратуры миссий Луна-25 и

Луна-27 (Mitrofanov и др., 2011; Казмерчук и др., 2016). Новый прибор, отличающийся от прототипа модификацией некоторых узлов, получил название ЛАЗМА-ЛР.

### НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ

Применение лазерного времяпролетного масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР позволит с высокой точностью определить элементный и изотопный состав реголита в местах посадки миссий Луна-25 и Луна-27, что может быть применено для решения широкого круга научных задач. В частности, возможна геохимическая классификация лунных пород в местах посадки на основании соотношений содержаний ряда химических элементов и оксидов, включая Fe, K, Al, Mg, Ti и др. (рис. 1) (Ярошевский и др., 1980; Haskin, Warren, 1991; Ling и др., 2011). В частности, возможно разделение пород на морские и неморские на основании соотношения содержаний оксидов железа и магния, определение низко- и высокоглиноземистых морских базальтов по концентрациям оксидов алюминия, железа, магния и калия и т.д. (рис. 1). Данные об элементном составе также позволят провести идентификацию минералов в составе реголита (Neuland и др., 2014; 2016). Предполагается, что сочетание анализа в режимах ЛИМС и “мягкой” лазерной десорбции-ионизации (SoftLDI) (см. раздел Аналитические возможности) способствует более точной идентификации, однако данная методика анализа на сегодняшний день находится на этапе разработки. Немаловажной характеристикой реголита является содержание элементов, привнесенных солнечным ветром — H, C, N, He, Ne, Ar, Kr, Xe (Haskin, Warren, 1991; McKay, Ming, 1990) — содержание некоторых из них может быть установлено с помощью ЛАЗМА-ЛР. Определение указанных характеристик внесет вклад в понимание геологической истории районов мест посадки и реконструкцию внешних факторов (метеоритная бомбардировка, интенсивность солнечного ветра), воздействовавших на поверхность в течение геологического времени.

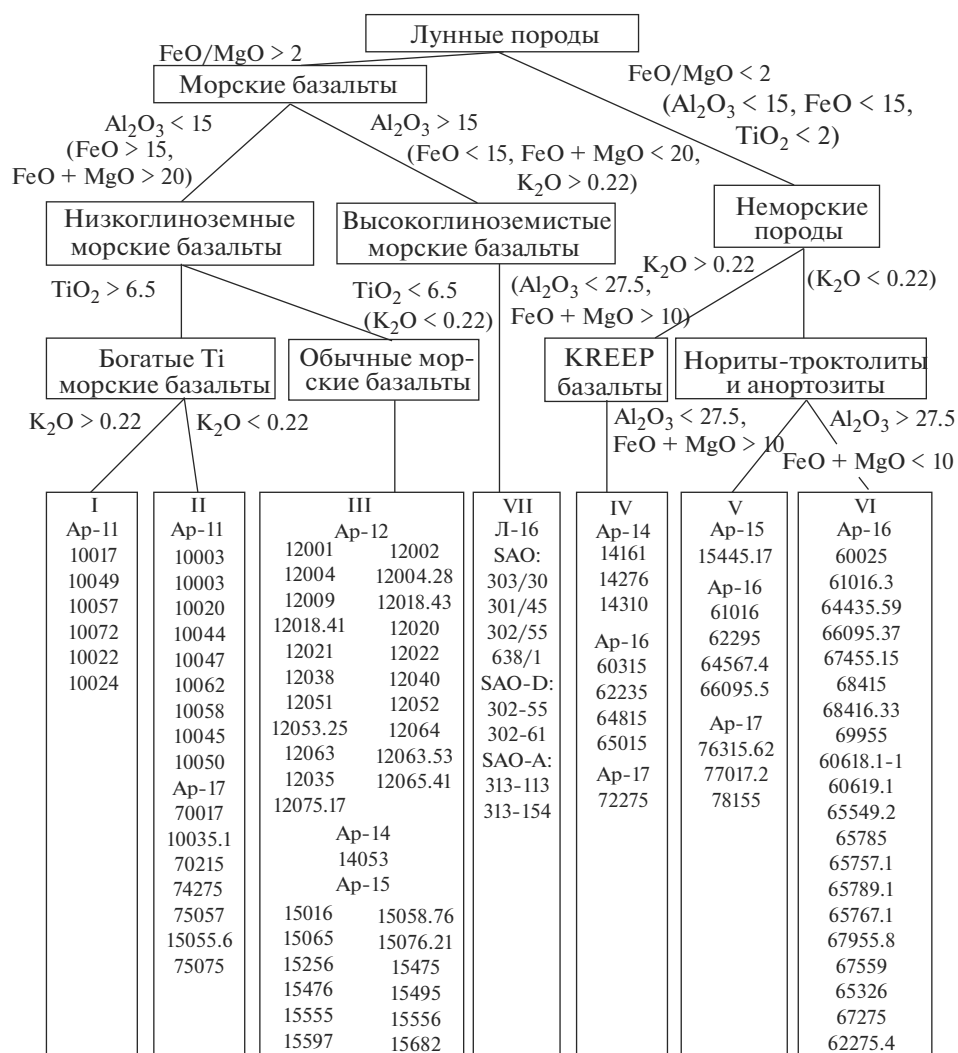
Данные об элементном составе лунных пород необходимы для исследования процессов формирования Луны. В частности, привлекает внимание ряд лабильных элементов (так называемые “*volatile mobilized elements*”, VME): F, S, Cl, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Cd, In, Te, I, Hg, Tl, Pb, Bi. Сопоставление концентраций этих элементов с таковыми в земных породах помогает понять, из какого ли материала произошло формирование Луны и Земли, и каковы были температуры их аккреции. Избыток VME позволяет приблизительно оценить количество метеоритного материала, присутствующего в образце, а соотношения концентраций элементов позволяют определить химическое разнообразие метеоритов, ответ-

ственных за этот избыток (Ganapathy, Anders, 1974; Haskin, Warren, 1991; Wolf и др., 2009).

Следует отметить, что, несмотря на довольно большое число ранее проведенных миссий к Луне, доставивших образцы реголита на Землю, а также на интенсивное дистанционное изучение Луны, данные о химическом составе реголита все еще остаются неполными. Ярким примером этого являются результаты эксперимента LCROSS, в ходе которого в составе лунных пород были обнаружены неожиданно высокие концентрации ртути (1.2%) и монооксида углерода (5.7%) (Hand, 2009; Gladstone и др., 2010). В южной полярной области Луны, где планируется посадка аппаратов Луна-25 и Луна-27 (Djachkova и др., 2017), преимущественно проводились дистанционные исследования (Tartèse и др., 2019; Pugacheva, Shevchenko, 2010). Выполнение прямых анализов химического состава лунного реголита не только даст его более детальную характеристику, но также немаловажно и для калибровки данных дистанционных измерений (Wang и др., 2017). Исследования района Южного полюса Луны свидетельствуют о содержании в породах большого количества воды (около 5%) (Tartèse и др., 2019). Однако неясно, в какой форме эта вода находится — в виде линз льда, или в смеси льда с минеральными частицами, или же в химически связанном виде в составе минералов (Tartèse и др., 2019; Anand и др., 2014). Определение количества водорода в реголите с помощью ЛАЗМА-ЛР может дать представление о количестве связанной воды, так как лед должен быстро сублимировать из образца при загрузке в грунтоприемное устройство прибора.

Большой интерес вызывают редкие для Земли или ранее неизвестные в природе минералы, самородные металлы и сплавы, обнаруживаемые на Луне (Vogatikov и др., 2001; Mokhov и др., 2018a; 2018b). Эти находки указывают на существование ранее неизвестных механизмов формирования минералов. Размеры частиц таких минералов и сплавов составляют, как правило, от сотен нанометров до десятков микрометров. С учетом диаметра лазерного пятна прибора ЛАЗМА-ЛР (30 мкм) возможно получение единичных спектров указанных минералов и сплавов без вклада окружающей минеральной матрицы в массовые пики, что может позволить обнаружить эти необычные минеральные фазы при анализе отдельных спектров.

Также существует круг задач, связанных с возможным созданием баз на Луне и ее промышленным освоением. С годами вопрос о создании базы на Луне набирает актуальность: проводятся экономические оценки, разрабатываются новые материалы и технологии, ведутся исследования возможных районов для создания такой базы (Kim, 2017; Basilevsky и др., 2019; Gerdes и др., 2018; Bon-



**Рис. 1.** Схема геохимической классификации магматических пород Луны (Ярошевский и др., 1980). На рисунке указаны критерии (концентрации и/или соотношения концентраций различных оксидов), согласно которым определяется принадлежность пород к той или иной группе, а также приведены номера образцов лунных пород, доставленных на Землю космическими миссиями и отвечающих параметрам данных групп.

neville, 2018). Сведения о содержании редкоземельных элементов в реголите Луны способствуют корректной оценке перспектив ее промышленного освоения (McLeod, Kreckler, 2017). Кроме того, данные о химическом и минералогическом составе могут быть полезны для изучения возможности выращивания растений в условиях лунной базы и создания каких-либо материалов из реголита (Mckay, Ming, 1990; Wamelink и др., 2014; 2019). Немаловажным аспектом исследований Луны с точки зрения ее освоения является изучение лунной пыли, так как она может представлять существенную опасность для техники и людей (Liu, Taylor, 2008; Lam и др., 2013). С помощью прибора ЛАЗМА-ЛР возможен элементный анализ пыли, оседающей в пассивном режиме на грунтоприем-

ное устройство после посадки космического аппарата.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Принцип работы лазерного времяпролетного масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР аналогичен таковому для прибора ЛАЗМА и заключается в следующем: образец реголита помещается на вращающемся диске на расстоянии, отвечающем фокусному расстоянию лазерного излучателя, после чего на образец производится импульсное воздействие длительностью 7 нс с плотностью мощности  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Воздействие лазера приводит к полной атомизации и ионизации вещества пробы, его сильному перегреву и, как следствие, выбросу образованных ионов в виде плазменного

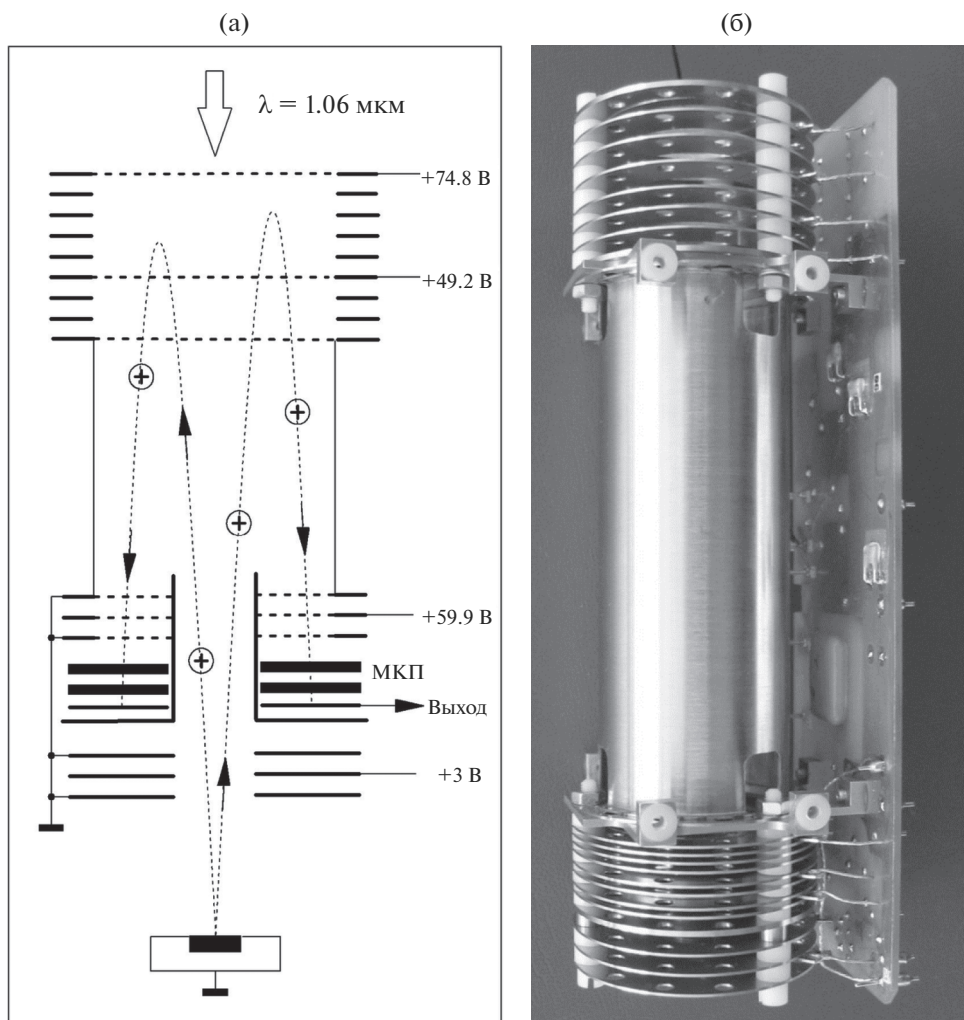


Рис. 2. Функциональная схема прибора ЛАЗМА-ЛР (слева) и внешний вид масс-анализатора (справа). МКП – микроканальные пластины.

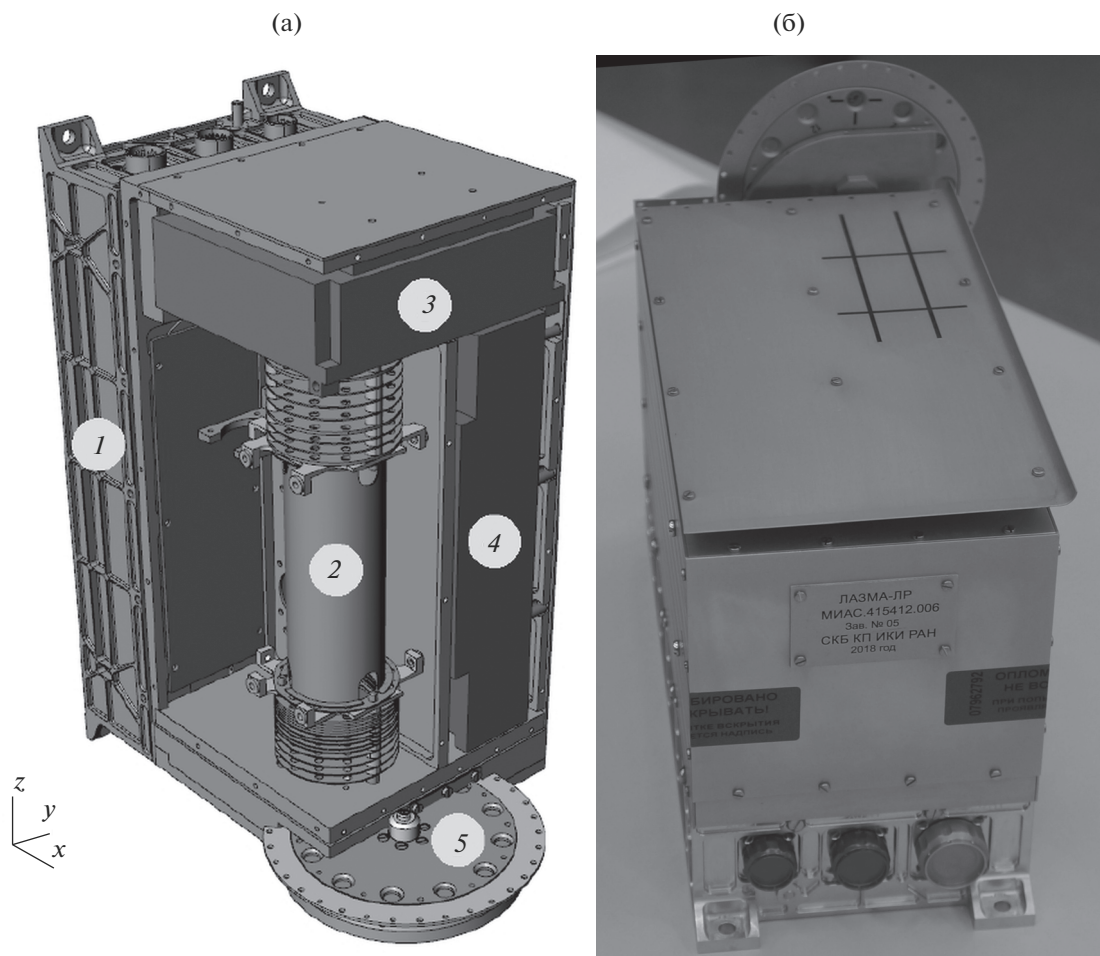
факеда. Высокоскоростные ионы, эмитируемые из образовавшейся плазмы в режиме свободного разлета, попадают во времяпролетный масс-анализатор, где разделяются по времени пролета в соответствии с формулой:

$$T = L(M/2E)^{1/2},$$

где  $T$  – время пролета иона;  $E$  – энергия иона;  $M$  – масса иона;  $L$  – бесполеовое расстояние. Разделенные во времени ионы отражаются в тормозящем поле электростатического рефлектора и затем регистрируются вторично-электронным умножителем (ВЭУ). Далее сигнал поступает на быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и сохраняется в памяти прибора в виде одиночного спектра (рис. 2).

Массу ионов можно определить с высокой точностью по времени их полета. Анализ массы и

распределения амплитуд пиков изотопов позволяет отождествить химический элемент. Далее по интенсивности массовых пиков элементов возможно определить химический, включая элементный и изотопный, состав исследуемого вещества. На основе анализа соотношений интенсивности массовых пиков отдельных элементов, по соответствующим данным предварительных калибровок, включенных в библиотеку спектров, можно определить минералы, от которых мог быть получен зарегистрированный прибором массовый спектр. Важно, что лазерный источник ионов позволяет одновременно, за одно воздействие, обеспечить практически равновероятный выход всех элементов периодической системы и, следовательно, и их равновероятную регистрацию с высокой пропускной способностью анализатора (Managadze G.G., Managadze N.G., 1997).



**Рис. 3.** Основные узлы (слева) и внешний вид (справа) прибора ЛАЗМА-ЛР. 1 – модуль электроники; 2 – анализатор; 3 – модуль лазерного излучателя с системой фокусировки (оптический модуль); 4 – узел питания и контроля лазерного излучателя; 5 – грунтоприемное устройство.

### КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Конструктивно прибор ЛАЗМА-ЛР выполняется в виде моноблока, в состав которого входят следующие основные узлы: модуль электроники (Бернский университет, Швейцария), анализатор, модуль лазерного излучателя с системой фокусировки (оптический модуль) производства АО “НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, узел питания и контроля лазерного излучателя и грунтоприемное устройство (рис. 3). Габариты прибора составляют  $130 \times 206 \times 254$  мм, масса – 2.8 кг, среднее рабочее электропотребление – 8 Вт.

Модуль электроники обеспечивает полное управление работой масс-спектрометра, регистрацию, хранение и передачу спектральных данных и телеметрии, а также осуществляет питание всех узлов, входящих в состав прибора. Система регистрации включает 2-канальный (14 бит, 100 МГц) АЦП с аналоговыми предусилителями, подключаемыми непосредственно к выходам ВЭУ с ко-

эффициентами усиления 5 и 50. Одновременное использование двух каналов позволяет обеспечить параллельную регистрацию элементов матрицы и примеси с динамическим диапазоном более  $10^4$ . Это также повышает и надежность, поскольку отказ одного из каналов не приведет к полной потере работоспособности прибора. Система питания блока электроники, помимо обеспечения узлов масс-спектрометра низковольтным питанием, имеет 3 канала высоковольтных напряжений для питания оптического аттенюатора, сеток анализатора и ВЭУ. Питание модуля электроники и всего прибора осуществляется от системы бортового питания КА напряжением 27.5 В. Модуль электроники имеет встроенный интерфейс RS-485, через который происходит управление работой прибора и передача научной информации.

Анализатор имеет осесимметричную конструкцию и состоит из электростатического рефлектора и детектора. Рефлектор обеспечивает



фокусировку ионных пакетов по времени пролета и позволяет получить высокую разрешающую способность с сохранением всех остальных достоинств прибора. Питание рефлектора осуществляется стабилизированным источником напряжения 100 В (200 мкА). Детектор представляет собой шевронную сборку из двух микроканальных пластин. Питание детектора осуществляется высоковольтным напряжением от  $-1000$  до  $-2200$  В (200 мкА в рабочем режиме), что позволяет работать в области ниже порога насыщения пластин при общем усилении  $10^6$ . Геометрическая и электрическая конструкция анализатора, обладая минимальными габаритами  $14 \times 4 \times 4$  см и массой около 200 г, позволяет эффективно собирать в тонкие пакеты и регистрировать образовавшиеся в лазерном источнике ионы.

Модуль лазерного излучателя с системой фокусировки включает в себя: Nd:YAG лазер с длиной волны 1.06 мкм, оптическую систему, состоящую из фокусирующего объектива, ослабителя лазерного излучения. Nd:YAG лазер с пассивной модуляцией добротности обеспечивает на выходе энергию 15 мДж при длительности импульса 7 нс. Максимальная частота работы лазера составляет 0.1 Гц. Работоспособность лазера сохраняется в широком температурном диапазоне от  $-50$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Ресурс работы составляет около 100 000 выстрелов. Оптическая система выполняет функцию настройки по энергии и пространственным характеристикам лазерного излучения на поверхность мишени. Атенюатор лазерного излучения представляет собой электрооптический затвор на основе кристалла ниобата лития и позволяет плавно, или с небольшим шагом дискретизации, изменять энергию лазерного излучения в диапазоне 40 Дб, необходимом для точной настройки лазерного источника ионов на получение однозарядных ионов, а также для компенсации изменения энергии лазерного излучателя от температуры. Фокусирующая система обеспечивает концентрацию лазерного излучения в пятно диаметром 30 мкм на поверхности мишени при плотности мощности  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> на расстоянии 18 см от выходной апертуры объектива. Данный размер пятна представляется оптимальным с точки зрения качества ионного пучка. Так, увеличение пятна при той же плотности мощности лазерного излучения приведет к увеличению объемного заряда пучка, что, с учетом небольшой пролетной базы масс-анализатора, приведет к нарушению ионной фокусировки и, как следствие, критической деградации массового разрешения. При уменьшении диаметра фокусировки (при неизменной плотности мощности излучения) в массовых спектрах могут наблюдаться пики, отвечающие молекулярным массам, что может усложнить последующий анализ элементного состава образца. Это связано с тем, что при уменьшении диаметра

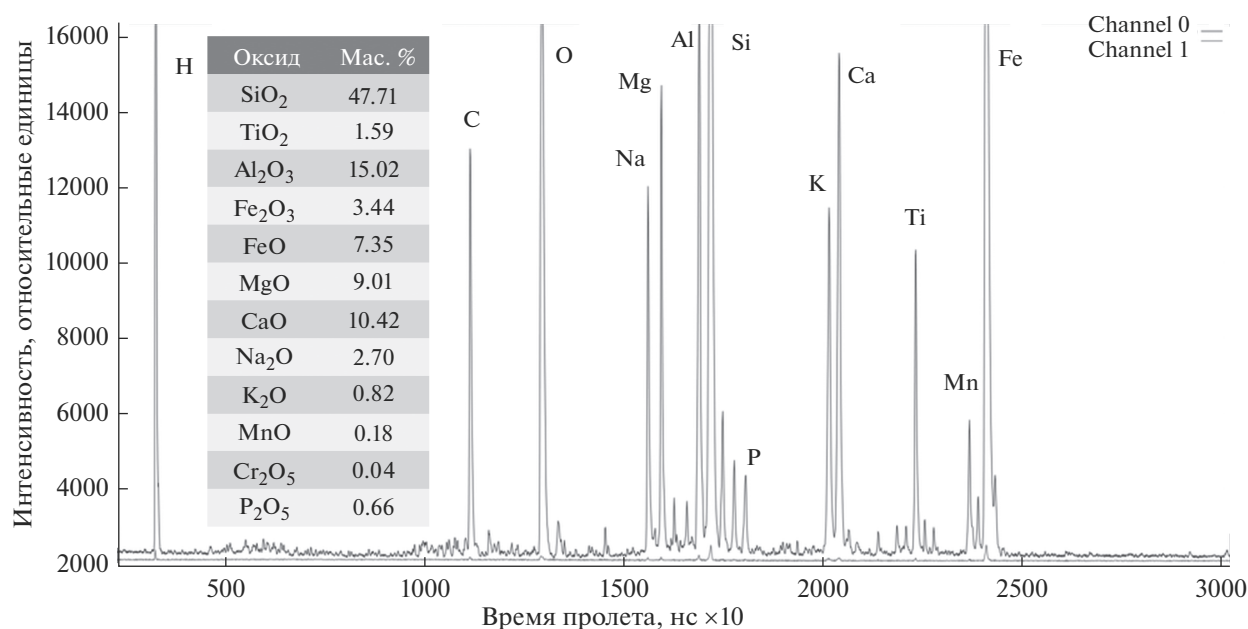
фокусировки уменьшается размер плазменного образования и снижается количество энергичных ионов, что приводит к быстрой рекомбинации ионов и синтезу молекулярных соединений. Таким образом, указанный размер пятна оптимален с точки зрения времяпролетной масс-спектрометрии и позволяет анализировать состав неоднородностей на поверхности образца с разрешением 30 мкм, что может дать дополнительную информацию о гомогенности реголита.

Узел питания и контроля лазерного излучателя (УПКЛИ) формирует необходимое высоковольтное питание лазерного излучателя и осуществляет телеметрический контроль его энергетических характеристик. Помимо этого, УПКЛИ вырабатывает синхросигнал для запуска развертки системы регистрации. Управление УПКЛИ осуществляется по командной циклограмме, формируемой модулем электроники прибора.

Узел грунтоприемного устройства представляет собой диск с 12 лунками и предназначен для фиксации и ввода проб в область воздействия лазерного излучения и их перемещения в процессе проведения анализа. Наличие 12 лунок позволяет проводить анализ 11 проб, взятых на поверхности Луны, так как 1 лунка резервируется для установки эталонной мишени. После загрузки реголита грунтозаборным устройством КА в приемную лунку прибора по команде производится его перемещение в область лазерного воздействия. При перемещении попутно осуществляется сброс лишнего грунта и утряска образца таким образом, чтобы плоскость анализируемой пробы находилась в фокальной плоскости оптической системы. После установки пробы в процессе анализа, для исключения эффекта влияния кратера на образование плазмы, а также для исследования всей поверхности образца, проводится периодическое смещение мишени на величину 50 мкм. Контроль и управление процессом позиционирования диска осуществляется при помощи датчиков Холла.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Лазерно-ионизационный времяпролетный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР позволяет проводить анализ ионов в широком диапазоне масс (табл. 1, рис. 4). Лабораторные анализы различных аналогов реголита, пород и минералов показали, что чувствительность элементного анализа составляет не менее 50 атомов на миллион атомов (ppmА) в одном спектре и 5 ppmА при анализе 100 спектров. За счет неоднородности образца возможна регистрация элементов и с более низкими концентрациями. Важно, что прибор позволяет проводить анализ с пространственным разрешением 30–50 мкм благодаря системе позиционирования мишени и малому размеру лазерного пятна. Кроме то-



**Рис. 4.** Массовый спектр аналога лунного реголита JSC-1, полученный с помощью прибора ЛАЗМА-ЛР. Рядом с массовыми пиками указаны химические элементы, которым данные пики соответствуют. На врезке приведен состав образца, рассчитанный на основе приведенного масс-спектра.

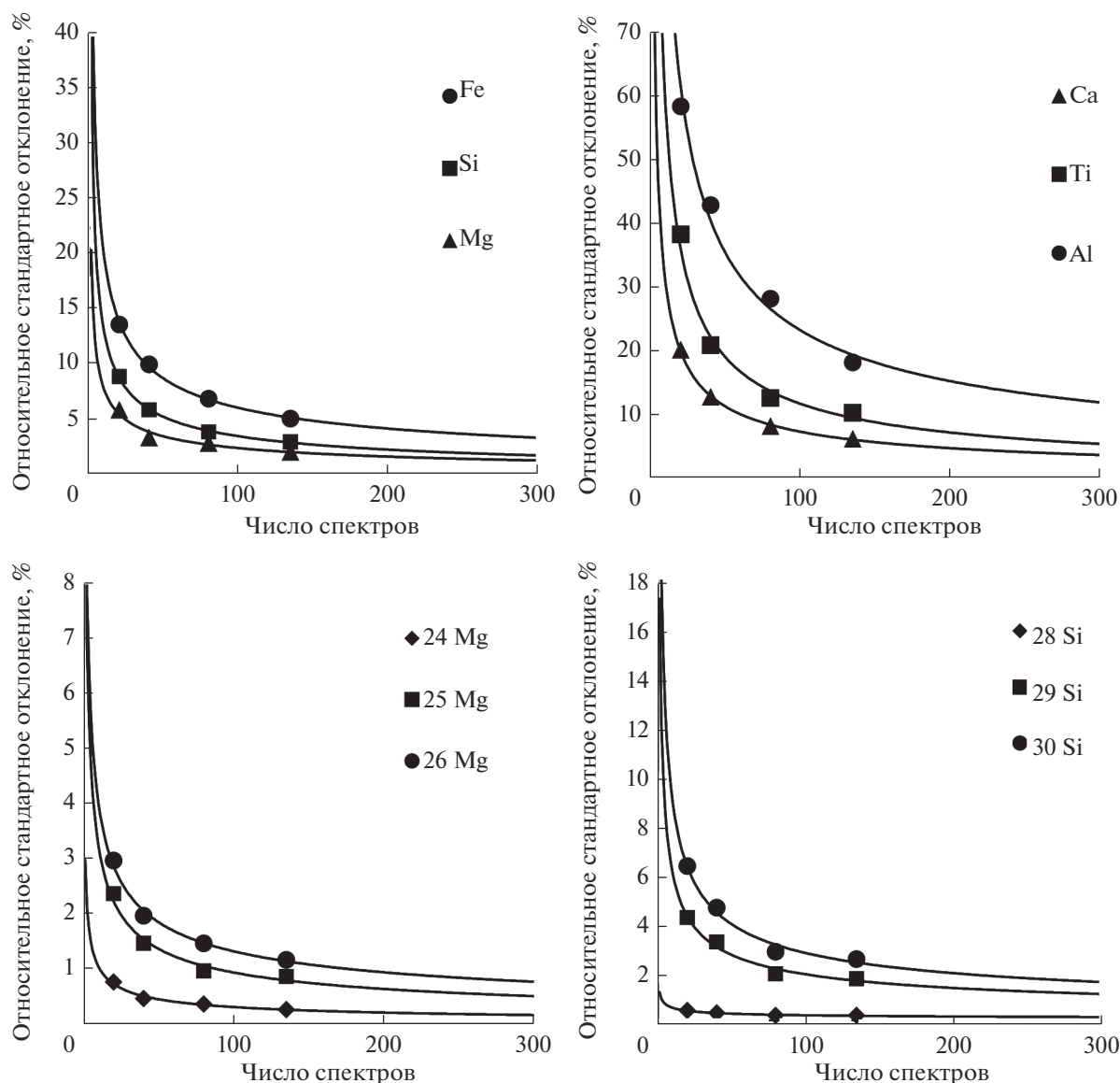
го, возможен послойный анализ образца на глубину до 10 мкм при толщине каждого анализируемого слоя порядка 1 мкм. Благодаря этому возможен анализ локальных неоднородностей образца в микромасштабах.

Точность измерений с помощью масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР существенно зависит от количества проанализированных спектров. В связи с этим была проведена оценка приборной точности измерений при различных объемах спектрального массива (Чумиков и др., 2020). Точность анализа была выше для элементов, имеющих высокие концентрации в образце, что в целом характерно для ЛИМС (Riedo и др., 2013b; 2013c). Тем не менее 10% точность элементного анализа, достаточная для решения широкого круга задач планетологии, геохронологии и астробиологии (Grinckerhoff, 2005), даже для примесных элементов достигалась при анализе 300 спектров

(рис. 5). При анализе аналогичного спектрального массива достигалась 1% точность измерения изотопных распределений, но только для изотопов, находящихся в соотношении не более 10 : 1. Достижение такой же точности для изотопов с большими соотношениями требует анализа неоправданно больших выборок спектров (тысячи и десятки тысяч спектров). В связи с этим предложен способ увеличения точности анализа изотопных соотношений в ходе миссий Луна-25 и Луна-27. Как указано выше, грунтоприемное устройство прибора позволяет провести анализ 11 образцов реголита. Предполагая, что неоднородность изотопных соотношений в образцах, взятых на небольшом расстоянии, должна отсутствовать, анализ изотопных распределений для изотопов с малой концентрацией планируется проводить по суммарной статистике, полученной со всех загруженных проб. Согласно проведенным оценкам, такой

**Таблица 1.** Основные аналитические характеристики масс-спектрометра ЛАЗМА-ЛР

Массовый диапазон, а. е. м.	1–250
Разрешение	300
Относительная чувствительность в одном спектре, атомных процентов, ат. %	$5 \times 10^{-3}$
Абсолютный предел обнаружения по массе в одном анализе, г	$5 \times 10^{-14}$
Быстродействие прибора на 1 а. е. м., нс	200
Динамический диапазон	$10^4$
Скорость опроса АЦП, нс	15
Точность при элементном анализе, %	10



**Рис. 5.** Влияние объема проанализированного спектрального массива на точность элементного и изотопного анализа энстатита (минерала, обнаруженного в составе метеоритов и лунного реголита) (Чумиков и др., 2020).

подход позволит охарактеризовать с 1% точностью изотопные распределения для нуклидов с отношениями их распространенности в природе 50 : 1 и более (Чумиков и др., 2020).

Следует отметить, что ряд характеристик ионов и параметров их разлета в лазерно-ионизационных масс-спектрометрах пока еще малоизучен. На ионизацию вещества мишени существенно влияют такие параметры, как состав мишени, ее окраска, форма поверхности и др. В связи с этим возникают систематические ошибки измерений, компенсирующиеся введением для отдельных химических элементов поправочных коэффициентов, называемых коэффициентами относительной чувствительности (КОЧ) (Чумиков

и др., 2020). Потому для корректной интерпретации данных, полученных в ходе космического эксперимента, а также для обеспечения высокой точности измерений в настоящее время создается локальная база калибровочных спектров. Кроме того, во время работы прибора на Луне предполагается проведение наземных измерений стандартных образцов пород и минералов с помощью лабораторного аналога прибора ЛАЗМА-ЛР для верификации полученных данных.

Кроме проведения лазерно-ионизационной масс-спектрометрии, прибор ЛАЗМА-ЛР позволяет проводить анализ образца методом “мягкой” лазерной десорбции и ионизации (SoftLDI). В этом режиме энергия излучения лазера ослабляет-



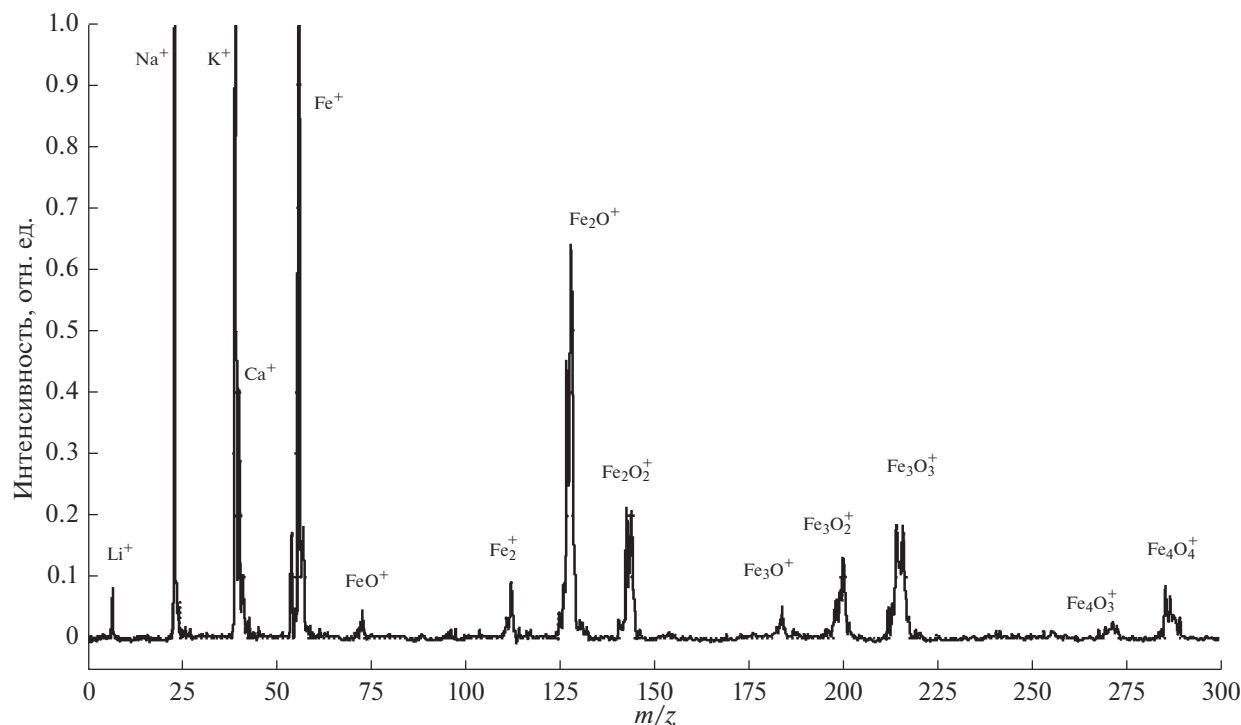


Рис. 6. Массовый спектр  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , полученный в режиме SoftLDI с помощью прибора ЛАЗМА-ЛР.

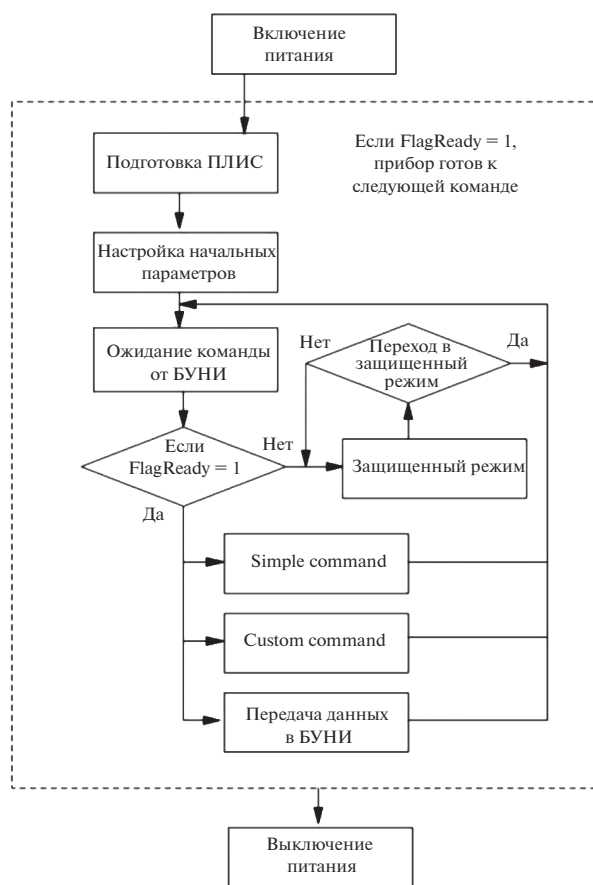
ся до плотности мощности на мишени  $\sim 10^7\text{--}10^8$  Вт/см<sup>2</sup>, когда отсутствует образование высокоэнергичных ионов, характерных для метода ЛИМС. При этом над мишенью образуется слабо ионизированное облако, получаемое в результате десорбции исходного вещества. После подачи выталкивающего поля образовавшиеся ионы ускоряются и поступают в анализатор, где происходит их регистрация по вышеприведенной методике. Использование данного режима позволяет получить дополнительный источник научных данных, поскольку массовый спектр при таком способе ионизации сильно отличается от массового спектра, полученного в режиме ЛИМС. В нем наблюдаются молекулярные пики окислов (рис. 6), которые могут дать дополнительную информацию о минералогическом составе исследуемого реголита. Методика определения минералогического состава с применением данного режима работы прибора в настоящее время находится в стадии разработки.

В режиме SoftLDI при анализе различных образцов помимо пиков молекулярных ионов регистрируются массовые пики, соответствующие Li, Na, K, Ca, [Fe] и явно не всегда обнаруживающиеся в режиме элементного анализа (рис. 6, диапазон от 5 до 60  $m/z$ ). Вероятно, эти пики отвечают мелкодисперсной пылевой компоненте, абсорбированной на поверхности пробы. Подобная картина наблюдалась в спектрах лабораторного лазер-

но-ионизационного масс-спектрометра, разработанного в Бернском университете (Tulej и др., 2012), а также в массовых спектрах пылеударных экспериментов (Stübig, 2002). Указанные результаты позволяют предполагать возможность анализа мелкодисперсной пылевой компоненты отдельно от более крупных частиц. В настоящее время ведутся исследования с целью определения природы этой пылевой компоненты, оптимальных режимов анализа и установления размеров анализируемых частиц.

#### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИБОРА В ХОДЕ МИССИЙ ЛУНА-25 и ЛУНА-27

Предполагается, что масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР во время полета к Луне будет находиться в выключенном состоянии и начнет свою работу после посадки КА на поверхность Луны. При первом включении запланировано его тестовое включение с опросом телеметрических параметров, позволяющее определить состояние прибора после посадки и условия (режимы) его дальнейшей работы. При втором — проверка штатного режима функционирования по заранее установленной эталонной мишени, состоящей из карбида вольфрама, после чего прибор перейдет в дежурный режим или выключится в ожидании загрузки образца реголита в грунтоприемное устройство. При третьем и последующих включениях, в зависимости от циклограммы функционирования



**Рис. 7.** Базовый алгоритм действия при включении прибора ЛАЗМА-ЛР. ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема, БУНИ – блок управления научной аппаратуры. Simple command – команда, исполнение которой занимает детерминированное время, Custom command – команда, время исполнения которой недетерминировано. FlagReady – готовность прибора к приему команд; во время выполнения какого-либо процесса, заданного управляющей командой, флаг готовности устанавливается в ноль (прибор занят процессом); в “дежурном” режиме выставляется в единицу (прибор свободен и готов к приему следующей команды). Защищенный режим эквивалентен “дежурному” за исключением того, что все внешние управляющие команды (кроме команд “Считать телеметрию” и “Выйти из защищенного режима”) игнорируются; включается (в целях безопасности) при получении прибором управляющей команды в момент, когда он занят выполнением какого-либо процесса, а также по сигналу супервизора питания, вырабатываемого в случае превышения вторичными цепями установленных значений тока потребления. Для недопущения перехода прибора в защищенный режим все текущие процессы должны завершаться/прерываться посредством внешней команды “Stop”.

КНА, предполагается проведение штатных измерений загруженного в приемные ячейки грунтоприемного устройства прибора образцов реголита.

Как указано выше, грунтоприемное устройство прибора позволяет осуществить загрузку 11

различных образцов реголита. Загрузка и анализ образцов может происходить в произвольной последовательности “загрузка одного образца – его анализ” или “загрузка всех образцов – их последовательный анализ”. Также возможен анализ пыли, оседающей в пассивном режиме на грунтоприемное устройство масс-спектрометра после посадки КА. Режим загрузки образцов лунного реголита в прибор будет уточняться исходя из циклограмм функционирования КА и грунтозаборного устройства аппарата. Переход прибора в рабочий режим, при котором осуществляется анализ образца, происходит по внешней команде управления. На основании данных о зависимости точности анализа от количества полученных спектров предполагается, что длительность цикла измерения одного образца составит около 4 ч (Чумиков и др., 2020). Поскольку приемное устройство прибора ЛАЗМА-ЛР рассчитано на загрузку 11 образцов грунта, то для проведения полного цикла измерений понадобится провести 11 независимых включений, после чего измерения могут проводиться с повторением, что позволит накопить статистические данные о составе реголита.

Важным достоинством прибора ЛАЗМА-ЛР является возможность выполнения измерений автономно без участия оператора при минимальном наборе управляющих команд. После подачи питания в прибор передается определенное количество управляющих команд, которые задают его режим работы, после чего прибор переходит в автоматический режим проведения измерений с накоплением данных во внутренней памяти, который прерывается соответствующим набором команд уже перед его выключением. Автоматический режим работы подразумевает автоматическую регулировку необходимых для измерения параметров. Таким образом, фактически управление прибором осуществляется только при его включении, когда задается необходимый режим функционирования, и при выключении, когда прибор возвращается в дежурный режим и/или осуществляет передачу накопленной научной информации. Все остальное время прибор работает автономно, проводя длительные масс-спектрометрические измерения в автоматическом режиме (рис. 7).

Основным рабочим режимом прибора ЛАЗМА-ЛР является режим измерения элементного и изотопного состава реголита методом ЛИМС, который реализуется одной внешней командой по следующему алгоритму. После получения команды на начало измерения осуществляется установка в ноль основных параметров, используемых в данной сессии измерений, а также осуществляется запись двух калибровочных спектров, сигнализирующих об исправности измерительного тракта. Затем, в соответствии с параметрами команды на начало измерений, производится установка

кодов цифро-аналоговых преобразователей для подачи необходимых начальных высоковольтных напряжений на детектор прибора и аттенюатор, после чего запускается цикл работы лазерного излучателя. Полученный в результате работы данного цикла спектр анализируется процессором с целью определения его качества и выработки реакции прибора для оптимального получения последующих спектров. Для этого в алгоритм вводятся следующие параметры, которые фиксируются в телеметрии каждого спектра:

$a(0/1)$  – есть/нет спектральные пики в спектре;

$b(0/1)$  – нет/есть выход спектрального пика за пределы динамического диапазона АЦП в наименее чувствительном канале;

$c(0/1)$  – нет/есть широкие пики в спектре в заданном временном диапазоне.

Параметр  $a$  по наличию пиков в спектре определяет достаточность энергии лазера для ионообразования, параметр  $b$  сигнализирует о повышенном напряжении детектора, приводящем к выходу спектрального пика за пределы динамического диапазона АЦП в наименее чувствительном канале прибора и невозможности корректно определить интегралы пиков для проведения количественного анализа, параметр  $c$  показывает переизбыток лазерной энергии, приводящий к усиленному образованию ионов и вызванному вследствие этого падению спектрального разрешения из-за ионной перегрузки масс-анализатора. Выработка реакции прибора на качество спектра осуществляется по статистической выборке из трех предыдущих спектров. Так, например, если во всех трех спектрах отсутствуют пики ( $a = 1$ ), выдается команда на уменьшение напряжения на аттенюаторе, соответствующее увеличению энергии лазера и т.д. Анализ спектров в реальном времени и наличие обратной связи позволяют осуществлять подстройку номинального режима функционирования прибора, что обеспечивает измерение в автоматическом режиме без какого-либо внешнего управления прибором. В алгоритме измерения предусмотрен режим постоянного сканирования лазерного излучения по поверхности мишени. Это связано в первую очередь с тем, что при анализе в одной точке на поверхности образца образуется кратер, который начинает влиять на характеристики ионного пучка, что приводит к сильной нестабильности получения массовых спектров. Для исключения этого эффекта, после десяти лазерных воздействий в одну точку происходит смещение мишени на величину порядка 50 мкм и анализ повторяется. После 45 смещений в одном направлении включается реверсное движение и анализ продолжается. Таким образом, прибор фактически находится в бесконечном цикле измерения, который прерывается после снятия питания или получении команды на остановку

измерения. Полученные спектры сохраняются во внутренней Flash памяти объемом 64 МБ. Данного объема достаточно для сохранения 2000 спектров. В случае переполнения памяти начинается ее перезапись с потерей ранее сохраненной информации. Чтобы избежать этого, необходимо включить режим измерения на время, отвечающее информативности прибора. При частоте работы лазера 0.1 Гц оно составит 5.5 ч. Если по каким-то причинам невозможно обеспечить цикл измерения менее 5.5 ч или, например, невозможно очистить память путем передачи информации на Землю, в приборе предусмотрен другой режим измерения, отличающийся только тем, что спектры, не имеющие массовых пиков, не сохраняются во Flash памяти. Это позволяет эффективно увеличить число полезных спектров, отбраковав пустые спектральные данные. Недостатком данного режима является отсутствие спектральной телеметрии, которая содержится в отбракованных спектрах. Тем не менее для увеличения статистической выборки спектральных данных и/или уменьшения массива, передаваемого на Землю, этот режим представляется оптимальным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерно-ионизационный времяпролетный масс-спектрометр ЛАЗМА-ЛР позволяет проводить анализ элементного и изотопного состава твердых объектов на поверхности безатмосферных космических тел. Анализ основан на атомизации и ионизации вещества с помощью импульсного лазерного излучения и измерении времени пролета ионов от мишени до детектора, которое зависит от их заряда и массы. Чувствительность элементного анализа зависит от объема анализируемого спектрального массива и составляет не менее 50 ppmA в одном спектре и 5 ppmA при анализе 100 спектров. В ходе миссий Луна-25 и Луна-27 ожидается достижение точности элементного и изотопного анализа не менее 10 и 1% соответственно при анализе массива из 300 спектров для каждого образца. Конструкция прибора позволяет проводить точное позиционирование образца и его послойный анализ на глубину до 10 мкм. Небольшой диаметр лазерного пятна (30 мкм) обеспечивает возможность анализа образца с высоким пространственным разрешением. Данные, полученные масс-спектрометром ЛАЗМА-ЛР в ходе миссий Луна-25 и Луна-27, могут быть применены как при изучении фундаментальных вопросов, связанных с определением условий формирования и эволюции Луны, так и для решения ряда прикладных проблем освоения Луны.

Авторы выражают глубокую благодарность главе департамента Космических исследований и планетологии Физического института Бернского университета П. Вурцу (Бернский университет,

Швейцария) за разработку модуля электроники прибора ЛАЗМА-ЛР и активное участие в проектах, а также Б.Т. Каримову (СКБ КП ИКИ РАН) за конструктивное воплощение прибора в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Казмерчук П.В., Мартынов М.Б., Москатиньев И.В., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Космический аппарат “Луна-25” – основа новых исследований Луны // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 4. С. 9–19.

Манагадзе Г.Г., Сагдеев Р.З., Чумиков А.Е., Моисеенко Д.А., Манагадзе Н.Г., Бондаренко А.Л., Wurz P., Tulej M., Яковлева М. Исследование основных геохимических характеристик реголита Фобоса с помощью лазерной времяпролетной масс-спектрометрии в эксперименте ЛАЗМА // Фобос-Грунт. Проект космической экспедиции. Т. 2. М.: Изд. ИКИ РАН, НПО им. А. Лавочкина, 2011. С. 287–298.

Чуников А.Е., Чепцов В.С., Манагадзе Н.Г. Точность анализа элементного и изотопного состава реголита методом лазерной времяпролетной масс-спектрометрии в ходе планируемых миссий Луна-Глоб и Луна-Ресурс-1 // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 3. С. 1–8. (Chumikov A.E., Cheptsov V.S., Managadze N.G. Accuracy of analysis of the elemental and isotopic composition of regolith by laser time-of-flight mass spectrometry in the future Luna-Glob and Luna-Resurs-1 missions // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 4. P. 288–294.)

Ярошевский А.А., Абрамов А.В., Каменева Е.Е. Геохимическая систематика, возможные генетические связи лунных магматических пород и типы пород из Моря Кризисов // Лунный грунт из Моря Кризисов / Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1980. С. 196–218.

Anand M., Tartèse R., Barnes J.J. Understanding the origin and evolution of water in the Moon through lunar sample studies // Philos. Trans. Roy. Soc. A. 2014. V. 372. № 2024. P. 20130254.

Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A., Malenkov M.I., Michael G.G., Liu T., Head J.W., Scott D.R., Lark L. Potential lunar base on Mons Malapert: topographic, geologic and trafficability considerations // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 5. P. 383–398.

Bogatikov O.A., Gorshkov A.I., Mokhov A.V., Ashikhmina N.A., Magazina L.O. The first finding of native molybdenum, silver sulfide, and iron-tin alloy in the lunar regolith // Geochem. Int. 2001. V. 39. № 6. P. 604–608.

Bonneville R. A truly international lunar base as the next logical step for human spaceflight // Adv. Space Res. 2018. V. 61. № 12. P. 2983–2988.

Brinckerhoff W.B. On the possible in situ elemental analysis of small bodies with laser ablation TOF-MS // Planet. and Space Sci. 2005. V. 53. № 8. P. 817–838.

Djachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Sanin A.B. Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon // Sol. Syst. Res. 2017. V. 51. № 3. P. 185–195.

Ganapathy R., Anders E. Bulk compositions of the Moon and Earth, estimated from meteorites // Lunar and Planet. Sci. Conf. Proc. 1974. V. 5. P. 1181–1206.

Gerdes N., Fokken L.G., Linke S., Kaielerle S., Suttman O., Hermsdorf J., Stoll E. Trentlage C. Selective Laser Melting for processing of regolith in support of a lunar base // J. Laser Appl. 2018. V. 30. № 3. P. 032018.

Gladstone G.R., Hurley D.M., Retherford K.D., Feldman P.D., Pryor W.R., Chaufray J.Y., Versteeg M., Greathouse T.K., Steffl A.J., Throop H., Parker J.Wm., Kaufmann D.E., Egan A.F., Davis M.W., Slater D.C., Mukherjee J., Miles P.F., Hendrix A.R., Colaprete A., Stern S.A. LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume // Science. 2010. V. 330. № 6003. P. 472–476.

Hand E. Lunar impact tosses up water and stranger stuff // Nature. 2009. <https://doi.org/10.1038/news.2009.1087>

Haskin L., Warren P. Lunar chemistry // The Lunar sourcebook: A user’s guide to the Moon / Eds Heiken G., Vaniman D., French B.M. Lunar and Planet. Inst. and Cambridge Univ. Press, 1991. P. 357–474.

Kim K.J. A research trend on Lunar resources and Lunar base // J. Petrol. Soc. Korea. 2017. V. 26. № 4. P. 373–384.

Lam C.W., Scully R.R., Zhang Y., Renne R.A., Hunter R.L., McCluskey R.A., Chen B.T., Castranova V., Driscoll K.E., Gardner D.E., McClellan R.O., Cooper B.L., McKay D.S., Marshall L., James J.T. Toxicity of lunar dust assessed in inhalation-exposed rats // Inhal. Toxicol. 2013. V. 25. № 12. P. 661–678.

Ling Z.C., Wang A., Jolliff B.L. Mineralogy and geochemistry of four lunar soils by laser-Raman study // Icarus. 2011. V. 211. № 1. P. 101–113.

Liu Y., Taylor L.A. Lunar dust: Chemistry and physical properties and implications for toxicity // NLSI Lunar Sci. Conf. 2008. V. 1415. P. 2072.

Managadze G.G., Managadze N.G. TOF mass spectrometer. Patent 2096861 (RF). Registered: 1997. Published in Russ. Bull. of Inv. No. 32.

Managadze G.G., Safronova A.A., Luchnikov K.A., Vorobyova E.A., Duxbury N.S., Wurz P., Managadze N.G., Chumikov A.E., Khamizov R.K. A new method and mass-spectrometric instrument for extraterrestrial microbial life detection using the elemental composition analyses of Martian regolith and permafrost/ice // Astrobiology. 2017. V. 17. № 5. P. 448–458.

Managadze G.G., Shutyaev I. Exotic instruments and applications of laser ionization mass spectrometry in space research // Laser Ionization Mass Analysis / Eds Vertes A., Gijbels R., Adams F. New York: Wiley, 1993. P. 505–547.

Managadze G.G., Wurz P., Sagdеев R.Z., Chumikov A.E., Tuley M., Yakovleva M., Managadze N.G., Bondarenko A.L. Study of the main geochemical characteristics of Phobos’ regolith using laser time-of-flight mass spectrometry // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. P. 376–384.

McKay D.S., Ming D.W. Properties of lunar regolith // Dev. Soil Sci. 1990. V. 19. P. 449–462.

McLeod C.L., Krekeler M. Sources of extraterrestrial rare Earth elements: to the Moon and beyond // Resources. 2017. V. 6. P. 40.

Mitrofanov I.G., Zelenyi L.M., Tretyakov V.I., Dolgopолов V.P. Science program of Lunar landers of “Luna-Glob” and “Luna-Resource” missions // Lunar and Planet. Sci. Conf. 2011. V. 42. P. 1798.

Mokhov A.V., Gornostaeva T.A., Kartashov P.M., Rybchuk A.P., Bogatikov O.A. Native alloys of the Pd–Pt and Ni–Cu–

- Al systems from the AS Luna-24 // *Dokl. Earth Sci.* 2018a. V. 481. № 1. P. 898–901.
- Mokhov A.V., Kartashov P.M., Rybchuk A.P., Gornostaeva T.A., Bogatikov O.A.* Tantalum–niobate from the Apollo-17 regolith // *Dokl. Earth Sci.* 2018b. V. 478. № 1. P. 112–114.
- Neuland M.B., Grimaudo V., Mezger K., Moreno-García P., Riedo A., Tulej M., Wurz P.* Quantitative measurement of the chemical composition of geological standards with a miniature laser ablation/ionization mass spectrometer designed for in situ application in space research // *Meas. Sci. Technol.* 2016. V. 27. P. 035904.
- Neuland M.B., Meyer S., Mezger K., Riedo A., Tulej M., Wurz P.* Probing the Allende meteorite with a miniature laser-ablation mass analyser for space application // *Planet. and Space Sci.* 2014. V. 101. P. 196–209.
- Pellinen R., Piironen J., Silén J., Sagdeev R.Z., Managadze G.G., Shutyaev I., Timofeev P., Bondarenko A., Ter-Mikaelian V.* Laser-ionization studies with the technical models of the LIMA-D/PHOBOS experiment // *Adv. Space Res.* 1990. V. 10. № 3–4. P. 57–61.
- Pugacheva S.G., Shevchenko V.V.* The chemical composition of regolith at the Moon's South Pole, according to data of Lunar Prospector and Lunar Reconnaissance Orbiter missions // *Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2010. V. 41. P. 1297.
- Riedo A., Bieler A., Neuland M., Tulej M., Wurz P.* Performance evaluation of a miniature laser ablation time-of-flight mass spectrometer designed for in situ investigations in planetary space research // *J. Mass Spectrom.* 2013a. V. 48. № 1. P. 1–15.
- Riedo A., Meyer S., Heredia B., Neuland M.B., Bieler A., Tulej M., Leya I., Iakovleva M., Mezger K., Wurz P.* Highly accurate isotope composition measurements by a miniature laser ablation mass spectrometer designed for in situ investigations on planetary surfaces // *Planet. and Space Sci.* 2013b. V. 87. P. 1–13.
- Riedo A., Neuland M., Meyer S., Tulej M., Wurz P.* Coupling of LMS with a fs-laser ablation ion source: elemental and isotope composition measurements // *J. Anal. At. Spectrom.* 2013c. V. 28. № 8. P. 1256–1269.
- Sagdeev R.Z., Zakharov A.V.* Brief history of the Phobos mission // *Nature.* 1989. V. 341. № 6243. P. 581–585.
- Stübig M.* New insights in impact ionization and in time-of-flight mass spectroscopy with micrometeoroid detectors by improved impact simulations in the laboratory // *Dissertation for the Doctor of Natural Sciences. Combined Faculties for the Natural Sci. and for Math. of Ruperto-Carola, Univ. of Heidelberg, Germany.* 2002.
- Tartèse R., Anand M., Gattacceca J., Joy K.H., Mortimer J.I., Pernet-Fisher J.F., Russell S., Snape J.F., Weiss B.P.* Constraining the evolutionary history of the Moon and the inner Solar System: A case for new returned Lunar samples // *Space Sci. Rev.* 2019. V. 215. № 8. P. 54.
- Tulej M., Riedo A., Iakovleva M., Wurz P.* On applicability of a miniaturised laser ablation time of flight mass spectrometer for trace elements measurements // *Int. J. Spectrosc.* 2012. Article ID 234949.
- Wamelink G.W.W., Frissel J.Y., Krijnen W.H.J., Verwoert M.R.* Crop growth and viability of seeds on Mars and Moon soil simulants // *Open Agric.* 2019. V. 4. № 1. P. 509–516.
- Wamelink G.W., Frissel J.Y., Krijnen W.H., Verwoert M.R., Goedhart P.W.* Can plants grow on Mars and the moon: a growth experiment on Mars and moon soil simulants // *PLoS One.* 2014. V. 9. № 8. P. e103138.
- Wang Z., Wu Y., Blewett D.T., Cloutis E.A., Zheng Y., Chen J.* Submicroscopic metallic iron in lunar soils estimated from the in situ spectra of the Chang'E-3 mission // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. № 8. P. 3485–3492.
- Wolf S.F., Wang M.S., Lipschutz M.E.* Labile trace elements in basaltic achondrites: Can they distinguish between meteorites from the Moon, Mars, and V-type asteroids? // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2009. V. 44. № 6. P. 891–903.