

ЦИКЛ СТАТЕЙ

«Перспективный гамма-спектрометр, основанный на методе меченных заряженных частиц для изучения элементного состава Луны, Марса и других тел Солнечной системы»

1. **Коллектив авторов:** Санин А.Б., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Мокроусов М.И., Аникин А.А., Головин Д.В., Никифоров С.Ю.
2. **Название:** «Перспективный гамма-спектрометр, основанный на методе меченных заряженных частиц для изучения элементного состава Луны, Марса и других тел Солнечной системы».
3. **Ссылки на публикации:**
 - 3.1 Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Sanin A.B., Anikin A. A., Mokrousov M.I., Golovin D.V., Nikiforov S.Y., Timoshenko G.N., Shvetsov V.N. **(2021)** Laboratory demonstration of space experiment for spectrometry of planetary gamma-rays with tags of Galactic Cosmic Rays producing them, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 1003, 165286.
 - 3.2 Anikin A.A., Djachkova M.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G., Mokrousov M.I., Nikiforov S.Yu., Sanin A.B. **(2021)** Promising Experiment with a Gamma Ray Spectrometer Onboard a Mobile Spacecraft to Study the Elemental Composition of the Moon, Mars, and Other Celestial Bodies without an Atmosphere or with a Thin Atmosphere, Cosmic Research, 59, 30-35.
 - 3.3 Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Nikiforov S.Y., Golovin D.V., Djachkova M.V., Anikin A.A., Karpushkina N.E., Lisov D.I., Litvak M.L., Mokrousov M.I., Dubasov P.A., Zontikov A.O., Starr R.D. **(2020)** Cosmic gamma-ray spectrometer with tagged charged particles of Galactic Cosmic Rays, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 953, 163148.
 - 3.4 Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Golovin D.V., Nikiforov S.Yu., Sanin A.B., Anikin A.A., Mokrousov M.I., Timoshenko G.N., Krylov V.A., Pavlik E.E., Shvetsov V.N., Mytsin G.V., Molokanov A.G. **(2020)** Gamma Spectrometry of Composite Models of Planetary Matter on the JINR Accelerator Proton Beam with Tagged Protons, Physics of Particles and Nuclei Letters, 17, 3, 348-357.
 - 3.5 Санин А. Б., Митрофанов И. Г., Бахтин Б. Н., Литвак М. Л., Аникин А. А., Головин Д. И., Никифоров С. Ю. Об изучении пространственной переменности состава вещества Луны в экспериментах по гамма-спектроскопии на борту мобильного аппарата с применением метода «меченых космических лучей», *Астрономический вестник*, том 54, № 6, с. 508-519, **(2020)**
4. **Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность:**

В последнее время акцент при планировании будущих космических экспериментов по исследованию Луны и Марса делается на посадочные миссии, предназначенные для изучения наиболее интересных локальных участков поверхности. Это подразумевает разработку стационарных и мобильных платформ, на борту которых могут устанавливаться различные научные инструменты, позволяющие изучать элементный состав грунта в непосредственной окрестности аппарата. Одним из таких научных инструментов может быть гамма-спектрометр.

Гамма-спектроскопия – это проникающий, не деструктивный метод изучения космических объектов, предоставляющий возможность дистанционного измерения объемного элементного состава подповерхностного слоя грунта, что недостижимо

в других методах. Платой за это является сложность в разделении в регистрируемом сигнале вклада от изучаемого объекта и вклада от космического аппарата. В фоновом сигнале, создаваемом космическим аппаратом, могут присутствовать те же гамма-линии, что и в исследуемой поверхности. Поэтому для таких измерений востребованы специальные методики позволяющие подавить фоновую компоненту и выделить сигнал только от интересующего объекта. Применение этих методик в экспериментах на борту луноходов и марсоходов может позволить находить и исследовать локальные «пятна» на поверхности, где элементный состав сильно отличается от остальной окружающей поверхности. Обнаружение таких локальных неоднородностей, где содержание основных пороодообразующих элементов оказывается существенно отличным от среднего содержания в окружающей поверхности, играет важную роль т.к. может предоставить уникальную информацию о сложных механизмах формирования поверхности на различных стадиях эволюции небесного тела.

Множество методик подавления фоновой компоненты сигнала широко используются на Земле в различных промышленных приложениях. Одним из них является метод меченных нейтронов. Однако, ни одна из этих методик еще не дошла до космического исполнения в силу сложности и дороговизны научного оборудования, которое необходимо адаптировать под жесткие условия космического эксперимента.

5. **Конкретная решаемая в работе задача и ее значение:** В подаваемом цикле работ была поставлена задача по разработке космического гамма-спектрометра, удовлетворяющего нескольким базовым требованиям: 1) он должен позволять производить эффективную селекцию гамма-излучения от поверхности Луны/Марса, чтобы проводить поиск и исследование вдоль трассы движения лунохода/марсохода локальных участков поверхности с потенциально аномальным элементным составом; 2) он должен быть простым и надёжным, и соответствовать требованиям космического эксперимента; 3) его основные ресурсные характеристики (масса/потребление) должны позволять устанавливать его на борт луноходов/марсоходов.

6. **Используемый подход, его новизна и оригинальность:**

В проведенном исследовании мы рассмотрели имеющиеся возможности по возбуждению вторичного гамма-излучения от грунта небесного тела. Поскольку использование с этой целью искусственных источников ионизирующего излучения, таких как нейтронные генераторы или радиоизотопные источники, несет дополнительные расходы в виде потребляемой энергии и/или значительной массы, то в первую очередь мы рассмотрели такой естественный источник ионизирующего излучения, как Галактические Космические Лучи (ГКЛ). Используя схему совпадений, собранную в виде протонного телескопа, и гамма-спектрометра, можно отобрать только те заряженные частицы ГКЛ, которые прилетели в определенном телесном угле и облучили участок поверхности находящегося в пределах этого телесного угла. Если регистрацию гамма-фотонов синхронизовать по времени с регистрацией отобранных частиц ГКЛ, то можно отобрать только те фотоны, которые были произведены отобранными частицами ГКЛ. В результате, в измеренный спектр гамма-излучения будут отобраны только те фотоны, которые пришли в детектор от изучаемого участка поверхности, а фотоны, произведенные в конструкции космического аппарата и участках поверхности за пределами

выбранного телесного угла, будут отброшены. Этот метод, по аналогии с методом меченных нейтронов, получил название метода меченых протонов, которые, как известно, составляют основную долю среди частиц ГКЛ. Он был впервые предложен данным коллективом авторов. Авторский коллектив выиграл грант РФ (2 раза) и сейчас активно проводит лабораторные и экспериментальные отработки с лабораторным макетом прибора, реализующего метод.

7. Полученные результаты и их значимость:

Лабораторные испытания макета прибора с мечеными протонами были проведены на пучке протонов фазотрона Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП ОИЯИ) в 2019-2021 г. Они показали, что можно существенно повысить достоверность измерений ядерных гамма-линий возникающих в космическом эксперименте под воздействием протонов галактических космических лучей, если воспользоваться предложенным методом «меченых заряженных частиц». Проведенные измерения подтвердили возможность поиска и исследований локальных неоднородностей состава планетного вещества при установке такого прибора на борт мобильного аппарата. При перемещении от точки к точке прибор «сканирует» поверхность пятном, образуемым конусом телесного угла, в которые попадают «меченые протоны», и позволяет измерить переменность ядерных линий от вещества, расположенного под этим пятном. В экспериментах на протонном пучке ЛЯП ОИЯИ были получены результаты измерений составных мишеней-аналогов планетного вещества (Луна и Марс), собранных из оксида кремния с добавлением алюминия, железа и титана как основных породообразующих металлов. Было экспериментально подтверждено, что использование метода «меченых протонов» кардинально повышает значимость гамма-линий в спектре излучения, возникающего в смоделированной неоднородности грунта. Было также продемонстрировано, что в отличие от методов стандартной космической гамма-спектроскопии, метод «меченых протонов» позволяет обнаружить эту неоднородность статистически достоверно. Была также построена численная модель эксперимента, которая показала хорошее согласие с экспериментальными данными.

_____ Руководитель цикла работ А. Б. Санин