

**ОТДЕЛ ЯДЕРНОЙ  
ПЛАНЕТОЛОГИИ  
(63)  
NUCLEAR PLANETOLOGY  
DEPARTMENT  
(63)**



**Руководитель — д-р физ.-мат. наук,  
профессор Игорь Митрофанов**

*Head — Prof. Dr. Igor Mitrofanov*



**И. С. Шкловский  
(01.07.1916–03.03.1985) —  
заведующий отделом  
внеатмосферной  
астрономии, основатель  
группы ядерных  
планетных исследований,  
которая положила начало  
современному отделу  
«Ядерной планетологии»  
ИКИ РАН**

*Dr. Iosif S. Shklovsky  
(July 1, 1916 — March 3, 1985)  
Head of the Extraterrestrial  
Astronomy Department is  
the founder of the nuclear  
planetology group, which  
originated the modern  
department of IKI*

**Лаборатория нейтронной и гамма-  
спектроскопии (631) (руководитель —  
д-р физ.-мат. наук Максим Литвак)**

**Лаборатория ядерно-физических приборов  
(632) (руководитель — канд. физ.-мат. наук  
Максим Мокроусов)**

**Лаборатория исследований элементного  
состава поверхности планет (633)  
(руководитель — д-р физ.-мат. наук  
Игорь Митрофанов)**

**Neutron and Gamma Spectroscopy Laboratory  
(631). Head — Dr. Maxim Litvak**

**Instruments for Nuclear Physics Measurements  
Laboratory (632). Head —  
Dr. Maxim Mokrousov**

**Planetary Surface Composition Laboratory  
(633). Head — Prof. Dr. Igor Mitrofanov**

Отдел 63 «Ядерной планетологии» — одно из самых молодых структурных подразделений ИКИ РАН. Он был создан 3 марта 2014 г. на базе самостоятельной лаборатории космической гамма-спектроскопии, которая была сформирована в августе 1992 г. из самостоятельной научной группы И.Г. Митрофанова. В свою очередь, решение о создании этой группы было принято в 1984 г. заведующим отделом внеатмосферной астрономии членом-корреспондентом АН СССР Иосифом Самуиловичем Шкловским (01.07.1916–03.03.1985).

Отдел Шкловского в то время был институтом в Институте — он объединял около полутора десятка лабораторий, тематика которых покрывала практически все спектральные диапазоны электромагнитного излучения — от радиоволн до рентгеновского и гамма-излучения. Кроме прочих, в отделе также был сектор теоретической астрофизики, который успешно расширял притязания отдела на космологию, гравитацию и физику элементарных частиц. (Читатели, жившие в ту эпоху, оценят высочайший статус отдела Шкловского в ИКИ по тому номеру, который он имел в институтской структуре — № 3, занимая место сразу же после таких важнейших структурных подразделений советского института, как «первый» и «второй» отделы.)

Характер «внеатмосферных» исследований отдела Шкловского требовал научных экспериментов на борту космических аппаратов, при том что конкуренция за место под «космическим Солнцем» тогда была достаточно высока, а приоритет в 1970–1980-е гг. отдавался исследованиям Венеры и Марса. С другой стороны, самой горячей областью астрофизики тех лет были космические гамма-всплески, в спектрах которых группой ленинградского астрофизика Е.П. Мазеца были обнаружены спектральные линии циклотронного и аннигиляционного излучения. Поэтому когда старший научный сотрудник отдела № 3 И.Г. Митрофанов обратился к Иосифу Самуиловичу с предложением провести для проверки результатов Мазеца космический эксперимент по гамма-спектроскопии космических вспышек, изобретательный Доктор (так

Department No. 63 for Nuclear Planetology is one of the most young departments in IKI. It was formed on 3 March 2014 on the basis of a separate laboratory of space gamma-ray spectroscopy, which was created in August 1992 from the Igor Mitrofanov research team. In turn a decision on putting this team together was made in 1984 by the head of the Extraterrestrial Astronomy Department, who was correspondent member of the Academy of Sciences Iosif Shklovsky.

Shklovsky's department was at that time an institute within the Institute, it combined approximately 15 laboratories, which covered almost all spectral range of the electromagnetic radiation, from radiowaves to X-ray and gamma rays. Moreover, it also included a theoretical astrophysics section, which successfully expanded on the department assertions to include cosmology, gravity, and elementary particle physics. (The readers from that period will appreciate the highest status of the Shklovsky's department by its number in the organizational structure — No. 3, right after such important departments of the Soviet institute as the "First" and the "Second".)

The nature of the department's extraterrestrial studies required scientific experiments onboard spacecraft, and that was in the environment of high competition with priorities in the 1970–1980s given to the investigations of Venus and Mars. On the other hand, the then "hottest" field in astrophysics was cosmic gamma-ray bursts, in which spectra the team headed by Leningrad astrophysicist Evgeny Mazets discovered spectral lines of the cyclotron and annihilation radiation. So when senior researcher of the department No. 3 Igor Mitrofanov approached Iosif Shklovsky with a proposal to conduct a space experiment on gamma spectroscopy and test Mazets's results, resourceful Doctor (as Shklovsky was called by his students) persuaded the head of the Institute and member of the Academy of Sciences Roald Sagdeev to upgrade the instrument GS-14 for recording of the Mars gamma radiation (principal investigator was Prof. Yuri Surkov, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytic Chemistry of the USSR Academy of Sciences) aboard the Mars spacecraft *Phobos 1* and *Phobos 2* with a small VGS unit for the accompanying study

звали И.С. его ученики) уговорил директора Института академика Р.З. Сагдеева дополнить на борту марсианских аппаратов «Фобос-1» и «Фобос-2» прибор ГС-14 (руководитель — профессор Ю.А. Сурков, Институт геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ) им. В.А. Вернадского АН СССР) для регистрации гамма-излучения Марса небольшим блоком ВГС (всплесковый гамма-спектрометр) для попутного изучения гамма-всплесков. Поскольку Митрофанов был физиком-теоретиком и не имел опыта создания лётной аппаратуры, блок ВГС по замыслу Доктора должны были разработать французы — традиционные партнёры ИКИ в космосе.

Достаточно скоро стало понятно, что всплесковый прибор ВГС также можно использовать для регистрации марсианских гамма-лучей во время пролёта вблизи Красной планеты, чтобы повысить пространственное разрешение при измерении гамма-лучей от марсианской поверхности. Так в 1984 г. в ИКИ появилась группа Митрофанова, работающая в областях спектроскопии космического гамма-излучения и «ядерной планетологии». А спустя пять лет, в феврале 1989 г., эта группа в составе советско-французского коллектива эксперимента APEX (Astrophysical Planetological EXperiment) с приборами ГС-14 и ВГС, впервые зарегистрировала и исследовала собственное гамма-излучение Марса.

### Основные направления исследований

- космические гамма-всплески и жёсткое излучение солнечных вспышек;
- ядерная планетология; в последние несколько лет это направление выдвинулось на первое место, в его рамках в отделе осуществляются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию новой бортовой аппаратуры;
- научно-организационное руководство подготовкой двух перспективных космических проектов Роскосмоса «Луна-25» (ОКР «Луна-Глоб») и «Луна-27» (ОКР «Луна-Ресурс-1»); отдел также отвечает за отработку и испытания комплексов научной аппаратуры этих проектов.

### Проекты с участием сотрудников отдела

ВГС (в составе прибора ГС-14, проект ФОБОС, 1988 г.)  
 «Марс-96» (1996),  
 ХЕНД (Mars Odyssey, NASA, 2001 г.)  
 БТН-М1 (эксперимент «БТН-Нейтрон», РС МКС, начало работы 2007 г.)  
 ЛЕНД (LRO, NASA, 2009 г.)  
 НС-ХЕНД («Фобос-Грунт», 2011 г.)  
 ДАН («Кьюриосити» (Curiosity), NASA, 2011 г.)

of gamma-ray bursts. Since Mitrofanov was a theoretical physicist and did not have experience in designing onboard hardware, the Doctor envisioned that the VGS unit would be designed by the French, IKI's usual partners in space.

It soon became clear that the gamma-ray burst unit could also be applied to register Mars gamma rays during the flight near the Red Planet in order to enhance the spatial resolution while measuring gamma rays from the Mars surface. And so in 1984 the Mitrofanov team was formed in IKI that specialized in cosmic gamma ray spectroscopy and “nuclear planetology”. Five years later, in February 1989, the team, being a part of the Soviet-French experiment APEX (Astrophysical Planetological EXperiment) for the first time recorded and studied the Mars own gamma radiation via GS-14 and VGS instruments.

### Research Areas

- cosmic gamma-ray bursts and solar flare hard X-ray bursts;
- nuclear planetology; in the last few years this line of research have come to the forefront, and in its frame the department conducts research and development of new onboard equipment;
- scientific and organizational supervision of two planned Roscosmos space missions *Luna-Glob* and *Luna-Resurs-Lander*; the department is also in charge of development and testing of scientific packages for these missions.

### Completed and Ongoing Projects

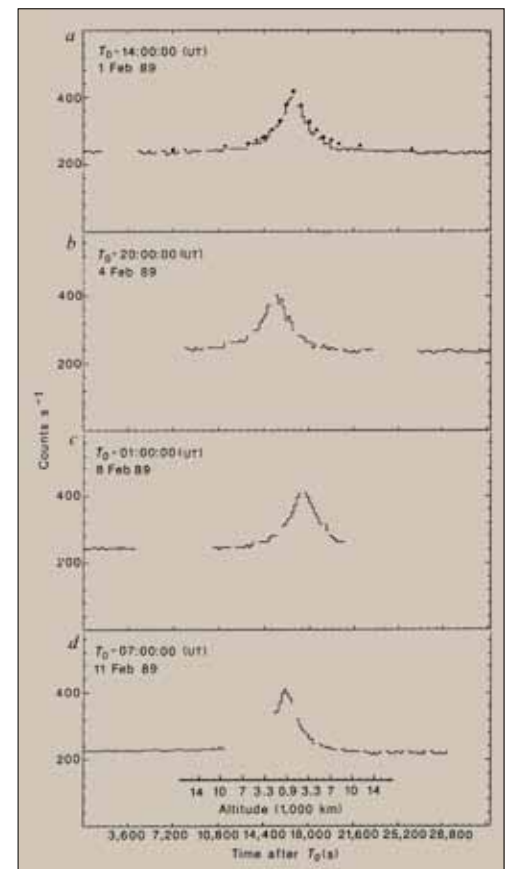
VGS (as part of the GS-14 instrument, *Phobos* mission, 1988)  
*Mars-96* (1996)  
 HEND (Mars Odyssey, NASA, 2001)  
 BTN-M1 (experiment *BTN-Neutron*, Russian segment of the International Space Station, 2007)  
 LEND (LRO, NASA, 2009)  
 NS-HEND (*Phobos Sample Return*, 2011)  
 DAN (*Curiosity*, NASA, 2011)



**Максим Литвак**  
Maxim Litvak



**Максим Мокроусов**  
Maxim Mokrousov



**Измерения потока гамма-излучения от Марса в советско-французском эксперименте APEX на борту аппарата «Фобос-2». Показаны профили потока гамма-лучей в четырёх последовательных пролётах над Марсом 1–11 февраля 1989 г. с минимальной высотой в перигецентре около 900 км**

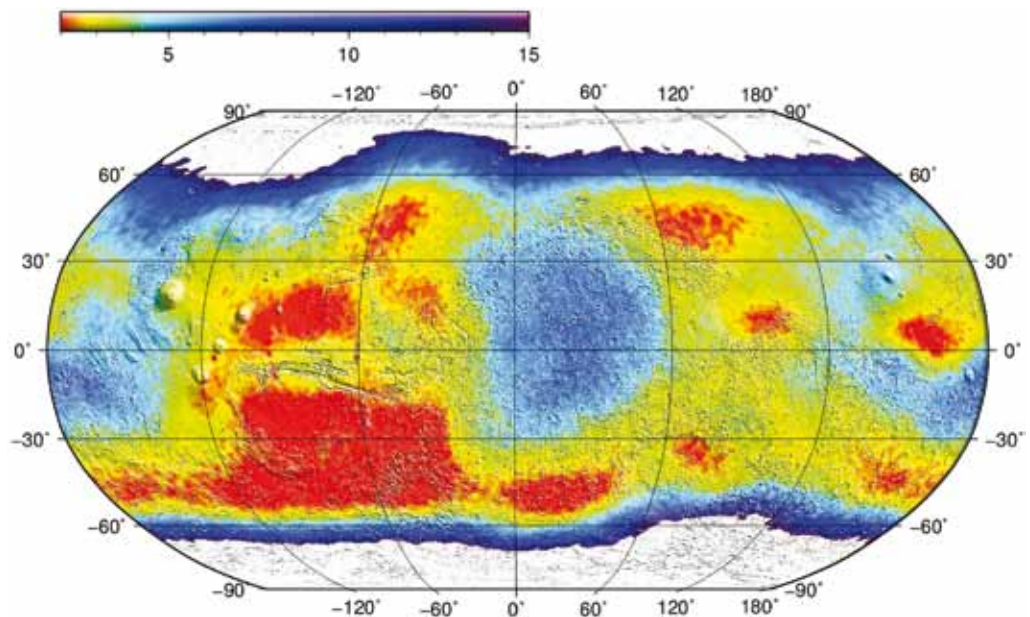
**Measurements of the Mars gamma ray flux in the Soviet-French experiment APEX aboard the Phobos 2 probe. The gamma ray flux profiles are visible in four successive passes over Mars on 1–11 February 1989 with the pericenter minimal altitude of ca. 900 km**





**Российский нейтронный детектор ХЕНД (HEND) на борту марсианского аппарата «Марс Одиссей»** (© НАСА, запуск 2001 г.)

Russian neutron detector HEND aboard the spacecraft Mars Odyssey (© NASA, launch in 2001)



**Карта распределения воды в грунте Марса (массовая доля, %), полученная по данным эксперимента ХЕНД (см. с 222). Белым цветом показаны районы полярной вечной мерзлоты, где доля водяного льда составляет десятки процентов**

Subsurface water distribution map of Mars (mass fraction, %) based on the HEND experiment data. The polar permafrost regions are white, where the water ice fraction is tens percent

### В стадии разработки

МГНС («Бепи Колумбо», ЕКА, 2017), на орбите вокруг Меркурия

ФРЕНД («ЭкзоМарс», орбитальный аппарат Trace Gas Orbiter, ЕКА/Роскосмос, 2016), на орбите вокруг Марса

АДРОН-МП и АДРОН-МР («ЭкзоМарс», марсоход «Пастер» и посадочная платформа, ЕКА/Роскосмос, 2018 г.), поверхность Марса

БТН-М2 (эксперимент «БТН-Нейтрон», Российский сегмент Международной космической станции, 2017 г.)

ЛГНС, АДРОН-ЛГ и АДРОН-ЛР на окололунной орбите и на поверхности Луны (проекты Роскосмоса «Луна-25» — «Луна-27», 2018–2020 гг.)

### Приборы, проекты, результаты

В настоящее время отдел проводит четыре космических научных эксперимента: на околоземной орбите (российский сегмент МКС), на окололунной орбите (проект NASA LRO — «Лунный орбитальный зонд», ЛРО), на околомарсианской орбите (проект NASA «Марс Одиссей») и на поверхности Марса (проект NASA «Кьюриосити»).

**Эксперимент ХЕНД (HEND).** Эксперимент проводится с апреля 2001 г. по настоящее время на борту марсианского космического аппарата NASA «Марс Одиссей» (Mars Odyssey).

### Projects In Development

MGNS (*BepiColombo*, ESA, 2017), Mercury orbital mission

FREND (*ExoMars, Trace Gas Orbiter*, ESA/Roscosmos, 2016), Mars orbital mission

ADRON-MP and ADRON-MR (*ExoMars, Rover Pasteur and Lander*, ESA/Roscosmos, 2018), Mars landing mission

BTN-M2 (experiment *BTN-Neutron*, Russian segment of the International Space Station, 2017)

LGNS, ADRON-LG and ADRON-LR for lunar orbital and landing mission (Roscosmos missions *Luna -Glob and Luna-Resurs*, 2018-20)

### Instruments, Projects, Results

Currently the Department conducts four space experiments: in low Earth orbit (the ISS Russian segment), in lunar orbit (NASA mission LRO), in Mars orbit (NASA mission *Mars Odyssey*) and on Mars surface (NASA mission *Curiosity*).

**Experiment HEND (High Energy Neutron Detector).** The experiment started in April 2001 to the present day aboard the NASA spacecraft *Mars Odyssey*.

Основная задача эксперимента — измерение нейтронного излучения поверхности Марса под воздействием потока космических лучей и изучение на основе анализа этих данных распространённости воды в веществе грунта Марса на глубине до 1 м. Основным научным результатом эксперимента ХЕНД — открытие районов с высоким содержанием воды в веществе грунта. По оценкам, содержание воды в экваториальных областях Земли Аравия (Arabia Terra) и Борозды Медузы (Medusae Fossae) составляет 7...10 % по массе, а на широтах выше 60° к северу и югу доля воды в грунте достигает десятков процентов.

Кроме этого, данные измерений прибора ХЕНД используются для изучения космических гамма-всплесков и жёсткого излучения солнечных вспышек, которых за время работы в космосе было зарегистрировано около 400. Данные измерений гамма-всплесков позволили определить расположение их источников на небесной сфере, а данные по солнечным вспышкам помогли измерить степень анизотропии излучения активных областей на поверхности Солнца.

По результатам эксперимента ХЕНД сотрудники отдела опубликовали более 30 статей в реферируемых журналах, в частности, две статьи в международном журнале *Science*, и сделано более 100 докладов на научных конференциях.

**Эксперимент БТН-М1** (бортовой телескоп нейтронов) проводится с 22 февраля 2007 г. на российском сегменте МКС как первый этап комплексного космического эксперимента «БТН-Нейтрон». Основные задачи эксперимента с аппаратурой БТН-М1 — изучение нейтронной компоненты радиационного фона на борту МКС и регистрация рентгеновского и гамма-излучения гамма-всплесков и солнечных вспышек. Для реализации эксперимента БТН-М1 использовался запасной лётный образец прибора ХЕНД, который был размещён в несущей термостабилизированной ферме и установлен на внешней поверхности модуля «Звезда» во время двух выходов в открытый космос российского космонавта Михаила Тюрин и американского астронавта Майкла Лопес-Алегрия. Управление экспериментом и связь с бортовыми системами МКС обеспечивает специально разработанный блок электроники, установленный внутри гермоотсека.

По результатам эксперимента БТН-М1 построена карта мощности эквивалентной радиационной дозы на борту МКС от нейтронной компоненты радиационного фона.

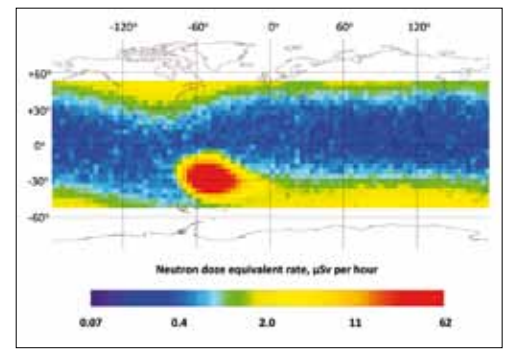
The main task of the experiment is to measure neutron radiation on the Mars surface, which is caused by cosmic ray flux, and following the data analysis to study water abundance in the Mars ground at the depth down to 1m. The main findings of the HEND experiment are discoveries of regions with high water content in the shallow subsurface ground matter. According to the estimates, the water content in the equatorial areas of Arabia Terra and Medusae Fossae is 7...10 % by weight, and in latitudes above 60° north and south the water content reaches tens of percent.

Moreover the measurement data of the HEND instrument is applied for studies of cosmic gamma-ray bursts and solar flare hard X-ray radiation, of which ca. 400 were recorded while in space. The gamma-ray burst measurements allowed to determine their sources on the celestial sphere, and the solar flare data supported radiation anisotropy measurements of the Sun's active areas.

Based on the results of the HEND experiment over 30 papers in peer-reviewed magazines were published, in particular two articles in the international magazine *Science*, and over 100 reports at scientific conferences were made.

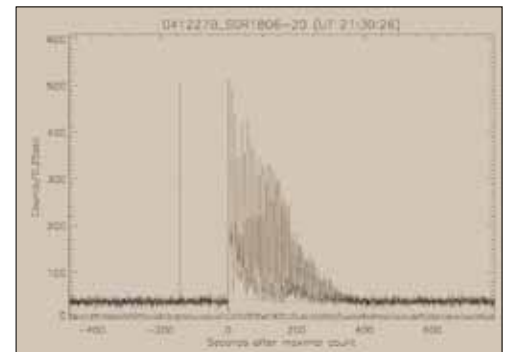
**BTN-M1 experiment** (short for Russian Onboard Neutron Telescope) is conducted since 22 February 2007 onboard the Russian segment of the ISS as the first stage of the *BTN-Neutron* space experiment. The main tasks of the experiment are the study of neutron component of the ISS background radiation and recording of X-ray and gamma-ray emission of gamma-ray bursts and solar flares. To implement the BTN-M1 experiment a backup flight unit of the HEND instrument located on the integrated truss was utilized, which was reinstalled on the external surface of the *Zvezda* module during two EVAs by Russian cosmonaut Mikhail Tyurin and American astronaut Michael Lopez-Alegria. The experiment control and communication with the ISS onboard systems is provided by a specially designed electronic block, mounted inside the pressurized shell.

From the BTN-M1 results the map was plotted for equivalent dose rate from the neutron component of the ISS background radiation.



**Карта для мощности эквивалентной радиационной дозы (мЗв/ч) от нейтронной компоненты радиационного фона на борту МКС по данным аппаратуры БТН-М1**

A map of equivalent dose rate (millisievert/hour) from the neutron component of the ISS background radiation according to BTN-M1 data



**Измеренный в эксперименте ХЕНД профиль уникального космического гамма-всплеска 27 декабря 2004 г.**

Unique gamma-ray burst profile measured by the HEND experiment on 27 December 2004



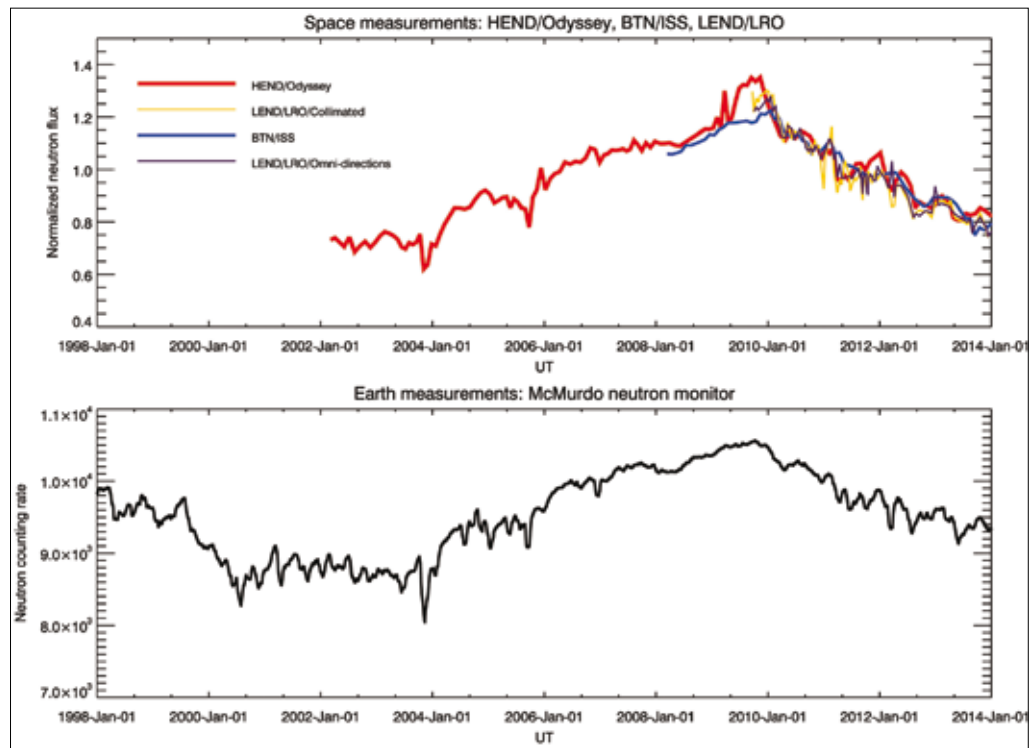
**Астронавт НАСА Майкл Лопес-Алегрия устанавливает внешний регистрационный блок аппаратуры БТН-М1 на внешней поверхности модуля «Звезда» Российского сегмента МКС. Фото российского космонавта-участника эксперимента БТН-М1 Михаила Тюрин**

Michael Lopez-Alegria, NASA astronaut, mounts the external detector assembly of the BTN-M1 hardware on the external surface of *Zvezda* module of the RS ISS. The photo is taken by Mikhail Tyurin, Russian cosmonaut and a participant of the BTN-M1 experiment



**Профили вариаций галактических космических лучей во внутренней области Солнечной системы по данным приборов ХЕНД, БТН-М1 и ЛЕНД (вверху) и их сопоставление с наземными наблюдениями на арктической станции Мак-Мердо (внизу)**

*Profiles of galactic cosmic rays variations in the inner Solar system according to the data of HEND, BTN-M1, and LEND (up) and their correlation with ground observations from the arctic station McMurdo (down)*



Кроме этого, данные совместных измерений прибора БТН-М1 с другими ядерно-физическими приборами отдела позволили измерить синхронные профили долговременных вариаций потоков космических лучей в различных областях Солнечной системы: на околоземной орбите (прибор БТН-М1), на орбите вокруг Марса (прибор ХЕНД) и на орбите вокруг Луны (прибор ЛЕНД, см. ниже).

Besides the measurement data of combined BTN-M1 and other nuclear instruments of the Department enabled measurements of synchronous profiles of long-term flux variations of cosmic rays in different areas of the Solar system: in low Earth orbit (BTN-M1 instrument), in Mars orbit (HEND instrument), and in Moon orbit (LEND instrument, see below).



**Натурно-массовый образец прибора ЛЕНД готовится к приёмодаточным испытаниям в ИКИ РАН перед отправкой в НАСА. Слева направо: представители группы контроля качества и надёжности Е. В. Ларионов и Б. С. Новиков, конструктор прибора В. С. Трошин, руководитель эксперимента И. Г. Митрофанов и член научной команды эксперимента Р. З. Сагдеев**

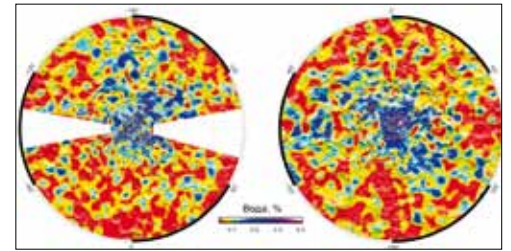
*A full-scale prototype of the LEND instrument is prepared for acceptance tests at IKI prior to shipping to NASA. L-R: QC group representatives E. Lariонов and B. Novikov, instrument designer V. Troshin, principal investigator I. Mitrofanov and member of the experiment science team R. Sagdeev*



**Сотрудники отдела Максим Мокроусов (вверху) и Антон Санин (справа) получают премию Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых учёных (2010) за успешную разработку и реализацию космического эксперимента ЛЕНД**



*The Department members Maxim Mokrousov (left) and Anton Sanin (top) receive the Presidential Award in Science and Innovations for Young Scientists (2010) for successful development and implementation of the LEND space experiment*



**Карты распространённости воды в реголите северного (слева) и южного (справа) полюсов Луны по данным нейтронного телескопа ЛЕНД на борту лунного спутника ЛРО (НАСА)**

*Maps of water abundance in the lunar regolith of the North (left) and South (right) poles according to the data of the LEND neutron telescope onboard the LRO satellite (NASA)*

По результатам эксперимента БТН-М1 опубликовано 5 статей в реферируемых журналах и сделано около 20 докладов на научных конференциях.

**Эксперимент ЛЕНД (LEND)** проводится с июня 2009 г. на борту лунного спутника NASA LRO (ЛРО). Этот эксперимент основан на принципиально новой разработке коллиматора космического нейтронного телескопа, который позволяет достичь пространственного разрешения около 10 км на поверхности Луны при наблюдениях с орбиты с высотой около 50 км.

На основе обработки данных измерений нейтронного излучения от полярных районов Луны с высоким пространственным разрешением были впервые построены карты распространённости воды в лунном реголите на северном и южном полюсах Луны. Эти результаты определили современные представления о природных условиях и о распространённости воды и летучих соединений на северном и южном полюсах Луны. Результаты эксперимента ЛЕНД будут использоваться при планировании будущих научных и исследовательских миссий на лунные полюса.

Основные участники космического эксперимента ЛЕНД — молодые сотрудники отдела канд. физ.-мат. наук Максим Мокроусов и канд. физ.-мат. наук Антон Санин — получили премии Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых учёных за 2010 г.

По результатам эксперимента ЛЕНД опубликовано более 15 статей в реферируемых журналах, в частности, две статьи в международном журнале *Science*, и сделано около 100 докладов на научных конференциях.

Based on the results of the BTN-M1 experiment 5 papers were published in peer-reviewed magazines and ca. 20 reports presented at scientific conferences.

**LEND experiment (Lunar Exploration Neutron Detector)** is conducted since June 2009 onboard the NASA lunar satellite LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*). The experiment is based on a brand new collimator for space neutron telescope, which achieves spatial resolution of ca. 10 km on the Moon surface with orbital observation at ca. 50 km.

On the basis of the processed neutron radiation measurement data of the Moon polar regions with high spatial resolution for the first time maps of water abundance in the lunar regolith of the North and South poles were compiled. The results define present-day ideas on natural environment and abundance of water and volatile compounds on the North and South poles of the Moon. The LEND findings will be utilized for planning of subsequent scientific and research missions to the lunar poles.

The principal participants of the LEND space experiment Dr. Maxim Mokrousov and Dr. Anton Sanin were awarded the President of Russian Federation Award in Science and Innovation for Young Scientists for 2010.

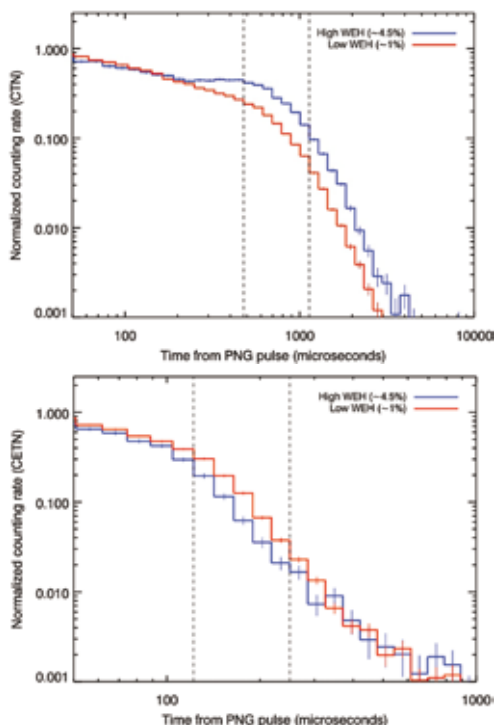
Based on the results of the LEND experiment over 15 papers were published in peer-reviewed magazines, in particular two articles in the international magazine *Science*, and over 100 reports were presented at scientific conferences.



**Защита эскизного проекта космического эксперимента ДАН с участием представителей Роскосмоса и НАСА**

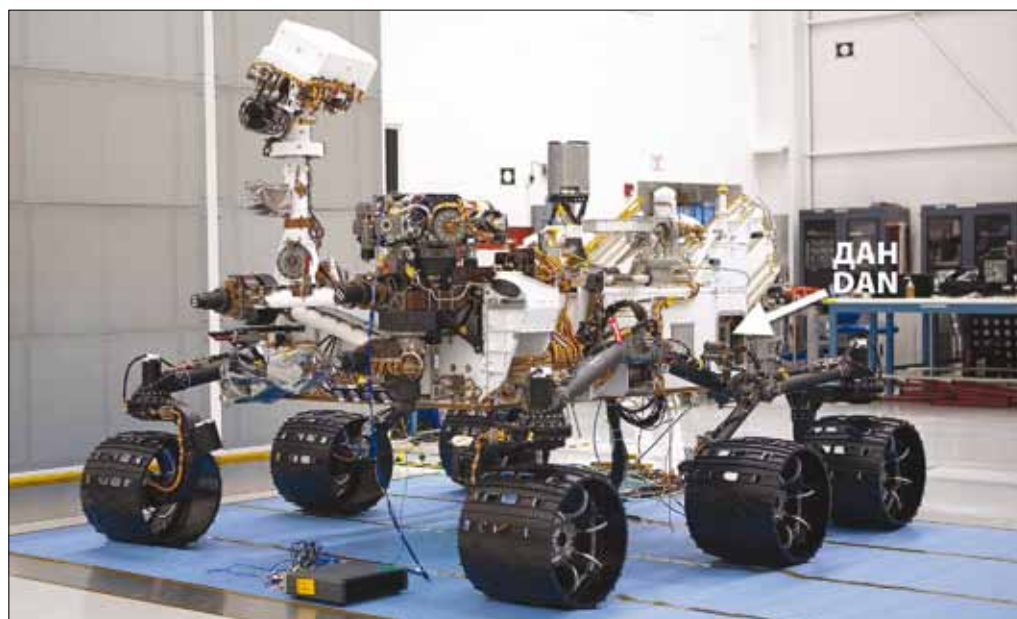
*Presentation of the DAN space experiment concept with the involvement of Roscosmos and NASA representatives*





**Измеренные в эксперименте ДАН профили послесвечения тепловых (вверху) и эпитепловых (внизу) нейтронов для сухого (красный цвет, около 1 % воды по массовой доле) и влажного (синий цвет, около 5 % воды по массовой доле) марсианского грунта в окрестности посадки марсохода «Кьюриосити» в кратере Гейл. WEH (water equivalent hydrogen) означает массовую долю воды по данным измерений содержания в грунте водорода**

Afterglow profiles of thermal (up) and epithermal (down) neutrons measured in the DAN experiment for dry (red color, ca. 1 % of water by weight) and wet (blue color, ca. 5 % of water by weight) Martian soil in the vicinity of the Curiosity landing in the Gale Crater. WEH (water equivalent hydrogen) is mass fraction of water according to the hydrogen measurement data for the soil



**Марсоход NASA «Кьюриосити» (©NASA) с российской аппаратурой ДАН на борту. Виден блок детекторов, установленный в специальном отделении внутри корпуса марсохода**

The NASA Mars rover Curiosity (©NASA) with the Russian DAN instrument. The detector block is visible, mounted in the special compartment inside the rover body

**Эксперимент ДАН на борту марсохода NASA «Кьюриосити» (Curiosity).** Эксперимент ДАН на борту марсохода Curiosity проводится на поверхности Марса с августа 2012 г. по настоящее время. В эксперименте впервые в космических исследованиях реализован ядерно-физический метод активного нейтронного зондирования вещества поверхности Марса для измерения содержания воды в грунте вдоль трассы движения марсохода.

Аппаратура ДАН установлена с левой и правой стороны в задней части приборного отсека марсохода. Она включает импульсный генератор нейтронов с энергией 14 МэВ и детекторы эпитепловых и тепловых нейтронов, которые излучаются верхним слоем поверхности в течение нескольких миллисекунд после импульсного облучения нейтронами от генератора.

Построенное на основе анализа данных аппаратуры ДАН распределение среднего по глубине содержания воды в слое с толщиной 60 см представлено на рисунке. Эти значения находятся в пределах от 1 до 3 % по массе со средним значением около 1,9 %. При этом объёмная плотность вещества практически не изменялась и составляла 1,5...2,2 г/см<sup>3</sup> со средним значением около 1,85 г/см<sup>3</sup>, а содержание хлора изменялось в интервале 0,75...1,75 % со средним значением около 1,1 % по массе.

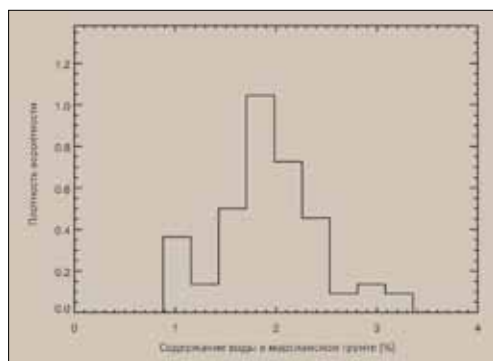
По результатам эксперимента ДАН опубликовано 10 статей в реферируемых журналах и сделано около 50 докладов на научных конференциях.

**DAN experiment (Dynamic Albedo of Neutrons) onboard the Mars rover Curiosity (NASA)** is conducted on the Mars surface since August 2012 to the present day. For the first time in space research the experiment implemented active neutron sensing of the Mars surface to measure water content in the ground along the rover route.

The DAN hardware is mounted on the left and right sides at the rear of the rover instrument section. It includes a pulsed neutron generator at the energy of 14 MeV and detectors of epithermal and thermal neutrons, which are radiated by the surface for a few milliseconds after pulsed neutron irradiation by the generator.

The distribution of depth-mean water content in the upper layer of 60 cm thickness is illustrated in the figure. These values are within 1 to 3 % by weight with an average value ca. 1.9 %. At that the volume density of the matter is practically unchanged and amounts to 1.5...2.2 g/cm<sup>3</sup> with an average value of ca. 1.85 g/cm<sup>3</sup>, and the chlorine content measured within 0.75...1.75 % with an average of ca. 1.1 % by weight.

Based on the results of the DAN experiment 10 papers were published in peer-reviewed magazines and ca. 50 reports presented at scientific conferences.



**Распределение средних по глубине оценок содержания воды в верхнем слое с толщиной 60 см вдоль трассы движения марсохода по данным активных измерений прибором ДАН в течение первого года работы прибора**

Distribution of depth-mean water content in the upper layer of 60 cm thickness along the rover route, according to the DAN active measurements during the first year of the instrument operation

## Будущие космические эксперименты отдела

В настоящее время отдел разрабатывает бортовую аппаратуру и подготавливает наземный сегмент для восьми космических научных экспериментов.

**Эксперимент ФРЕНД (FREND)** будет проведён на борту марсианского космического аппарата TGO — первой миссии ЕКА в рамках российско-европейской программы «ЭкзоМарс», запуск которой запланирован на 2016 г. Нейтронный телескоп ФРЕНД разработан на основе опыта создания прибора ЛЕНД и предназначен для картографирования потока нейтронного излучения с поверхности Марса с высоким пространственным разрешением около 80 км. Это почти в 10 раз превышает пространственное разрешение карты нейтронного излучения Марса, построенной на основе обработки данных измерений всенаправленными детекторами прибора ХЕНД.

Данные измерений телескопа ФРЕНД впервые позволят провести орбитальную разведку содержания воды в верхнем слое грунта поверхности Марса, причём высокое пространственное разрешение данных измерений позволит сопоставить районы с повышенным содержанием воды с конкретными структурами марсианского рельефа. В состав прибора ФРЕНД также входит блок дозиметра «Люлин-МО», разработанный Институтом космических исследований и технологий Болгарской академии наук, София. Этот блок измерит радиационную обстановку на околомарсианской орбите, а также на перелёте к Марсу, знание которой необходимо для планирования пилотируемых полётов к Марсу в будущем.

**Эксперимент БТН-2** продолжает эксперимент БТН-М1 на борту российского сегмента МКС. Его основная задача — детальное изучение радиационного фона гамма-лучей и нейтронов на борту РС МКС. Планируется изучить угловое распределение указанного фонового излучения относительно базовых осей станции на различных участках околоземной орбиты в условиях спокойной магнитосферы и во время солнечных вспышек. Вторая научная задача эксперимента связана с регистрацией солнечных вспышек гамма-излучения, гамма-всплесков и вспышек гамма-лучей от электрических разрядов в верхней атмосфере Земли с высоким временным разрешением. Третья научно-практическая задача эксперимента состоит в экспериментальном изучении возможностей радиационной защиты от нейтронов и гамма-лучей на борту МКС. Аппаратура БТН-2 состоит из блока детектирования, который разрабатывается на основе опыта разработки прибора МГНС (см. ниже), блока управления и комплекта съёмных экранов для поглощения нейтронов и гамма-лучей.

## Planned Space Experiments of the Department

Currently the department designs onboard equipment and sets up ground segments for eight space experiments.

**Experiment FREND (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector)** will be conducted aboard the Martian space vehicle TGO (short for *Trace Gas Orbiter*) — the first ESA mission under the Russian-European program *Exo-Mars*, with launch scheduled for 2016. The neutron telescope FREND is developed based on the LEND experiences and is intended for mapping of neutron flux from the Mars surface with high spatial resolution ca. 80 km. This is almost 10 times higher than the spatial resolution of the Mars neutron flux map generated from the processed data of the HEND omnidirectional detectors.

The FREND measurement data should allow for the first time to conduct orbital survey of the water content in Mars shallow surface. Moreover high spatial resolution will enable to cross-reference the high water content areas with specific Mars surface formations. The FREND instrument also includes a dosimeter unit *Lyulin-MO*, designed by the Space Research and Technology Institute of the Bulgarian Academy of Sciences in Sofia. This unit will measure the radiation environment on the low Mars orbit, as well as during the flight to Mars, whose values will be important for planning of manned Mars missions in the future.

**Experiment BTN-2 (Onboard Neutron Telescope, version 2)** continues the BTN-M1 experiment aboard the Russian segment of the ISS. Its primary task is a detailed study of gamma-ray and neutron background radiation onboard the RS ISS. It is planned to study angular distribution of background radiation relative to the station reference axis on different orbital flight phases under the conditions of quiet magnetosphere and during solar flares. The second task is related to recording with high temporal resolution of solar gamma bursts, gamma-ray bursts, and gamma-ray flashes in the Earth upper atmosphere. The third research task is experimental study of radiation shielding capabilities against neutrons and gamma rays aboard the ISS. The BTN-2 equipment is comprised of a detector block, which is developed based on the MGNS experience (see below), a control block and removable shields assembly for neutron and gamma-ray absorption.



**Общий вид лётного образца марсианского нейтронного телескопа ФРЕНД (вверху) и установка лётного образца ФРЕНД на борт КА ЕКА TGO (внизу)**

General configuration of a flight unit of the FREND neutron telescope (up) and general installation of the FREND flight unit on the ESA space vehicle TGO (down)



**Общий вид аппаратуры для эксперимента БТН-М2: 1 — разъёмы блока детектирования; 2, 3 — семь комплектов съёмных экранов для поглощения нейтронного и гамма излучения**

General configuration of hardware for the BTN-M2 experiment: 1 — detector block sockets; 2, 3 — seven removable shields assembly for absorption of neutron and gamma radiation





Общий вид лётного образца прибора МГНС (вверху) и общий вид установки лётного образца МГНС на борту КА «Бепи Коломбо» (внизу)

General configuration of a flight unit of the MGNS instrument (up) and general arrangement of the MGNS instrument on board the spacecraft *BepiColombo* (bottom)

Эти экраны создаются на основе опыта разработки коллиматоров нейтронов для телескопов ЛЕНД и ФРЕНД.

**Эксперимент МГНС (MGNS)** на борту аппарата ЕКА «Бепи Коломбо» разрабатывает аппаратуру для изучения состава вещества Меркурия на основе измерений спектра гамма-излучения и нейтронного потока с поверхности этой планеты. Для спектроскопии гамма-лучей в приборе применяется инновационный сцинтилляционный кристалл  $CeBr_3$  с высоким спектральным разрешением около 4 % для энергии 662 кэВ и с предельно низким собственным фоном. Для регистрации нейтронов применяются счётчики на основе гелия-3, аналогичные успешно зарекомендовавшим себя счётчикам прибора ХЕНД. Запуск космического аппарата «Бепи Коломбо» запланирован на 2017 г.

В эксперименте будут продолжены исследования состава вещества Меркурия с орбиты, которые были начаты в проекте NASA *Messenger*. Эксперимент МГНС позволит измерить содержание основных породообразующих элементов и естественных радиоактивных изотопов в веществе поверхности Меркурия, а также оценить количество воды в реголите полярных районов этой планеты. Поскольку гамма-спектрометр на аппарате *Messenger* оказался неработоспособным, данные МГНС могут предоставить первые результаты о геохимии поверхности Меркурия.

**Эксперимент ЛГНС** будет проводиться на перспективном российском лунном орбитальном аппарате «Луна-26», запуск которого намечен на 2019 г. Прибор предназначен для измерений с полярной окололунной орбиты потоков и энергетических спектров гамма-лучей и нейтронов с поверхности Луны. На основе полученных данных предполагается построить карту элементного состава лунного реголита и распространённости в нём естественных радиоактивных изотопов. Таким образом, в эксперименте ЛГНС планируется продолжить глобальные исследования элементного состава Луны, проведённые в американском и японском проектах *Lunar Prospector* и *Kaguya*. Особенность эксперимента — возможность сравнить данные орбитальных ядерно-физических измерений с данными аналогичных измерений непосредственно на поверхности Луны. Прибор ЛГНС будет создан на основе опыта разработки прибора МГНС, в нём также будут использоваться перспективные детекторы гамма-лучей на основе  $CeBr_3$ .

**Эксперименты серии АДРОН.** Приборы этой серии предназначены для активных измерений элементного состава поверхности Луны и Марса непосредственно с борта спускаемого аппарата с применением импульсного нейтронного генератора для облучения поверхности и детекторов вторичного излучения гамма-фотонов и нейтронов от облучённого вещества поверхности. В качестве

The shields are designed based on neutron collimator experience for LEND and FRENTE telescopes.

**Experiment MGNS (Mercury Gamma and Neutron Spectrometer)** aboard the ESA spacecraft *BepiColombo* is designed to study Mercury composition on the basis of the gamma-ray and neutron flux measurements from the planet surface. For the gamma-ray spectroscopy the instrument uses the innovative scintillation crystal  $CeBr_3$  with high spectral resolution ca. 4 % at the energy of 662 keV and extremely low intrinsic background. To record neutrons it applies helium-3 filled counters, which are analogous to the well-proven counters of the HEND instrument. The launch of the spacecraft *BepiColombo* is scheduled for 2017.

The experiment will continue the orbital study of the Mercury composition that began during the NASA mission *Messenger*. The MGNS experiment should enable to measure content of basic rockforming elements and naturally-occurring radioactive isotopes in the Mercury surface matter, as well as estimate the quantity of water in the regolith of the planet's polar regions. Since the gamma spectrometer on the *Messenger* craft turned out to be inoperative, the MGNS data can provide the first findings on the Mercury surface geochemistry.

**Experiment LGNS (Lunar Gamma and Neutron Spectrometer)** will be conducted on an upcoming Russian lunar *Luna-Resurs-Orbiter*, which is scheduled for launch in 2019. The instrument is designed to measure from the polar lunar orbit fluxes and energy spectra of gamma rays and neutrons from the lunar surface. The obtained data is planned to be the basis of a map of Moon regolith composition and occurrences of natural radioactive isotopes. Therefore the LGNS experiment should continue the global studies of the lunar composition, conducted during the American and Japanese missions *Lunar Prospector* and *Kaguya* respectively. The distinctive characteristic of the experiment is an opportunity to compare the orbital nuclear measurement data to the similar measurements on the Moon surface (see description of the ADRON experiments). The LGNS instrument will be designed based on the MGNS development experience, and it is going to use advanced gamma ray detectors based on  $CeBr_3$ .

**ADRON experiments (Active Detector Gamma-Ray and Neutron).** The instruments of the series are designed for active measurements of the Moon and Mars surface composition directly from aboard the lander, that apply a pulsed neutron generator to irradiate the surface and detectors of gamma-ray photons and neutrons from the irradiated surface. For the neutron generator the ADRON hardware

генератора нейтронов в аппаратуре АДРОН применяются генераторы, разработанные для эксперимента ДАН, а конструкция детекторов основана на разработках прибора МГНС. Различные модификации аппаратуры АДРОН будут установлены на борту российских лунных посадочных аппаратов «Луна-25» и «Луна-27» и на борту российского посадочного аппарата и европейского марсохода российско-европейского проекта «ЭкзоМарс» (миссия с запуском в 2018 г.).

### Проекты отдела

Отдел является ведущим структурным подразделением Института по двум перспективным космическим проектам: «Луна-25» и «Луна-27». Сотрудники отдела готовят научную программу исследований этих лунных миссий, проводят комплексные испытания образцов научной аппаратуры на стендах ИКИ РАН и в НПО им. С. А. Лавочкина, обеспечивают научно-организационную поддержку реализации этих проектов.

Отдел также проводит исследования по конкурсному проекту Российского научного фонда «Ядерная планетология». В его рамках разрабатываются новые перспективные приборы для ядерно-физических исследований Луны, планет и небесных тел Солнечной системы, проводятся специальные ядерно-физические наземные эксперименты (физические калибровки и полевые испытания) для интерпретации экспериментальных данных, полученных в космических экспериментах, и изучаются свойства небесных тел Солнечной системы на основе анализа данных научных приборов на борту космических аппаратов.

Исследования и разработки отдела проводятся на основе широкой кооперации с ведущими российскими научными и исследовательскими организациями, и также с иностранными исследовательскими центрами. В их числе — Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова (ВНИИА), Институт физики атомных реакторов, Объединённый институт ядерных исследований (Дубна) (ОИЯИ), Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС), Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН) и другие. Десять сотрудников отдела входят в международные научные группы космических проектов NASA «Марс Одиссей», LRO, «Кьюриосити» и проектов ЕКА «Бепи Колombo» и «ЭкзоМарс».

Отдел — это сплочённый коллектив единомышленников, объединённый общей целью — развитием российской космической науки на основе современных ядерных и электронных технологий.

applies generators developed for the DAN experiment, and the detector design is based on the MGNS instrument. Various modifications of the ADRON equipment will be mounted on the Russian lunar landers *Luna-Glob* and *Luna-Resurs*, as well as the Russian lander and the European Mars rover under the Russian-European mission *ExoMars* (mission launch in 2018).

### Department Projects

The Department is the leading division of the Institute in two future space missions: *Luna-Glob* and *Luna-Resurs-Lander*. The Department employees prepare research programs for these missions, conduct tests of the hardware at IKI and Lavochkin Association, and provide scientific and organizational support of these missions.

The Department also leads researches under a competitive project of the Russian Science Foundation “Nuclear Planetology”. For the purpose of the project new advanced instruments are designed for nuclear physics investigations of the Moon, planets, and small bodies of the Solar system, special nuclear ground-based experiments (physical calibrations and field trials) are conducted for interpretation of the experimental findings, and the properties of the celestial bodies in the Solar System are investigated based on the instrument data analysis.

Research and development of the Department are carried out based on extensive cooperation with the leading Russian science and research institutes, as well as foreign research centers. These include the Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics, Institute of Physics of Nuclear Reactors, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna), A. A. Blagonravov Institute for Engineering Science of RAS, Fedorovsky All-Russia Research Institute of Mineral Resources, Ioffe Physical and Technical Institute, and others. Ten of the employees are included in the international science teams for the NASA missions (*Mars Odyssey*, LRO, *Curiosity*) and ESA missions (*BepiColombo*, *ExoMars*).

The Department is a tight-knit group of like-minded people, bound by a common goal — to advance the Russian space science with modern nuclear and electronic technologies.



**Сотрудник отдела №63 Андрей Вострухин подготавливает прибор АДРОН-ЛГ к комплексным испытаниям научной аппаратуры проекта «Луна-25»**

Andrey Vostrukhin prepares the ADRON-LG instrument for the tests of the Luna-Glob hardware





*Коллектив отдела  
ядерной планетологии  
№63 с образцами приборов  
МГНС, ХЕНД, ЛЕНД, ДАН  
и АДРОН (слева направо)*

*The department staff  
holding prototypes  
of MGNS, HEND, LEND, DAN,  
and ADRON (left to right)*