

**ОТДЕЛ ФИЗИКИ ПЛАНЕТ
(53)
PLANETARY PHYSICS
DEPARTMENT
(53)**



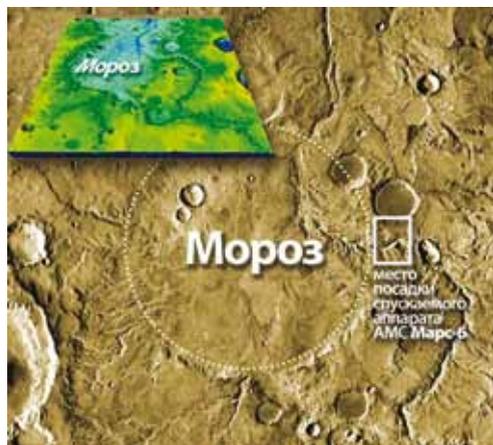
**Руководитель —
д-р физ.-мат. наук Олег Кораблёв**

Head — Dr. Oleg Korablev



**Профессор В. И. Мороз
(20.05.1931–23.06.2004)**

Prof. V.I. Moroz
(May 20, 1931 – June 23, 2004)



Исследования других планет и малых тел Солнечной системы в ИКИ почти десять лет были одной из задач отдела астрофизики и превратились в самостоятельное направление лишь в 1973–1974 гг. К этому времени стало понятно, что исследования планет — самостоятельное мощное направление космической науки, которое требует своих инструментов, подходов и методов. Космические аппараты подарили исследователям возможность изучать другие планеты Солнечной системы не только издали с помощью телескопов, но и с гораздо более близких расстояний: с орбит вокруг небесных тел, при пролёте около них и, конечно, непосредственно на поверхности. Так начиналась эпоха планетных экспериментов *in situ* (на месте нахождения, *лат.*).

Первый руководитель отдела — **Василий Иванович Мороз** (20.05.1931–23.06.2004), создатель научной школы и основатель инфракрасной спектроскопии в России. ИК-спектрометр на орбите — эффективное средство исследования планет, так как спектр планеты содержит характерные полосы присутствующих в атмосфере газов, информацию о вертикальном профиле её температуры, температуре и составе поверхности, о составе и распределении аэрозольной компоненты. Полученная информация позволяет судить об условиях на планете, в частности о её динамике, и используется для расчёта моделей атмосферы.

Сегодня отдел объединяет различных специалистов: теоретиков, экспериментаторов, инженеров — в области физических исследований атмосферы и поверхности других планет Солнечной системы. В первую очередь, речь идёт о Марсе и Венере, двух ближайших планетных соседях Земли, которые исторически пользовались повышенным вниманием космических исследователей. Но не только о них: работы отдела посвящены также Меркурию, планетам-гигантам Юпитеру и Сатурну и малым телам: спутникам планет, кометам и астероидам. Новое направление — изучение экзопланет в других звёздных системах.

Завершённые и текущие проекты

Исследования Венеры: аппараты «Венера-4» — «Венера-16» (1967–1983), «Вега-1, -2» (1984), *Venus Express* (ЕКА, 2005–2015)

Исследования Марса: «Марс-3» — «Марс-6» (1971–1973), «Фобос-2» (1988–1989), «Марс-96» (1996), *Mars Surveyor'98 Program* (аппараты MCO и MPL, NASA,

20 августа 2007 г. решением рабочей группы по номенклатуре системы планет при Международном астрономическом союзе название Мороз было официально присвоено одному из кратеров на Марсе. Кратер Мороз (диаметром 123 км) расположен на древней возвышенности Марса (23,7° ю. ш., 20,6° з. д.) вблизи от места посадки советского космического аппарата «Марс-6»

Exploration of planets and small bodies of the Solar system in IKI was conducted within the astrophysics department for almost ten years and turned into an independent line of research in 1973–1974 only. By that time it has become clear that planetary exploration is an independent strong branch of space science which requires its own instruments, approaches and methods. The spacecraft have given explorers a chance to study other planets not only from afar using the telescopes, but much closer: first during fly-bys, then from the orbit around a celestial body, and eventually on its surface. This was the beginning of the *in situ* — on site (*Lat.*) planetary experiments era.

The first head of the planetary department was Professor Dr. **Vasily Moroz**, the founder of the scientific school and the originator of the infrared spectrometry in Russia. The IR-spectrometer on orbit is an effective means of planetary explorations, since the planetary spectrum contains distinctive bands of gases in the atmosphere, information of its temperature vertical profile, and surface composition, of the composition and distribution of the aerosol component. The obtained information enables to estimate the conditions on the planet, particularly its dynamics, and is used to constrain atmospheric models.

Today the department joins together various specialists: theoreticians, researchers, engineers in the field of physical research of the atmosphere and surface of the planets of the Solar system. First of all, we are talking about Mars and Venus, two closest neighbors of the Earth which historically received greater attention of space researchers. But not limited to these two planets. The research involves also Mercury, giant planets Jupiter and Saturn, and small bodies: planetary satellites, comets and asteroids. The new line of research is exploration of exoplanets in other star systems.

Completed / Ongoing Projects

Venus exploration: *Venera 4* — *Venera-16* (1967–1983), *Vega 1* and 2 (1984), *Venus Express* (ESA, 2005–2015)

Mars exploration: *Mars 3* — *Mars 6* (1971–1973), *Phobos 2* (1988), *Mars-96* (1996), *Mars Surveyor'98 Program* (*Mars Climate Orbiter* and *Mars Polar Lander*, NASA, 1998), *Mars Express*

On August 20, 2007, the International Astronomical Union Working Group for Planetary System Nomenclature adopted the name Moroz for one of the Martian craters. Moroz crater (123 m diameter) is located on an ancient elevation (23.7 South lat., 20.6 West long.) near the landing site of Soviet Mars 6 spacecraft

1998), Mars Express (ЕКА, 2003), MER* (Spirit и Opportunity, NASA, 2003)

Исследование Земли из космоса: РУСАЛКА (Ручной Спектральный Анализатор Компонентов Атмосферы) (российский сегмент Международной космической станции, 2009–2012 гг.)

Будущие проекты

Исследования Марса: «ЭкзоМарс» (ЕКА/Роскосмос, 2016 и 2018 гг.)

Исследования Луны: «Луна-25» («Луна-Глоб», 2018 г.), «Луна-26» («Луна-Ресурс-Орбитальный», 2019 г.), «Луна-27» («Луна-Ресурс-Посадочный», 2020 г.)

Исследования Меркурия: BepiColombo (ЕКА, 2017 г.)

Мониторинг Земли: ДРИАДА (российский сегмент Международной космической станции, 2017 г.)

Исследования Венеры: «Венера-Д» (+2020)

Исследования Юпитера: «Лаплас» (посадочный аппарат на Ганимед, +2020)

Наблюдения планет и малых тел Солнечной системы, экзопланет: «Планетный мониторинг» (РС МКС; +2018), «Звёздный патруль» (2022)

Лаборатория спектроскопии планетных атмосфер (531) (руководитель — д-р физ.-мат. наук Людмила Засова)

Лаборатория была образована одновременно с созданием всего отдела физики планет № 4 1 мая 1974 г., когда из ГАИШ на постоянную работу в ИКИ в качестве руководителя отдела перешёл **В. И. Мороз**. Он руководил лабораторией с момента создания и до своего ухода из жизни в 2004 г.

Лаборатория занимается исследованиями планет Солнечной системы (Венеры и Марса) с космических аппаратов от постановки научных задач, проектирования научных приборов, их изготовления и установки на космические аппараты, обработкой и интерпретацией полученных научных данных. Приборы, созданные в лаборатории, работали на аппаратах «Венера-9...-16», «Vega-1, -2», «Венера-Экспресс» (ЕКА) и продолжают работать на КА «Марс-Экспресс» (ЕКА).

Основные направления исследований

Научные направления

- Перенос излучения в атмосферах Марса и Венеры, включая создание алгоритмов решения прямых и обратных задач переноса излучения в оптически толстых атмосферах с многократным рассеянием и сферической геометрии;

(ESA, 2003), Mars Exploration rovers (Spirit and Opportunity, NASA, 2003)

Earth remote sensing: *Rusalka* (onboard the ISS, 2009–2012)

Projects in Development

Mars exploration: *ExoMars* (ESA/Roscosmos, 2016 and 2018)

Moon exploration: *Luna-Glob* (2018), *Luna-Resurs-Orbiter* (2019), *Luna-Resurs-Lander* (2020)

Mercury exploration: *BepiColombo* (ESA, 2017)

Earth remote sensing: *Driada* (onboard the ISS, 2017)

Venus exploration: *Venera-D* (+2020)

Jupiter exploration: *Laplace-P* (a landing module for Ganymede, +2020)

Observations of planets and small bodies of the solar system, exoplanets: *Planetary Monitoring* (onboard the ISS, +2018), *Star Patrol* (2022)

Laboratory of Planetary Atmospheres Spectroscopy (531). Head — Dr. Ludmila Zasova

The laboratory (former №41) was founded simultaneously with the planetary physics department № 4 on May 1, 1974, when **V. I. Moroz** came to work as the department head on a permanent basis from the Sternberg Astronomical Institute he worked before. He headed the laboratory from the date of its foundation till his death in 2004.

The laboratory deals with planetary exploration of the Solar System (Venus and Mars in particular) from the spacecraft including statement of scientific problems, design of scientific instruments, their manufacture and installation onboard the spacecraft, processing and interpretation of the obtained scientific data. The devices invented in the laboratory were operating on the *Venera-9...-16* spacecraft, *Vega-1* and *Vega-2*, *Venus Express* (ESA) and continue their operation on the *Mars Express* mission (ESA).

Research Fields

Research Areas

- Radiative transfer in the atmospheres of Mars and Venus including the algorithms for direct and inverse problems of the radiative transfer in the optically thick atmospheres with multiple scattering and spherical geometry;



Людмила Засова
Ludmila Zasova



Планетный фурье-спектрометр для КА «Марс-Экспресс»: блок интерферометра, 1 и 2 — интерферометры длинноволнового и коротковолнового каналов соответственно

A planetary Fourier spectrometer for the Mars-Express spacecraft: interferometer units 1 and 2 are the long-wave and short-wave interferometers respectively

- решение спектроскопических задач с оптимизацией для ускорения счёта без потери полинейной точности;
- получение параметров атмосфер в результате решения прямых и обратных задач, включая температурные и аэрозольные профили, малые составляющие, динамику атмосфер, неравновесные свечения.

- spectroscopy problems using optimized calculations, allowing to reduce calculation time without losing the line-by-line accuracy;
- obtaining atmospheric parameters such as temperature and aerosol profiles, minor components, atmospheric dynamics, non-equilibrium luminosity by solving direct and inverse problems.

Экспериментальное направление

- Создание спектрометров ближнего и теплового инфракрасного диапазонов, в настоящее время — планетных фурье-спектрометров, включая миниатюрные;
- изготовление отдельных узлов для подобных приборов, производимых в кооперации с европейскими исследователями.

Experimental Areas

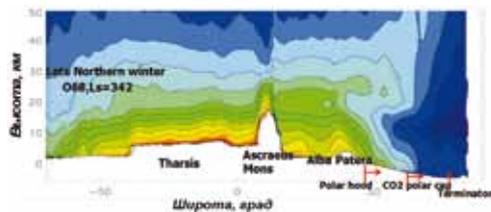
- Development of spectrometers for near and thermal infrared spectral ranges, for now those are the Fourier spectrometers including new miniaturized devices;
- manufacture of separate units and components for similar devices being developed in collaboration with the European researchers.

Приборы, проекты, результаты

Первый планетный фурье-спектрометр ПФС (1,20...40 мкм) был установлен на аппарате «Марс-96». Он начинался как российский, но из-за невозможности изготовить его в России 1990-х гг. был сделан в Италии и превратился в международный: Италия, Россия, Франция, Германия, Польша, Испания. ПФС для аппарата «Марс-Экспресс» был изготовлен в той же кооперации и с 2004 г. работает у Марса. С его помощью был открыт метан в атмосфере Марса и измерено его содержание. В зависимости от места на планете оно составляет 10–30 частиц на миллиард (ppb). По данным ПФС построены карты сезонного распределения CO и H₂O.

Instruments, Projects, Results

The first instrument of the **Planetary Fourier Spectrometer (PFS)** family was installed on the *Mars-96* spacecraft. This development has started as a Russian project but due to incapability to manufacture this device in 1990's Russia the project became an international one: Italy, Russia, France, Germany, Poland, and Spain. Italy has finally led the consortium. The PFS for *Mars Express* was manufactured with involvement of the same group and since 2004 it is been operating near Mars. This device helped discovering methane in the Martian atmosphere and measuring its concentration. Depending on place on the planet, the concentration is 10–30 parts per billion (ppb). Based on the PFS data the maps of seasonal and latitudinal CO and H₂O distribution were made.



Пример поля температуры в координатах широта-высота, восстановленного по спектрам ПФС, полученным вдоль орбиты, проходящей через полюса, Tharsis, Ascræus Mons, Alba Patera и др., вблизи весеннего равноденствия (конец зимы в северном полушарии)

An example of temperature field in the latitude-altitude coordinate system retrieved from the PFS spectra obtained along the orbit passing through the poles, Tharsis, Ascræus Mons, Alba Patera, etc. near spring equinox (the end of winter in the Northern hemisphere)

ОМЕГА (OMEGA — Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité) — картирующий спектрометр (0,35...5,1 мкм) для проекта «Марс-Экспресс» был изготовлен во Франции, его сканер — в России.

OMEGA is the mapping spectrometer with spectral range from 0.35 to 5.1 μm, manufactured in France, with the pointing system, produced in Russia.

Обнаружены и прослежены вариации инверсии в температурном профиле в полярном «воротнике» зимой (φ > 50°), которые коррелируют с присутствием ледяных облаков H₂O и связаны с нисходящей ветвью ячейки Хэдли.

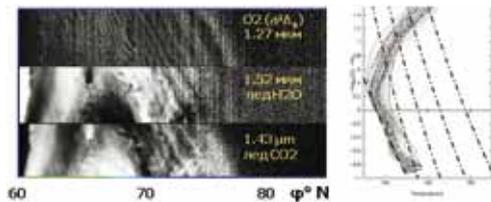
Gravity waves in the northern polar region in spring are revealed at φ > 70° N in OMEGA images in the distribution of the molecular oxygen day glow (O₂ 1.27 μm) and ices H₂O and CO₂. Temperature profiles (PFS) in these regions, obtained simultaneously, have undulatory pattern on the altitudes below 20...30 km in the atmosphere, where CO₂ can condensate. Gravity waves are linked to instability of the CO₂ condensation in the atmosphere, which is also supported by observed anticorrelation of H₂O and CO₂ ices as presented on OMEGA images at φ > 70° N. At φ > 70° N the CO₂ ice is on the surface only and no waves are observed.

Гравитационные волны в северной полярной области весной наблюдались при φ > 70° (на изображениях гиперспектрометра ОМЕГА). Температурные профили, одновременно измеренные в этой области ПФС, имеют волновой характер на высотах, ниже 20...30 км, где температура допускает конденсацию CO₂. Гравитационные волны связаны с неустойчивостью процесса конденсации CO₂, о том же говорит и наблюдаемая антикорреляция H₂O и CO₂ льдов на картах ОМЕГА при φ > 70° N.

The image of the 1.27 μm O₂ day glow distribution obtained by the OMEGA hyperspectrometer in the Northern and Southern polar region in spring reveals the propagation of gravity waves at the 20...30-km altitude where maximum of the O₂ dayglow is observed.

Изображения распределения эмиссии кислорода O₂ 1,27 мкм, полученные гиперспектрометром ОМЕГА в северном и южном полярных районах ранней весной,

In *Venus Express* (ESA) the laboratory's staff members are taking part in two experiments:



Слева — изображения ОМЕГА в полосе свечения O₂, полосах поглощения водяного и углекислого льдов в северной полярной области Марса, вблизи весеннего равноденствия. Справа — мозаика карт дневной эмиссии O₂, полученных ОМЕГА в высоких широтах южного полушария Марса, на которых также были обнаружены волны. Изображения наложены на альтиметрию высотомера MOLA (КА MGS, НАСА)

Left. An image of OMEGA within the 1.27 μm O₂ (Δ_g), day-glow band, absorption H₂O and CO₂ ices bands in Martian Northern polar region near spring equinox. Right: a mosaic of maps of the O₂ day airglow obtained by OMEGA in high latitudes of the Martian Southern hemisphere where the waves were also discovered. The images are overlaid on the MOLA altimeter (MGS mission, NASA) topography

указывают на активность гравитационных волн, которые распространяются и возмущают области наблюдаемого дневного свечения O_2 .

В проекте **ВЕНЕРА-ЭКСПРЕСС** (ЕКА) сотрудники лаборатории участвуют в интерпретации полученных данных двух экспериментов: **VIRTIS** и **VMC**.

1. Облака, сплошь покрывающие Венеру, играют огромную роль в тепловом балансе. Находясь на высоте 50...70 км и имея оптическую толщину около 30, они вносят существенный вклад в парниковый эффект. Верхний облачный слой разреженный и, следовательно, не имеет резкой верхней границы. «Условное» положение верхней границы определяется как высота уровня единичной оптической толщины, которая зависит от коэффициента экстинкции, поэтому отличается в различных спектральных интервалах.

2. Построено распределение водяного пара, определены суточные и широтные вариации CO .

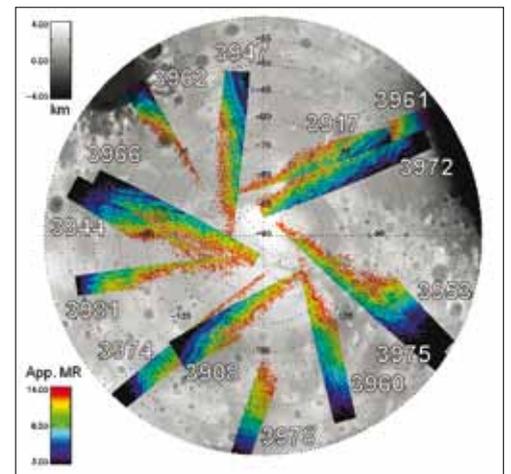
3. Глобальная карта распределения интенсивности ночного свечения O_2 в линии 1,27 мкм по данным **VIRTIS** свидетельствует о том, что циркуляция в верхней мезосфере отличается от общепринятого представления о движении потока от подсолнечной к противосолнечной точке.

VIRTIS and **VMC**. **VIRTIS** spectrometers were developed in France and Italy and **VMC** was produced in Germany. Russian researchers participate in interpretation of the data.

1. The clouds covering the entire Venus are playing a tremendous role in the thermal balance. Being at the 50...70 km altitude and having the optical depth of about 30, these clouds make a substantial contribution into the greenhouse effect. The top cloud layer has an altitude scale of about 4 km at low latitudes, which decreases down to <2 km at high latitudes, and does not have a distinctive upper boundary (so the position of the upper boundary of clouds, defined as an altitude of unit optical depth) can considerably differ in various spectral intervals depending on the extinction coefficient.

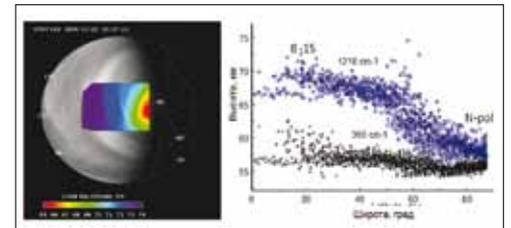
2. Water vapor distribution chart was constructed, daily and latitude CO variations were determined.

3. The global map of the O_2 1.27 μm night-glow distribution from the **VIRTIS** data gives an evidence that the circulation in the upper mesosphere differs from the general notion of the flux motion from the subsolar point to the anti-solar point (typical for Venus thermosphere).



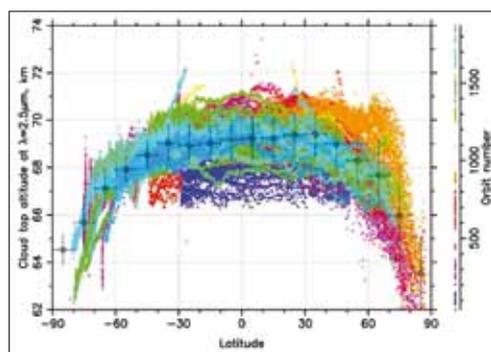
Мозаика карт дневной эмиссии O_2 , полученных ОМЕГА в высоких широтах южного полушария Марса ранней весной, на которых также были обнаружены волны. Изображения наложены на альтиметрию высотомера MOLA (КА MGS, НАСА)

Mosaic of maps of the O_2 day airglow obtained by OMEGA in high latitudes of the Martian Southern hemisphere where the waves were also discovered. The images are overlaid on the MOLA altimeter topography (MGS mission, NASA)



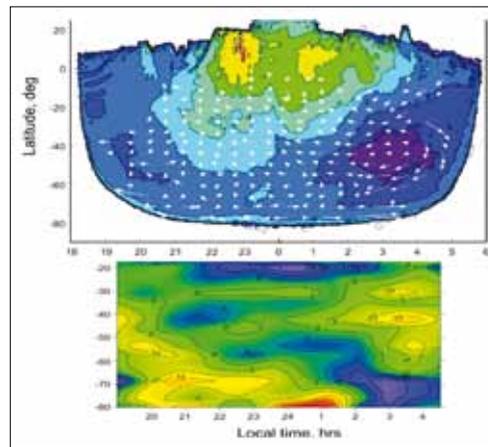
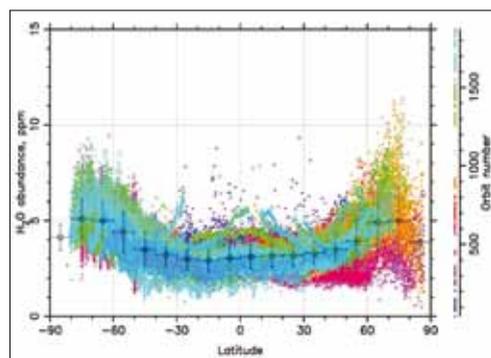
Слева: УФ-изображения, полученные при помощи камеры VMC, с наложенными картами высоты верхней границы облаков, восстановленными по полосам CO , около 1,5 мкм, VIRTIS-M. Справа: высота верхней границы облаков в тепловой области 8 мкм (1218 cm^{-1}) и 30 мкм (365 cm^{-1}) (по данным фурье-спектрометра на КА «Венера-15», северное полушарие)

Right: UV-images obtained by VMC with overlaid maps of the cloud top altitude obtained from the CO , 1.5 μm absorption bands, VIRTIS-M; left: cloud top altitude in 8 μm (1218 cm^{-1}) and 30 μm (365 cm^{-1}) in thermal IR range, retrieved from Fourier Spectrometer data on Venera-15 in the Northern hemisphere



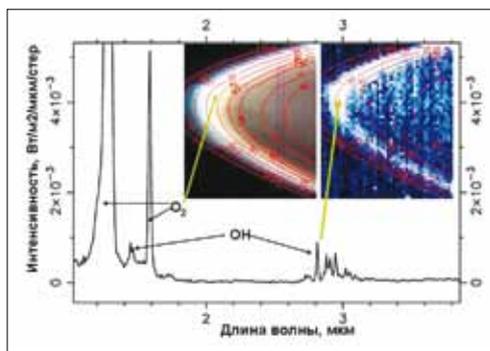
Высота верхней границы облаков на длине волны 2,5 мкм (вверху) и содержания водяного пара (внизу) как функция широты по данным эксперимента VIRTIS в 2006–2011 гг.

Altitude of the cloud upper boundary at the 2.5- μm wavelength (top) and the water vapor concentration (bottom) as a function of latitude from VIRTIS data obtained in 2006–2011



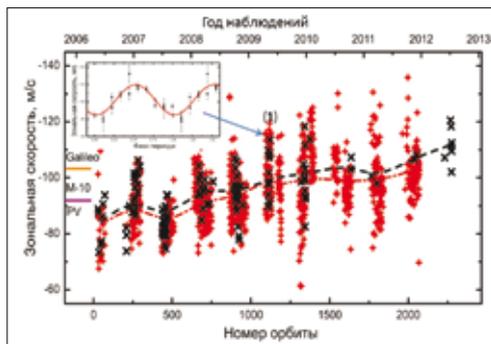
Карта глобального распределения ночной эмиссии O_2 1,27 мкм, стрелки показывают направление ветра, полученного по движению областей свечения O_2 (вверху); горизонтальная дивергенция скорости ветра в единицах 10^{-6} s^{-1} (внизу)

A global distribution map of the O_2 1.27- μm night airglow, the arrows show the wind direction (top); horizontal divergence of the wind velocity in 10^{-6} s^{-1} units (bottom)



Спектр лимба ночной стороны Венеры на высоте 90...100 км, полученный VIRTIS. В спектре наблюдаются полосы свечения O_2 ($\alpha^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-$) 1,27 и 1,58 мкм и гидроксила 1,44 и 2,7...3,1 мкм. Во вставке — изображения в полосе O_2 , 1,27 и OH 2,80 мкм. Полоса O_2 , 1,58 мкм обнаружена впервые

A night-side limb spectrum of Venus at 90...100 km altitude obtained from VIRTIS M data. In the spectrum one can see peaks of the O_2 ($\alpha^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-$) at 1,27 (0-0) and 1,58 ($\beta-1$) μm and OH at 1,44 and 2,7...3,1 μm . Inset — images within the O_2 at 1,27 and OH 2,80 μm bands. The O_2 , 1,58 μm band was detected for the first time in Venus atmosphere



Долговременные изменения усреднённой широтной компоненты скорости потока на высоте 68 ± 2 км, отражающие её рост. На врезке: короткопериодические вариации, соответствующие периоду суперротации (~4,5 сут), относятся к ряду наблюдений

Long-term variations of the mean latitudinal component of the flow velocity at 68 ± 2 km, reflecting its growth. The inset shows the short-term variations corresponding to the super-rotation period, (~4.5 days), related to the set of observations

Михаил Герасимов
Mikhail Gerasimov



Об этом же говорит распределение горизонтальных скоростей ветра: скорость ветра имеет близкие к нулю значения, а направление ветра меняет знак в области вечернего терминатора. Обнаружены гравитационные волны в верхней мезосфере Венеры, которые возмущают вертикальные профили свечения O_2 .

4. Обнаружено свечение гидроксила OH в верхней мезосфере Венеры, отождествлены полосы Мейнеля (1-0), (2-1), (3-2) 2,7...3,1 мкм и полоса (2-0) — 1,44 мкм. Открытие, важное для фотохимии атмосферы, но неожиданное из-за малого содержания водяного пара в атмосфере Венеры.

5. По данным камеры VMC обнаружен монотонный рост скорости зонального ветра в области верхней границы облачного слоя Венеры (по наблюдениям в ультрафиолетовом диапазоне). На этот тренд накладываются вариации с периодом длительностью около четырёх суток. Неясна природа наблюдаемого тренда. Скорее всего, он отражает не реальный рост средней скорости зонального ветра со временем, а является результатом комбинированного эффекта других переменных факторов.

Сейчас в лаборатории создаются фурье-спектрометры инфракрасного диапазона ТИРВИМ (часть комплекса ACS для аппарата TGO проекта «ЭкзоМарс», 2016 г.), ФАСТ (в составе научного комплекса посадочной платформы проекта «ЭкзоМарс», 2018 г.) и ЛУМИС для орбитального аппарата «Луна-26».

«Венера-Д» — проект для комплексного исследования атмосферы, поверхности и окружающей плазмы Венеры с использованием орбитеров, спускаемых модулей, долгоживущей станции на поверхности или долгоживущего атмосферного зонда. Проект в стадии научно-исследовательских работ. Сотрудники участвуют в проработке проекта: состава комплекса, научных задач миссии, научной аппаратуры и др.

Лаборатория прямых физико-химических исследований планет (532) (руководитель — канд. физ.-мат. наук Михаил Герасимов)

Специализация лаборатории — исследование химического состава планетных тел в Солнечной системе *in situ*, в том числе поиск органических соединений и веществ-предшественников живых организмов.

Лаборатория была создана в 1968 г. под названием «Лаборатория экзобиологии» для разработки методов поиска жизни на планетах и изучения того, как на Земле и планетах Солнечной системы могут синтезироваться органические соединения. Руководитель лаборатории Л. М. Мухин предложил вулканическую модель предбиологической

This fact is also confirmed by the distribution of the horizontal wind velocities measured by the motion of the O_2 night air glow areas: the region of the descending flow area is shifted from the midnight point in direction of the evening terminator. The gravity waves were discovered in the Venus upper mesosphere that disturb the vertical profiles of the O_2 night airglow.

4. Hydroxyl (OH) night air glow was the first detected in the Venus upper mesosphere. The Meinel bands (1-0), (2-1), (3-2) at 2,7...3,1 μm and (2-0) at 1,44 μm were identified. The discovery is important for the atmospheric photochemistry, but it was unexpected, because of the small abundance of the water vapor in the atmosphere of Venus.

5. By the data of the VMC multispectral camera the monotonic increase of the zonal wind velocity in the region of the cloud upper boundary of Venus (from the data of the UV channel) was recorded. This tendency is accompanied by the variations of about four-days periodicity. The reason is not clear yet. Most probably it reflects not a real increase in the wind velocity with time, but rather is a combined effect of other variable relevant factors, such as topography, local time, etc.

Today the infrared TIRVIM Fourier spectrometer (part of the ACS instruments for *ExoMars Trace Gas Orbiter* mission, 2016), FAST (as a part of the scientific load of the *ExoMars* Descent Module, 2018), and LUMIS for the *Luna-26* are being built in the laboratory.

Venera-D is the project for complex investigation of Venus atmosphere, surface and plasma environment from orbiters, descending modules including long live station on the surface, in the research stage. The staff members are participating in the project development: system composition, scientific goals of the missions, scientific equipment set and so on.

Laboratory for Direct Physical and Chemical Planetary Exploration (532). Head — Dr. Mikhail Gerasimov

The laboratory profile is the research of the sample chemical composition of planetary bodies in the Solar system *in situ*, including the search for organic compounds and precursors to life forms.

The laboratory was established in 1968 and named Laboratory of Exobiology to develop the methods of detecting life forms on planets and to study how organic compounds can be synthesized on the Earth and planets of the Solar system. L. M. Mukhin, the head of the laboratory, proposed a volcanic model of the pre-biological evolution, where volcanoes — the strongest

эволюции, в которой существенную роль в синтезе и эволюции органических соединений играли вулканы — мощнейшие химические реакторы. Эта модель была проверена экспериментально в экспедициях в районы активного вулканизма: Камчатка и Курильские острова.

Параллельно ставились эксперименты, в ходе которых моделировались наземные и подводные вулканические извержения, а также инопланетная среда — атмосфера Юпитера при грозовых разрядах.

Для этого были освоены и разработаны весьма сложные методики анализа, в том числе аминокислот и микроколичества веществ, разработан метод стерильного отбора проб, сконструирован полевой газовый хроматограф для анализа вулканических газов на месте, разработан метод моделирования ударно-испарительных процессов с использованием мощного лазера. Всё это легло в основу приборов для прямого химического анализа состава атмосферы и облаков Венеры, грунта планет на спускаемых аппаратах (серия «Венера», проект ВЕГА и др.), межпланетной пыли.

Сегодня главная методическая специализация лаборатории — термический анализ в сочетании с газовой хроматографией и масс-спектрометрией. Продолжается экспериментальное моделирование ударно-испарительных процессов, в первую очередь, для изучения синтеза органического вещества. Когда на поверхность планеты с большой скоростью падает крупное или мелкое небесное тело, грунт разогревается и происходят сложные химические процессы. Возможно, именно они имели значение для зарождения жизни.

Основные направления исследований

- Химический состав атмосфер и твёрдого вещества планет и спутников прямыми методами в космических миссиях на посадочных аппаратах и аэростатных зондах;
- динамика пыли на планетах и спутниках, в том числе разработка методов измерений её параметров и создание приборов для космических миссий;
- развитие методов измерений и создание приборов для химического анализа в космических миссиях, включая анализ органического вещества;
- экспериментальное моделирование химических преобразований в ходе высокоскоростных ударно-испарительных процессов при кратерообразовании на планетных телах;
- происхождение и эволюция органического вещества в Солнечной системе;
- тонкий химический анализ органических загрязнений в технологических целях при подготовке космических миссий.

chemical reactors — were playing a considerable role in the synthesis and evolution of organic compounds. The model was supported by experiments during the expeditions to active volcanoes: Kamchatka and Kuril Islands.

Concurrently, the experiments were performed to simulate terrestrial and underwater volcanic eruptions, as well as the alien environment — the atmosphere of Jupiter during storm discharges.

For that, highly complex experimental methods were created and developed, including analysis of amino acids and trace amounts of substances, the method of clean sampling, designation of a field gas chromatograph to analyze volcanic gases *in situ*, development of the method to simulate impact-induced evaporation using a high-power laser. All these have become the basis for the instruments of direct chemical analysis of the atmosphere and cloud composition of Venus, planetary soils on the descending modules (*Venera*-series, *Vega* project and others), and interplanetary dust.

The present primary methodical profile of the laboratory is the thermal analysis together with the gas chromatography and mass spectrometry. The experimental simulation of impact-induced evaporation continues, preferably, to investigate organic matter synthesis. When a large or a small celestial body impacts the planetary surface at a high velocity, the soils get heated and complex chemical processes take place. Probably, these were the processes that were important for the origin of life.

Research Areas

- Chemical composition of the atmospheres and solid matter of planets and satellites using the direct methods during the space missions on the descending modules and balloon probes;
- dust dynamics on the planets and satellites including the development of the measurement methods of dust parameters and design of instruments for space missions;
- development of the measurement methods and design of instruments for chemical analysis during the space missions including the analysis of the organic matter;
- experimental simulation of the chemical transformations in hypervelocity impact-induced evaporation processes induced by shockwaves during crater formation on the celestial bodies;
- origin and evolution of the organic matter in the Solar system;
- fine chemical analysis of the organic contaminations for technological purposes during preparations for space missions.



«Сигма-А» — первый отечественный хроматограф для исследования малых составляющих атмосферы Венеры («Венера-11 и -12»)

Sigma-A, the first national chromatograph to examine small components of the atmosphere of Venus (Venera 11 and 12)



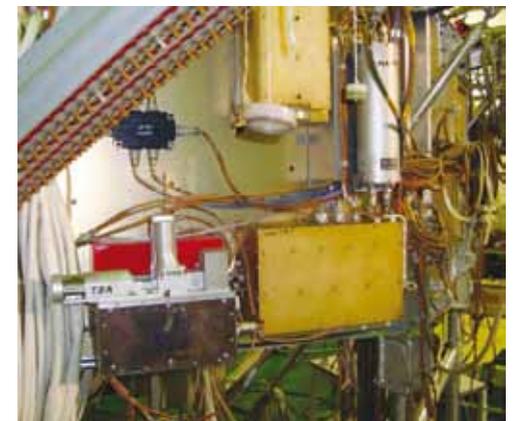
Газовый хроматограф ХМС-1Ф (1) и термический анализатор ТДА (2), составившие вместе с прибором МАЛ-1Ф (ГЕОХИ РАН) газоаналитический комплекс, и прибор ДИАМОНД/DIAMOND (3) для изучения потоков пыли на КА «Фобос-Грунт» (запуск 2011 г.)

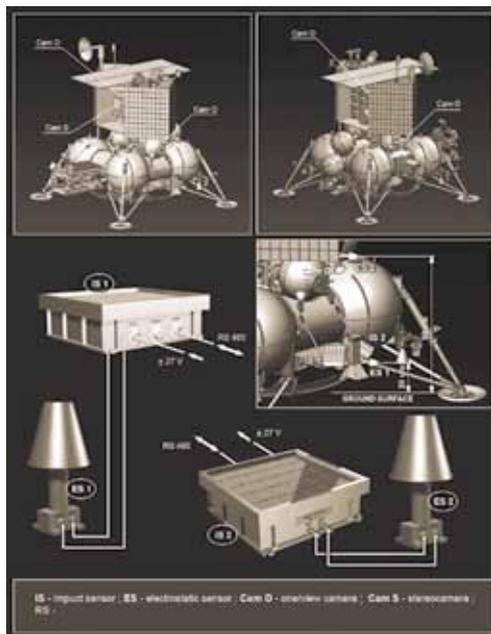
The gas chromatograph KhMS-1F (1) and the thermal analyzer TDA (2) which together with the mass-spectrometer MAL-1F (GEOKHI RAS) put together the Gas Analytic Package (GAP), and the instrument DIAMOND (3), aimed at investigation of dust flows, were built for the Phobos Sample Return mission (launched in 2011)



2

3





ПмЛ — эксперимент по прямому измерению потоков пылевых частиц в приповерхностной экзосфере Луны. Прибор способен зафиксировать перемещение пыли у лунной поверхности электроиндукционными и контактными датчиками с чувствительностью по импульсу пылевых частиц до 10...14 кг·м/с

PmL — the experiment for direct measurement of moving dust particles in the near-surface exosphere of the moon. The instrument is able to record dust motion near the lunar surface with electric induction and contact detectors of sensitivity by the dust particle momentum up to 10...14 kg·m/s

Приборы, проекты, результаты

Прибор ПмЛ (Пылевой мониторинг Луны, КА «Луна-25» и «Луна-27»)

Приборы ГХ-Л, ТА-Л и сопровождение швейцарского прибора НГМС (NGMS), входящих в газоаналитический комплекс эксперимента АЛПОЛ (КА «Луна-27»).

Прибор ГХ-М и сопровождение британского прибора НГМС, входящих в газоаналитический комплекс МГАК (проект ЭК-ЗОМАРС, посадочная платформа, 2018 г.).

Приборы ПК (пылевой комплекс) для изучения динамики пыли и механизмов возникновения пылевых бурь и тайфунов, связанных с электрическими полями в атмосфере Марса (проект «ЭкзоМарс», посадочная платформа, 2018 г.).

Instruments, Projects, Results

PmL (Monitoring of the lunar dust activity, *Luna-25* and *Luna-27*)

GKh-L, TA-L instruments and support of the Swiss NGMS included into the gas analysis instrument suite of the ALPOL experiment (Analysis of Polar Lunar Volatiles, *Luna-27*).

GKh-M, TAM instruments and support of the Swiss NGMS included into the gas analysis instrument suite of the MGAК (Martian Gas Analysis Package, *ExoMars* landing platform, ESA/Roscosmos, 2018).

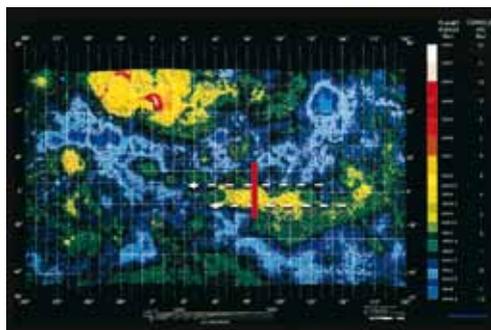
PK (Dust Kit) instruments to study dust dynamics and the mechanisms of dust storms and typhoons genesis related to the electrical fields in the atmosphere of Mars (*ExoMars* landing platform, ESA/Roscosmos, 2018).

Лаборатория малых аппаратов для исследований планет (533)

Основное научное направление — метеорологические исследования, климат планет и климатические явления. Лаборатория разрабатывает различные датчики, приборы, а также интегрированные комплексные научные системы и малые зонды для исследования планет и малых тел Солнечной системы.

Laboratory of Small Vehicles for Planetary Exploration (533)

The primary line of research is meteorological research, planetary climate, and climatic phenomena. The laboratory develops various sensors, devices as well as integrated complex scientific systems and small probes for the research of planets and small bodies in the Solar system.

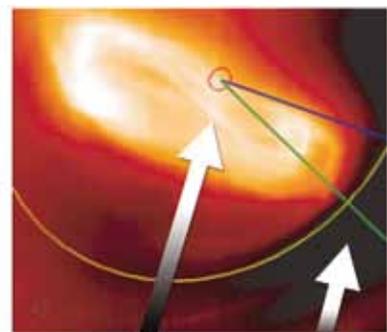
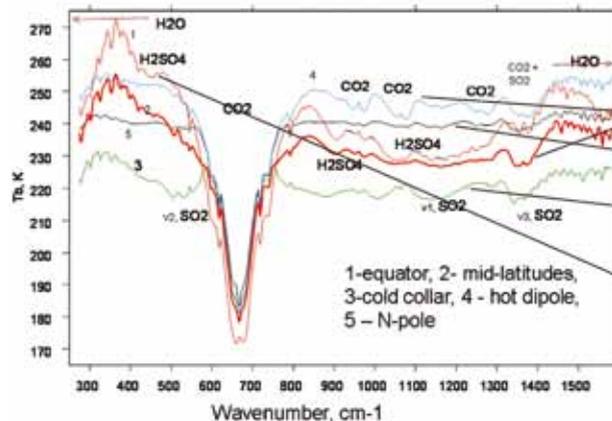


Точки входа спускаемых аппаратов проекта ВЕГА на карте Венеры

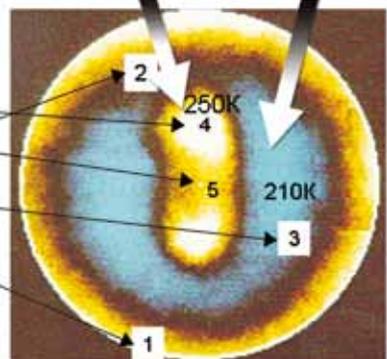
Entry points of the descending modules of the Vega project on the map of Venus

Южный полюс атмосферы Венеры. Видны полярный диполь и «холодный воротник». Изображение получено с помощью советско-немецкого эксперимента «Фурье-спектрометр» на аппаратах «Венера-15, -16»

The south pole of the atmosphere of Venus. The polar dipole and the "cold collar" can be seen. The image was obtained from the Fourier spectrometer Russian-German experiment on the Venera 15, and 16



ПОЛЯРНЫЙ ДИПОЛЬ ХОЛОДНЫЙ ВОРОТНИК



Характеристики атмосферы и их изменение во времени и в пространстве определяют климат и многие климатические явления: глобальную циркуляцию атмосферы, тепловой баланс, её взаимодействие с поверхностью планеты и космическим пространством. В 1970–1980 гг. в лаборатории создавались метеоконкомплексы для исследования Марса и Венеры. В ходе венерианских проектов впервые были напрямую измерены химический состав атмосферы, определён состав сернистых соединений и воды, получены высокоточные профили температуры и давления. Эти данные легли в основу модели венерианской атмосферы, которая остаётся актуальной и сегодня.

Параллельно будущие космические эксперименты отрабатывались на Земле, с помощью аэростатов или плавающих баллонов сверхдавления над океаном, с метеорологическими приборами. В проекте ВЕГА («Венера-Галлей») группа разработала метеоконкомплексы для спускаемого аппарата и аэростатных зондов. В ходе проекта впервые и пока единственный раз был проведён эксперимент по запуску в атмосферу другой планеты двух исследовательских аэростатов. Лаборатория отвечала за всю полезную нагрузку зондов, для которой совместно с французскими специалистами создала комплекс приборов. Аэростаты дрейфовали в атмосфере южного и северного полушария Венеры в течение 48 ч, передавая прямо на Землю информацию о термической структуре, турбулентности и динамике атмосферы Венеры на высотах 52...55 км. Экспериментально подтвердилось, что атмосфера планеты прозрачна для наблюдений в спектральном «окне» на длине волны около 1 мкм.

Для проекта ФОБОС был предложен проект долгоживущей автономной станции на поверхности спутника, которая должна была осуществить мягкую посадку на спутник и закориться. К сожалению, орбитальный аппарат вместе с автономной станцией на борту был потерян на ранней стадии работы на орбите Марса.

Для проекта МАРС-94/96 лаборатория предложила несколько экспериментов: марсоход и малые автономные станции для изучения атмосферы, грунта и внутренней структуры Марса. Марсоход создавался в сотрудничестве с ВНИИТрансмаш, однако по ходу развития проекта марсоход был исключён из него. Некоторое время работы над марсоходом продолжались на инициативной основе совместно с Планетным обществом США (Planetary Society). Все усилия лаборатория сосредоточила на создании малых автономных станций.

The atmospheric parameters and their evolution in time and space determine the climate and many climatic phenomena: global atmosphere circulation, thermal balance, the interaction of atmosphere with the planet's surface and space. In 1970-80's the laboratory was developing the meteorological instruments to explore Mars and Venus. In Venus projects the chemical composition of the atmosphere was measured directly, the composition of the sulfur compounds and water was defined; high precision temperature and pressure profiles were obtained for the first time. These data have provided the basis for the Venus atmosphere model (VIRA — Venus International Reference Atmosphere), which is relevant up to now.

Concurrently, the future space experiments were tested on the Earth using the aerostats or floating balloons over the ocean with meteorological instruments. For the *Vega* project the group has developed meteorological suites for the descending module and balloon probes. In the course of the project it was the first and, up to now, the only experiment of launching two research balloons into the atmosphere of another planet. The laboratory was responsible for all payload of the probes, for which, together with the French experts, it developed a set of instruments. The balloons have been drifting through the atmosphere of the south and north hemispheres of Venus for 48 hours transmitting information of the thermal structure, turbulence and atmosphere dynamics of Venus at altitudes of 52...55 km directly to the Earth. It was proven by the experiments that the planetary atmosphere is transparent for observations within the spectral window at the wavelength band about 1 μm .

For the *Phobos* project, the project of a long-duration autonomous station on the satellite's surface was built, the station was supposed to perform a soft landing on the satellite and anchor itself. Unfortunately, the spacecraft together with the autonomous station was lost at an early stage of operation in orbit of Mars.

For *Mars-94/96* mission the laboratory has proposed several experiments: Mars rover and small autonomous stations for the research of the atmosphere, soil and internal structure of Mars. The Mars rover was developed in collaboration with All-Russian Scientific and Research Transport Engineering Institute (VNIITransmash), but as the project was developing the rover was excluded. For a spell the work on the Mars rover was continued together with the US Planetary Society. In the following the laboratory concentrated on the development of *Mars-96* small autonomous stations.



Испытания марсохода в Калифорнии, США



Mars rover tests in California, USA



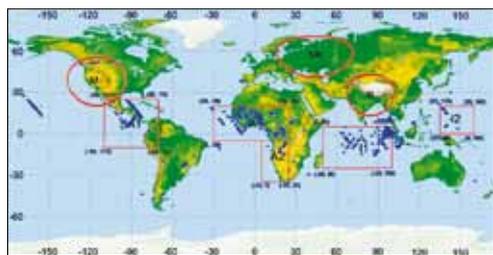
Малая автономная станция для проекта "Марс-94/96"

A small autonomous station for Mars-94/96 mission



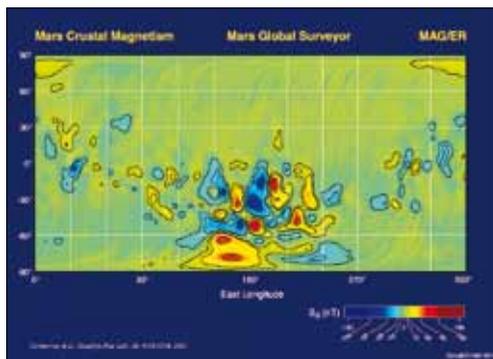
Концепция проекта «Солнечный парус»

The concept of the project Solar Sail



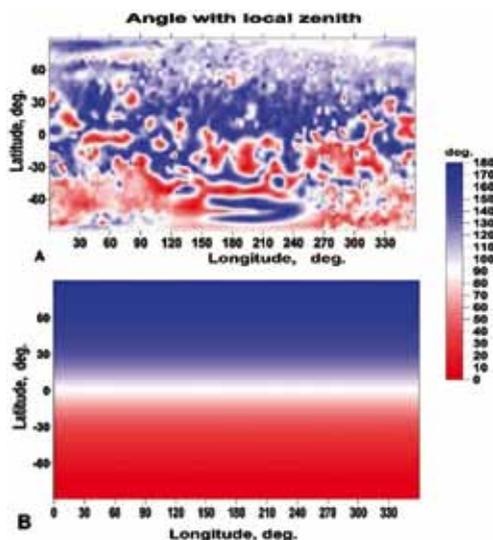
Карта составлена по данным прибора РЧА (радиочастотный анализатор) на борту академического микроспутника «Чибис-М». Точками отмечены срабатывания прибора на радиоизлучение от характерных коротких грозных разрядов в диапазоне 26...48 МГц. Выделены районы с наибольшим числом срабатываний, которые хорошо совпадают с известными регионами с высокой грозовой активностью, прежде всего, в экваториальных широтах

The map is built by the RChA (radio frequency analyzer) data onboard the Chibis-M academic micro-satellite. The points indicate the device response to radio emission from distinctive short thunderstorm discharges within 26...48 MHz range. The regions with the maximum number of responses are identified, matching the known regions of high thunderstorm activity, primarily in the equatorial latitudes



Магнитные аномалии на Марсе (оригинальный рисунок сверху) генерируют крупномасштабное эффективное дипольное магнитное поле (средний рисунок — рассчитанное распределение углов с направлением на зенит измеренного поля; внизу — модельное поле диполя)

Magnetic anomalies on Mars (original picture on top) are generating a large-scale effective dipole magnetic field (middle picture; bottom — simulated dipole field, top — estimated angular distribution towards the zenith of the measured field)



Приборы, проекты, результаты

Проект «Солнечный парус» был предложен совместно с Планетным обществом США и НПО им. С.А. Лавочкина. В 2000–2005 гг. был создан космический аппарат; на орбите высотой 1000 км он должен был раскрыть солнечный парус площадью 600 м². Под действием солнечного света на парус аппарат должен был повысить орбиту и уйти на гелиоцентрическую траекторию. Под руководством лаборатории была разработана и отработана вся аппаратура космического аппарата, включая полезную нагрузку. Это был один из первых экспериментов по использованию солнечного паруса для космических полётов, но, к сожалению, аппарат не был выведен на орбиту из-за отказа первой ступени носителя «Космос-3М».

Проект ЛЕНГОУТ — создание автоматической системы посадки подводных аппаратов, в рамках которого сотрудники лаборатории разрабатывали систему технического зрения. Цикл испытаний (включая натурные) подтвердил работоспособность прибора, который обеспечивал определение дальности и пространственное положение объекта по конфигурации объектов с точностью 1 мм.

Прибор РЧА для проекта «Чибис-М» — детектор радиоизлучения, который регистрировал с орбиты молниевые разряды в диапазоне 26...48 МГц. Прибор работал в космосе в 2012–2014 гг. и стал ведущим в комплексе всех научных инструментов спутника.

Распределение минимангнитосфер Марса, созданных разными магнитными аномалиями, по данным Mars Global Surveyor (NASA, магнитометр MAGER) и Mars Odyssey (NASA, радиоатомия): как оказалось, хотя у Марса нет собственного внутреннего магнитного поля, магнитные аномалии генерируют крупномасштабное эффективное дипольное магнитное поле. От распределения магнитных аномалий также зависит состояние атмосферы Марса: если минимангнитосфера достаточно сильная, она не даёт солнечному ветру проникнуть в нижние слои и «нагреть» их.

Сейчас лаборатория участвует в проектах: «ТВ-камера-спектрометр» для исследования минералогического состава грунта (проект «Луна-26»)

Аппаратура для эксперимента «Плазма-Э», предназначенного для исследования влияния окружающей плазмы на МКС.

Метеокомплекс для посадочного марсианского аппарата, исследование электрической активности на поверхности (проект «ЭкзоМарс», посадочный аппарат, 2018 г.).

Метеокомплексы для посадочного аппарата и аэростатного зонда (проект «Венера-Д»).

Instruments, Projects, Results

Solar Sail was proposed together with the Planetary Society and Lavochkin Association. In 2000–2005 the spacecraft was manufactured. At a 1000-km orbit it was supposed to swing open the solar sail of 600 sq. m Area. The effect of the solar light on the sail was to raise the orbit height and eventually to deliver the spacecraft to a heliocentric trajectory. The laboratory headed the design and development of the complete spacecraft hardware including the payload. This was one of the first experiments for the use of the solar sail in space flights, but unfortunately the spacecraft was never released inserted due to failure of the first stage of the *Kosmos-3M* launcher

The *Lengout* project is the development of an automated docking system for submarine vehicles within which the laboratory's staff members were developing the artificial vision system. The test campaign (including the field tests) confirmed the functionality of the device allowing to estimate the range and the relative position of the object within the accuracy of 1 mm.

RChA (radio frequency analyzer) for the *Chibis-M* project is the radio emission detector recording the 26...48 MHz lightning discharges from orbit. The instrument was operating in space from 2012 through 2014 and became the leading instrument of the science payload of the satellite.

Distribution of Martian mini-magnetospheres generated by various magnetic anomalies from the data of *Mars Global Surveyor* (NASA, MAGER magnetometer) and *Mars Odyssey* (NASA, radio occultations). As it turned out, though Mars does not have its own magnetic field, the magnetic anomalies are generating a large-scale effective dipole magnetic field. The conditions of the Martian atmosphere also depend on the distribution of magnetic anomalies: if the mini-magnetosphere is strong enough it does not allow the solar wind penetrate the lower layers and heat them up.

Today the laboratory leads the following projects:

TV-camera-spectrometer for investigation of the soil mineral composition (*Luna-26* project).

Hardware for the *Plasma-E* experiment designed for the examination of the surrounding plasma effects on the ISS.

Meteorological suite for the Martian lander, examination of the surface electrical activity (*ExoMars* lander, Roscosmos/ESA, 2018).

Meteorological suites for the lander and the balloon probe (*Venera-D* project)

Лаборатория межпланетной среды (534)
(руководитель — д-р физ.-мат. наук
Владислав Измоленов)

Все планеты Солнечной системы находятся в гелиосфере — области космического пространства, занятой веществом Солнца или солнечным ветром, который истекает из солнечной короны в среднем со скоростью 400 км/с. Процессы в солнечном ветре многообразны и сложны. Он взаимодействует с магнитосферами и атмосферами планет, создавая ударные волны; частицы солнечного ветра рассеивают фотоны; наконец, на границах гелиосферы он сталкивается с межзвёздным веществом и рождает новые ускоренные частицы.

Общая модель взаимодействия солнечного ветра и межзвёздной среды, или гелиосферного интерфейса, была теоретически разработана в 1960-х гг., в том числе с участием советских учёных. В 1970 г. опубликована статья В.Б. Баранова, К.В. Краснобаева и А.Г. Куликовского (в 1971 г. на английском языке), в которой была предложена модель, предсказывающая существование гелиопаузы на расстоянии приблизительно 150 а.е. Сейчас эта модель проходит «экспериментальную» проверку с помощью прямых измерений на космических аппаратах Voyager (NASA) и дистанционных наблюдений. Сотрудники лаборатории создают численные и качественные модели тех процессов, что происходят в гелиосфере и на Солнце, и анализируют экспериментальные данные космических аппаратов. В их числе Voyager 1 и 2 (NASA), достигшие дальних рубежей Солнечной системы, а также IBEX (NASA), SOHO (NASA), Ulysses (NASA/EKA), Cassini (NASA). Новый взгляд на ту же проблему дают астрофизические наблюдения за другими звёздами, которые так же, как и наше Солнце, взаимодействуют с межзвёздной средой. Особенности этих процессов хорошо видны «со стороны» — на изображениях в разных диапазонах света, полученных орбитальными обсерваториями.

Основные объекты исследования

- Глобальная структура гелиосферы и взаимодействие солнечного ветра с межзвёздной средой;
- межпланетная среда;
- рассеянное солнечное Лайман-альфа-излучение;
- данные с космических аппаратов Voyager, IBEX, SOHO, Ulysses, Cassini и др.;
- холодные межзвёздные облака, окружённые горячей плазмой;
- астросферы;
- корональные магнитные петли в солнечной атмосфере;

Laboratory of Interplanetary Environment (534).
Head — Dr. Vladislav Izmodenov

All planets in the Solar system are in the heliosphere — the region of the space occupied with the extra-solar matter or the solar wind, which blows out from the solar corona at the average velocity of 400 km/s. The processes in the solar wind are diverse and complex. It interacts with the magnetospheres and atmospheres of the planets, creating shock waves, the photons are scattered by the solar wind particles; and, finally, it comes into contact with the interstellar matter at the boundary of the heliosphere and generates new accelerated particles.

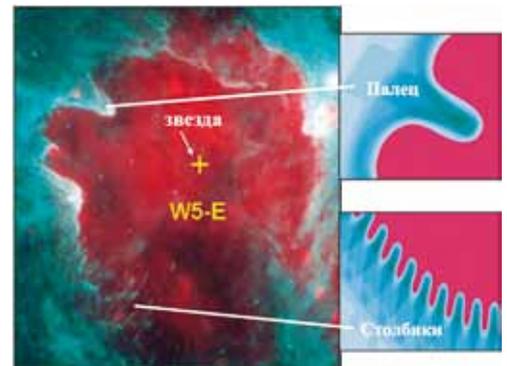
A general model of the solar wind interaction with the interstellar medium, or the heliospheric interface, was developed in the 1960's with involvement of the Soviet scientists. In 1970 the article by V.B. Baranov, K.V. Krasnobae, and A.G. Kulikovskiy was published (in 1971 in the English language) which proposed the model predicting the existence of the heliopause at the distance of about 150 AU. Today this model is undergoing experimental validation by means of direct measurements onboard the *Voyager* spacecraft (NASA) and remote observations. The laboratory's staff members are developing numerical and qualitative models of the processes taking place in the heliosphere and on the Sun and are analyzing the experimental data from the spacecraft. Those include *Voyager 1* and *2* (NASA), that crossed the boundary of the solar system, as well as IBEX (NASA), SOHO (NASA), *Ulysses* (NASA/ESA), *Cassini* (NASA). Astrophysical observations of other stars which, as our sun, interact with the interstellar medium give us new insights in the same problem. The special aspects of these processes are well seen on the outside — on the images in various ray wavelengths obtained by the orbital observatories.

Research Objects

- Global structure of the heliosphere and the solar wind interaction with the interstellar medium;
- interplanetary medium;
- scattered solar Lyman-alpha radiation;
- the data from *Voyager*, IBEX, SOHO, *Ulysses*, *Cassini* and others;
- cold interstellar clouds surrounded with hot plasma;
- astrospheres;
- coronal magnetic loops in the solar atmosphere;



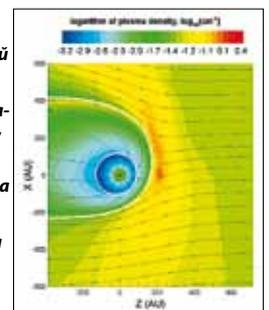
Владислав Измоленов
Vladislav Izmodenov



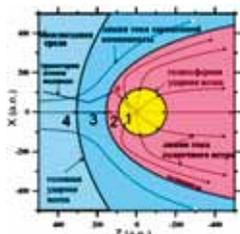
Создана модель возникновения «палецобразных» газовых конденсаций в околозвёздных оболочках и теоретически объяснён «множественный эффект шампанского» при разрушении границы области HII — области ионизованного водорода, которая одновременно является районом активного звёздообразования. Холодное вещество («палец», «столбики») содержит молодые звёздные объекты и проникает внутрь «пузыря», заполненного нагретым звездой газом: а — данные наблюдений W5-E (Deharveng L. et al. Interstellar matter and star formation in W5-E // A&A. 2012. V. 546. No. A74; b — численное моделирование

The model of the origin of finger-type gas condensations in the circumstellar envelopes was developed and a multiple champagne effect when the HII region boundary breaks up — the ionized hydrogen region which is the region of active star formation at the same time — was derived. The cold matter ("fingers", "pillars") contain young stellar objects and penetrate the bubble filled with gas heated by a star. (a) Data from W5-E observations (Deharveng L. et al. Interstellar matter and star formation in W5-E. A Herschel view // A&A. 2012. V. 546. id. A74. 41 p.); (b) Numerical modeling

Результаты расчётов гелиосферного ударного слоя в рамках трёхмерной кинетико-МГД-модели. Цветом показана плотность плазмы, стрелочками — линии тока плазмы, белыми линиями — поверхности разрывов (гелиосферная ударная волна и гелиопауза). За счёт внешнего магнитного поля пропадает головная ударная волна в звёздной среде, а структура гелиосферы становится асимметричной



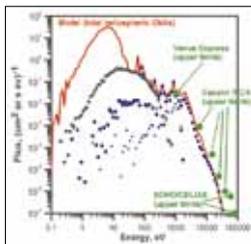
The results of the heliospheric shock layer calculations in the 3D kinetic MHD model. The color illustrates the plasma density, arrows illustrate the plasma flow lines, white lines illustrate the shock surfaces (heliospheric shock wave and heliopause). Through the external magnetic field the bow shock wave in the interstellar medium is lost and the heliospheric structure becomes asymmetrical



На расстоянии примерно 122 а. е. (или в 122 раза дальше, чем расстояние от Земли до Солнца) солнечный ветер сталкивается с веществом межзвёздной среды

At the distance of ca. 122 AU (or 122 times farther than the distance from the Earth to the Sun) the solar wind is coming into contact with the interstellar medium (ISM) matter

Потоки захваченных протонов на 1 а. е. в зависимости от энергии, полученные в рамках модели с учётом неравномерного характера плазмы межзвёздной среды. Красная кривая показывает суммарные потоки, чёрные точки — потоки из области внутреннего ударного слоя, синие треугольники — потоки из внешнего ударного слоя. На больших энергиях видно отличное совпадение результатов модели и экспериментальных данных с различных аппаратов (зелёные точки)



The fluxes of the trapped protons at 1 AU depending on the energy derived within the model taking into account the non-equilibrium plasma nature in the interstellar media. The red curve illustrates the total fluxes, the black dots illustrate the fluxes from the regions of the internal shockwave layer, the blue triangles illustrate the fluxes from the outer shockwave layer. At high energies perfect correspondence of the model results with the experimental data from various spacecraft (green dots) can be seen

Александр Тавров
Alexandr Tavrov



- формирование областей НII и развитие неустойчивости ионизационно-ударных фронтов;
- эволюция самогравитирующих уплотнений;
- распространение нелинейных волн в газопылевых излучающих средах.

Предложена и совершенствуется современная численная модель взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой. Теоретические выводы сопоставляются с данными космических аппаратов Voyager 1, 2; Космический телескоп им. Хаббла; SOHO, Ulysses, Pioneer, IBEX (NASA).

Лаборатория планетной астрономии (535)

(руководитель — д-р технич. наук Александр Тавров)

Исторически работы лаборатории были связаны с изучением других планет методами радиометрии и фотометрии с помощью наземных и космических средств. Первый руководитель лаборатории — д-р физ.-мат. наук Леонид Васильевич Ксанфомалити. Приборы, созданные здесь, стояли на автоматических межпланетных станциях (АМС) «Марс-2...-5», «Венера-9...-14», «Вега-1, -2», «Фобос-1, -2», «Марс-96».

Наблюдения в оптическом диапазоне (а также инфракрасных и ультрафиолетовых областях спектра) — один из старейших методов планетной науки, который и сегодня даёт новые результаты. Новые же задачи для исследователей лежат уже за пределами Солнечной системы. Лаборатория, одна из первых в России, занялась исследованиями экзопланет с помощью наземных телескопов и работает над инструментами, которые будут исследовать эти объекты из космоса.

Основные направления

- Звёздная коронография для получения непосредственных изображений экзопланет;
- исследование фазовых кривых экзопланет с помощью звёздных коронографов;
- спектральные исследования излучения экзопланет;
- фотометрические исследования известных транзитных объектов;
- разработка космических обсерваторий малого и среднего классов для наблюдения планет Солнечной системы и экзопланет;
- исследование характеристик систем прецизионной адаптивной оптики в космических телескопах;
- экспериментальные (наблюдательные) и теоретические исследования экзопланет;

- formation of HII regions and development of shock and ionization front instabilities;
- evolution of the self-gravitational condensations;
- non-linear waves propagation in the gas and dust emission media.

A modern numerical model of the solar wind interaction with the interstellar medium was proposed and developed. The theoretical conclusions are compared with the data from Voyager 1 and 2; Hubble Space Telescope; SOHO, Ulysses, Pioneer, IBEX (NASA).

Laboratory of Planetary Astronomy (535).

Head — Dr. Alexandr Tavrov

Historically the laboratory activity was related to exploration of other planets using the methods of radiometry and photometry by means of ground and space instruments. The laboratory head was Dr. Leonid V. Ksanfomality. The instruments constructed in this laboratory were installed onboard Mars-2 to Mars-5, Venera-9 to Venera-14, Vega-1 and 2, Phobos-1 and 2, Mars-94/96.

Observations in the optical range (as well as in the infrared and the ultraviolet spectral bands) are one of the oldest methods of the planetary science which still bring new results. But new problems for the researchers are lying outside of the Solar system. The laboratory, one of the first in Russia, started investigating exoplanets using ground telescopes and is working at the instruments to be used for research of these objects from space.

Research Areas

- Stellar coronagraphy to obtain direct images of the exoplanets;
- investigation of the phase curves of exoplanets using the stellar coronagraphs;
- spectroscopic research of exoplanet emissions;
- photometric research of the known transient objects;
- development of small- and middle-class space observatories to observe the planets in the solar system and exoplanets;
- investigation of features of the precision adaptive optic systems in the space telescopes;
- experimental (observational) and theoretical investigations of the exoplanets;

- обработка и каталогизация архивных материалов телевизионных исследований поверхности Венеры, выполненных в миссиях «Венера-9, -10» (1975) и «Венера-13, -14» (1982);
- исследования характеристик рассеяния электромагнитного излучения на частицах (пыль, реголит, аэрозоль и т. п.) в атмосфере и на поверхности небесных тел, в частности, Венеры и Марса.

Приборы, проекты, результаты

Разработаны схемы звёздных интерференционных коронографов CP-AIC и CP-ARC, которые предназначены для искусственного «затмения» диска звезды, что позволяет «разглядеть» находящуюся рядом планету. Изготовлены лабораторные макеты, которые продемонстрировали работоспособность и хорошие рабочие характеристики.

Исследуется возможность применения адаптивной оптики в космических экспериментах по наблюдению экзопланет и их фазовых кривых с помощью звёздного коронографа.

Разрабатываются космические обсерватории малого и среднего классов для наблюдения планет Солнечной системы и экзопланет. Предложены космические эксперименты «Планетный мониторинг» (в стадии опытно-конструкторских работ) — 60-сантиметровый телескоп для установки на Международной космической станции и на микроспутнике (2018+) и «Звёздный патруль» (научно-исследовательские работы) — ~1,5-метровый телескоп на космическом аппарате. Запуск последнего возможен после 2022 г.



Рельеф Меркурия в секторе 210–290° W (слева), не охваченный съёмкой с аппарата Mariner-10 (NASA). Восстановлен по данным синтезированного изображения (справа), полученного методом коротких экспозиций на наземных телескопах (Ksanfomality L. V. The surface of Mercury in the 210–350° W longitude range // Icarus. 2008)

The terrain of Mercury in the 210–290° W range (left), not covered by the photography from Mariner-10 (NASA). Reconstructed by the data of the synthetic imaging (right) obtained using the method of short exposures on the ground telescopes (Ksanfomality L. V. The surface of Mercury in the 210–350° W longitude range // Icarus. 2008)

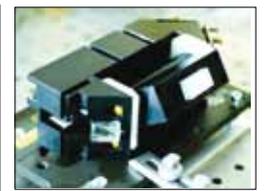
- processing and indexing of archived materials of TV-explorations of the surface of Venus performed during the *Venera-9, 10* (1975) and *Venera-13, 14* (1982) missions;
- investigation of the characteristics of electromagnetic emission scattering using the particles (dust, regolith, aerosol) in the atmosphere and on the surface of planetary bodies, particularly Mars and Venus.

Instruments, Projects, Results

The layouts of CP-AIC and CP-ARC interstellar interference coronagraphs designed for artificial occultation of the star disc which enables to see the nearby planet were developed. The laboratory models which demonstrated the functionality and proper performance were constructed.

The possibility of using the adaptive optics in space experiments in exoplanet observation and their phase curves by means of the stellar coronagraph is being investigated.

Small- and middle-class space observatories are being developed for observation of the planets of the solar system and exoplanets. The following space experiments were proposed: *Planetary Monitoring* (in the design and experimental stage) is a 60-cm telescope to be installed onboard the International Space Station and onboard the micro-satellite (2018+) and *Star Patrol* (scientific and research activities) is a ~1.5-m telescope aboard a spacecraft. The latter is scheduled for launch after 2022.



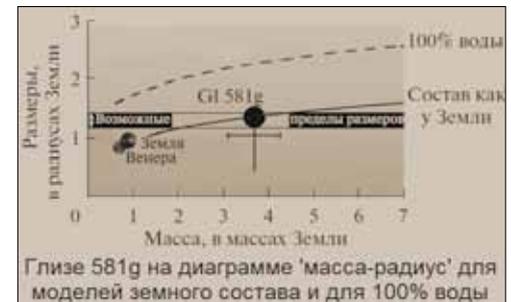
Коронографы CP-AIC и CP-ARC
CP-AIC and CP-ARC



Модель изображения, получаемого коронографом: светлый (слева) и тёмный (справа) выходы
An image model obtained from a coronagraph: light (left) and dark (right) yields

Эксперимент по гашению коронографом лазерного луча

An experiment for beam blanking by a coronagraph



Экзопланета Глизе 581g на диаграмме «масса-радиус» для моделей земного состава и для 100 % воды (Ксанфомалити Л. В. Планетаны — океанические планеты // Астрономический вестник. 2014. № 1. С. 81–91)

Gliese 581g exoplanet on the mass-radius diagram for models of the earth composition and for 100 % water (Ksanfomality L. V. Planetans — the Ocean Planets // *Astronomicheskii Vestnik*. 2014. No. 1. P. 81–91)



Изображение глории на верхнем облачном слое Венеры на одном из УФ-снимков камеры VMC/Venus Express (слева), и фазовые функции яркости в 3 длинах волн, полученные из серии изображений (справа)

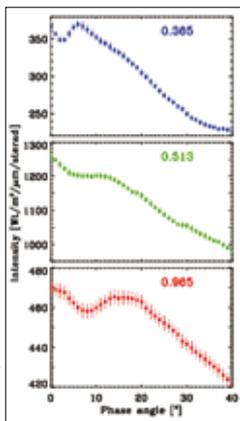
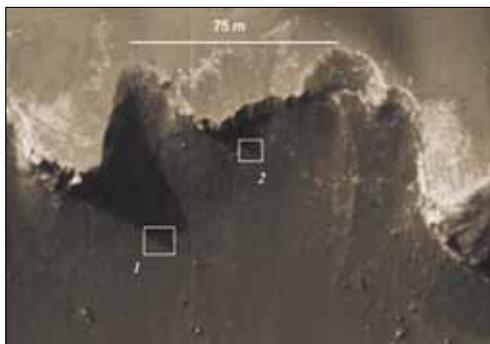


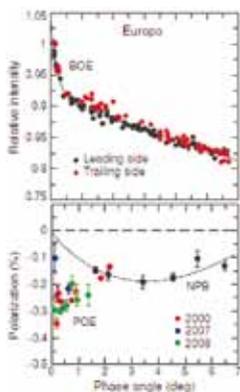
Image of the glory on the upper cloud layer of Venus on one of the UV-images made by the VMC/Venus Express camera; and brightness phase functions in 3 wavelengths obtained from the series of images



Один из снимков северного вала кратера Виктория, полученных камерой HiRISE орбитального аппарата MRO, с отмеченными для анализа районами (Petrova E. V. et al. Optical depth of the Martian atmosphere and surface albedo from high-resolution orbiter images // Planetary and Space Science. 2012. V. 60. P. 287–296)

One of the images of the northern edge of Victoria crater from the HiRISE camera of the MRO orbiter, the regions of investigation are marked (Petrova E. V. et al. Optical depth of the Martian atmosphere and surface albedo from high-resolution orbiter images // Planetary and Space Science. 2012. V. 60. P. 287–296)

Проявление когерентного обратного рассеяния (КОР) в оппозиционном пике яркости и отрицательной ветви поляризации с узким минимумом у спутника Юпитера Европа (Tishkovets V. P., Petrova E. V. Coherent backscattering by discrete random media composed of clusters of spherical particles // JQRST. 2013. V. 127. P. 192–206)



Appearance of the coherent backscattering (COB) in the opposition peak brightness and a negative leg of polarization with the narrow minimum value at Europa, the Jupiter's moon (Tishkovets V. P., Petrova E. V. Coherent backscattering by discrete random media composed of clusters of spherical particles // JQRST. 2013. V. 127. P. 192–206)

Анна Фёдорова
Anna Fedorova



Предложена гипотеза о том, как определять планетаны — экзопланеты с глобальным океаном водной природы. Свойствами планетана может обладать Gl 581g (если её сферическое альbedo достигает 0,86), а вот Kepler-22 и GJ 1214b не могут быть планетанами.

С помощью многоспектральной камеры VMC на аппарате «Венера-Экспресс» (ЕКА) оценены размеры и показатель преломления частиц в верхнем слое облаков Венеры, а также их вариации во времени и пространстве. В ряде случаев показатель преломления частиц оказался выше, чем у частиц серной кислоты, которая составляет основную часть облаков. Возможно, это указывает на то, что не отождествлённое до сих пор вещество, поглощающее УФ-излучение в верхнем облачном слое, может находиться в каплях облаков.

Разработан метод теней (shadow method), который позволил оценить оптическую толщину атмосферы Марса и альbedo поверхности в ряде районов с помощью снимков высокого разрешения; сравнение с результатами практически одновременных измерений оптической толщины, выполненными в этом районе марсоходом Opportunity (NASA), показало хорошее согласие. Исследованы возможности и ограничения метода.

Для наблюдений других тел Солнечной системы важно представлять, какое влияние на наблюдения оказывают мелкие частицы на поверхности и в газовых оболочках. Разработанный в лаборатории приближённый метод учёта КОР позволяет вычислять характеристики света, отражённого от дискретной среды, состоящей из хаотически расположенных частиц в зависимости от плотности их упаковки. Метод был опробован на нескольких типах кластеров и было получено хорошее согласие ряда моделей с фазовой кривой поляризации, измеренной в лаборатории.

Лаборатория экспериментальной спектроскопии (536) (руководитель — канд. физ.-мат. наук Анна Фёдорова)

Специализация лаборатории, которая до 2005 г. носила название «Лаборатория оптической спектроскопии верхних атмосфер», — оптическая спектроскопия атмосфер планет от ультрафиолетового до среднего инфракрасного диапазона. Основателем и первым заведующим лабораторией с 1988 по 1991 г. был д-р физ.-мат. наук Владимир Анатольевич Краснопольский. В последующие годы ей руководили д-р физ.-мат. наук Олег Игоревич Кораблёв (1992–2005) и канд. физ.-мат. наук Иммант Иммантович Виноградов (2005–2014).

The hypothesis how to define planetans — exoplanets with the global ocean of aquatic nature was proposed. Gl 581g might have the planetan properties (in case its Bond albedo reaches 0.86) and Kepler-22 and GJ 1214b cannot be planetans.

By means of the multispectral VMC camera aboard Venus Express (ESA) the size and the coefficient of particles refraction in the upper cloud layer of Venus as well as their variation in time and space were estimated. In some cases, the coefficient of particle refraction was higher than that of the sulphuric acid particles which constitute the major portion of the clouds. Probably, this is an indication that some up-to-now unidentified substance absorbing the UV radiation in the upper cloud layer is contained in the cloud drops.

The shadow method was developed which enabled to assess the optical depth of the Martian atmosphere and albedo in some regions using the high-resolution images; the comparison with the results of virtually concurrent measurements of the optical depth made in these regions by the Opportunity rover (NASA) showed a good matching. Method's opportunities and restrictions were examined.

To observe other bodies of the solar system it is important to have an idea of the influence small particles on the surfaces and in the gas envelopes have on the observations. The laboratory developed an approximate method of coherent backscattering (CBS) calculation which enables to calculate the characteristics of the light reflected by the discrete media containing randomly oriented clusters of particles depending on their packing density. This method was tested on several types of clusters and a series of models agree with the polarization phase curve measured in the laboratory.

Laboratory of Experimental Spectroscopy (536). Head — Dr. Anna Fedorova

The laboratory's profile, which until 2005 was called Laboratory of Upper Atmosphere Optical Spectrometry, is the optical spectroscopy from the ultraviolet to middle infrared range where the absorption and emission bands of the main components of the planetary atmospheres are located. Dr. Vladimir Krasnopolsky was the founder and the first head of the laboratory from 1988 through 1991. In subsequent years the laboratory was headed by Dr. Oleg Korablev (1992–2005) and Dr. Imant Vinogradov (2005–2014).

Изначально лаборатория занималась фотохимией и спектроскопией верхних атмосфер, и первым её экспериментом был совместный российский-французский комплекс спектрометров «Огюст» на КА «Фобос-2» (1986). В этом эксперименте впервые у другой планеты был реализован метод солнечного просвечивания атмосферы. Несмотря на то, что миссия проработала всего пару месяцев, были получены уникальные данные по вертикальным распределениям озона, водяного пара и аэрозоля в атмосфере Марса. Успех этого эксперимента дал импульс дальнейшему развитию метода и созданию спектрометра СПИКАМ для следующей экспедиции к Марсу — «Марс-96».

После трагической гибели «Марса-96» ключевым направлением лаборатории стала разработка нового типа спектрометров на основе акустооптической фильтрации света. Первые АОПФ-спектрометры для других планет вошли в состав спектрометра SPICAM на АМС ЕКА «Марс-Экспресс» (запуск 2003 г.) и комплекса SPICAV/SOIR на АМС ЕКА «Венера-Экспресс» (2006–2014). Благодаря гибкой работе спектрометров с орбиты планеты было получено много уникальной информации о многолетних вариациях газовых и аэрозольных составляющих атмосфер Марса и Венеры от поверхности до верхней мезосферы. Эти результаты уже стали основой для физических исследований и численного моделирования циркуляции и фотохимии атмосфер наших ближайших соседей. АОПФ-спектрометр на КА «Марс-Экспресс» работает до сих пор, он — один из немногих долгожителей на борту аппарата.

Приборы, проверенные в космосе, можно использовать для дистанционного зондирования Земли, например, для изучения малых составляющих земной атмосферы, к которым относятся и такие важнейшие парниковые газы как метан и углекислый газ. Чтобы понять, какое влияние они оказывают на изменения климата, нужна точная информация об источниках и стоках этих газов в атмосфере. Их глобальные и непрерывные измерения возможны только с орбиты. Первый эксперимент, под названием РУСАЛКА, по изучению парниковых газов с борта Международной космической станции проводился в 2009–2013 гг.

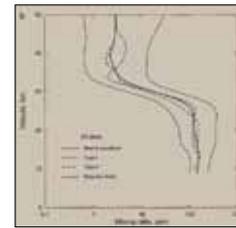
Развивается теоретическое направление моделирования глобальной циркуляции атмосфер планет. В конце 2000-х гг. в лаборатории появилось ещё одно экспериментальное направление — лазерная спектроскопия, и под руководством И. И. Виноградова начали создаваться приборы на основе диодных лазеров с перестраиваемой частотой (TDLAS). Участвовала лаборатория и в создании приборов для КА «Фобос-Грунт» (2011): спектрометр высокого разрешения ТИММ, микроскоп МикроОМЕГА и диодно-лазерный спектрометр TDLAS.

In the beginning the laboratory was dealing with upper atmosphere photochemistry and spectroscopy. One of early experiments was the joint Russian-French spectrometer *Auguste* onboard *Phobos 2* spacecraft (1986). In the course of the experiment it was for the first time when a method of solar occultation sounding of the atmosphere was applied near another planet. Despite the fact that mission lasted for a couple of months only, unique data of vertical distribution of ozone, water vapor, and aerosol in the Martian atmosphere were obtained. The success of this experiment provided a new impetus to the further method development and construction of the SPICAM spectrometer for the following Martian mission (*Mars-96*).

After the tragic loss of *Mars-96* the development of a new type of spectrometers based on the acousto-optic light filtration became the key profile of the laboratory. The first AOTF-spectrometers for other planets were included into the set of the SPICAM spectrometer onboard *ESA's Mars Express* (launched in 2003) and SPICAV/SOIR acousto-optic light filtration suite onboard *ESA's Venus Express* (2006–2014). Due to flexible operation of the spectrometers a lot of unique data about the years-long variations of gas and aerosol components in the Martian and Venusian atmospheres from the surface up to the upper mesosphere were obtained from the planetary orbit. These results have already become the background for physical research and numerical simulation of atmospheric circulation and photochemistry of our closest neighbors. The AOTF-spectrometer onboard *Mars Express* is still operating, it is one of a few survivors onboard the orbiter.

Instruments built for deep space can be used for the Earth remote sensing, for instance, for examination of small components of the Earth's atmosphere which include such most important greenhouse gases as methane and carbon dioxide. To understand how these gases influence the climate, precise information is required about where and how much of those get into the atmosphere and where they leave it. The global and continuous measurements of these parameters are possible from orbit only. The first experiment named *Rusalka* (Manual spectral analyzer of the atmosphere constituents) to study the greenhouse gases from onboard the International Space Station was held in 2009–2013.

The theoretical line of simulation of the global atmospheric circulation of the planets is now being in development. In the end of the 2000's the laboratory started one more series of experiments, the laser spectroscopy, and headed by I. I. Vinogradov started development of instruments based on the tunable diode lasers (TDLAS). The laboratory was also partaking in construction of the instruments for *Phobos Sample Return* mission (2011): the high-resolution spectrometer (TIMM), MicroOMEGA microscope, and TDLAS diode-laser spectrometer.

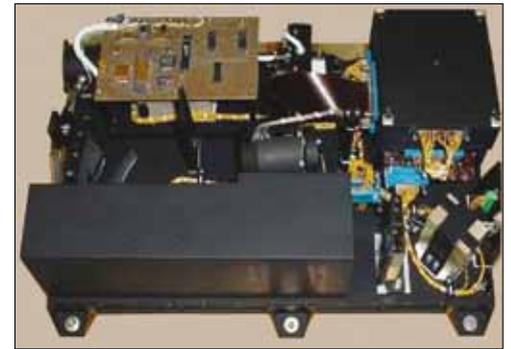


Вертикальные профили H_2O , озона и атмосферной пыли по данным эксперимента с солнечным просвечиванием на аппарате «Фобос-2» (Краснопольский, Кораблев, Крысько, Родин и др.)



АМС «Фобос-2»
AIS Fobos 2

H_2O , ozone and atmospheric dust vertical profiles by the data of the solar occultation sounding experiment from *Phobos 2* (Krasnopol'skiy, Krysko, Rodin et al.)



Прибор СПИКАМ для «Марс-96»
SPICAM for Mars-96

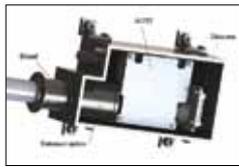


Эшелле-спектрометр ближнего инфракрасного диапазона (АЦС-НИР), эшелле-спектрометр среднего инфракрасного диапазона (АЦС-МИР) спектрометрического комплекса для исследования атмосферы Марса АЦС для орбитального аппарата Trace Gas Orbiter проекта ЭКЗОМАРС (ESA/Роскосмос, запуск 2016 г.)

The Echelle spectrometer of the near infrared band (ACS-NIR), the Echelle spectrometer of the middle infrared band (ACS-MIR) for the ACS suite (Atmospheric Chemistry Suite) for ExoMars Trace Gas Orbiter (Roscosmos/ESA, 2016)

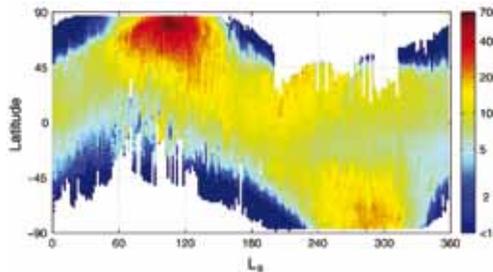
Инфракрасные спектрометры ISEM (ISEM, Infrared Spectrometer for ExoMars) для марсохода Pasteur проекта ЭКЗОМАРС (запуск 2018 г.) и ЛИС для проекта ЛУНА-ГЛОБ

Infrared spectrometers ISEM (Infrared Spectrometer for ExoMars) for the ExoMars rover Pasteur payload (Roscosmos/ESA, 2018) and LIS (Lunar Infrared Spectrometer) for Luna-Glob



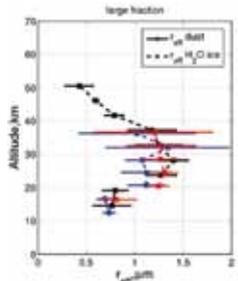
Спектрометр «Озонometr-TM»

Ozonometr-TM spectrometer



Широтное распределение влаги в атмосфере Марса в течение года по данным прибора СПИКАМ («Марс-Экспресс», ЕКА)

Latitudinal distribution of moisture in the Martian atmosphere over one year period from the SPICAM data (Mars Express, ESA)

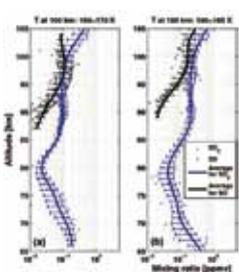


Бимодальное распределение аэрозоля на Марсе. Данные прибора СПИКАМ («Марс-Экспресс», ЕКА)

Bimodal distribution of aerosol on Mars. Data from the SPICAM camera (Mars Express, ESA)

Вертикальное распределение SO₂ и SO в мезосфере Венеры. Данные спектрометров СПИКАВ УФ и СУАР («Венера-Экспресс», ЕКА)

Vertical distribution of SO₂ and SO in the mesosphere of Venus. Data from the SPICAV UV and SOLIR spectrometers (Venera-Express, ESA)



Основные направления исследований

Научное направление

- Состав и структура атмосфер планет методами оптической спектроскопии от УФ- до среднего ИК-диапазона;
- численное моделирование атмосфер Марса и Венеры;
- водяной, пылевой и озоновый циклы на Марсе;
- химия атмосферы Венеры;
- минеральный состав, гидраты и ледяные отложения на поверхности Марса.

Экспериментальное направление

- Создание спектрометров на основе акустооптической фильтрации для исследования состава грунта Луны и Марса;
- создание эшелле-спектрометров для мониторинга и исследования атмосфер Земли и планет;
- создание УФ-спектрометров для мониторинга озона в атмосфере Земли;
- диодно-лазерная спектроскопия (ДЛС) для планетных исследований.

Приборы, проекты, результаты

Создаются приборы для мониторинга парниковых газов и озона в атмосфере Земли: «Дриада» на борту Международной космической станции и приборы «Озонometr-З» и «Озонometr-TM» в составе аппаратуры проекта «Ионозонд».

Также в лаборатории создаётся марсианский многоканальный диодно-лазерный спектрометр М-ДЛС в составе научной аппаратуры посадочной платформы проекта ЭКЗОМАРС (2018). Сотрудники участвуют в разработке и создании камеры MSASI и УФ-спектрометра PHEBUS для КА BepiColombo (ЕКА).

Многолетние исследования Марса и Венеры, в том числе более 10 лет — с борта одного и того же космического аппарата, дали интереснейшие научные результаты о том, как меняются со временем параметры климата этих планет.

В ходе многолетнего мониторинга водяного цикла на Марсе в его атмосфере был обнаружен водяной пар в перенасыщенном состоянии — иначе говоря, водяного пара в северном полушарии оказалось больше, чем ожидалось при данной температуре. Это, возможно, связано с малым количеством аэрозоля. Многолетние измерения вертикальной структуры аэрозоля привели к открытию бимодального распределения аэрозоля в атмосфере Марса: «разделению» аэрозоля на две хорошо различимые фракции (с размерами частиц около микрона и десятых и сотых долей микрона). По наблюдениям был исследован цикл озона

Research Fields

Research Areas

- Composition and structure of planetary atmospheres using the methods of optical spectroscopy from the ultraviolet to middle infrared band;
- numerical simulation of the Martian and Venusian atmospheres;
- water, dust and ozone cycles on Mars;
- chemistry of the Venusian atmosphere;
- mineral composition, hydrates and ice deposits on the Martian surface.

Experimental Areas

- Construction of spectrometers based on the acousto-optic filtration for examination of the soil composition of the Moon and Mars;
- construction of echelle spectrometers for monitoring and research of the atmospheres of the Earth and planets;
- construction of UV-spectrometers to monitor ozone in the Earth's atmosphere;
- diode-laser spectroscopy (DLS) for planetary explorations.

Instruments, Projects, Results

Instruments for monitoring of the greenhouse gases and ozone in the Earth's atmosphere: *Driada* onboard the International Space Station and *Ozonometr-Z* and *Ozonometr-TM* instruments a part of *Ionozond* project payload.

Martian multichannel diode-laser spectrometer M-DLS in the set of the scientific hardware on the *ExoMars* landing platform (Roscosmos/ESA, 2018). Participating in development and construction of the MSASI camera and PHEBUS UV-spectrometer for *BepiColombo* mission (ESA).

Long-term explorations of Mars and Venus including more than 10-year exploration from the same spacecraft provided fascinating scientific results on how the climatic parameters of these planets change over time.

During a long-term monitoring of the water cycle on Mars, supersaturated water vapor was discovered in the Martian atmosphere, in other words, the northern hemisphere contained more water vapor than it was expected under those temperatures. Probably, it is attributed to a small amount of aerosol. Long-term measurements of the aerosol vertical structure resulted in the discovery of the bimodal aerosol distribution in the Martian atmosphere: separation of the aerosol into two conspicuous fractions (particle size of about one micron and tens and thousands of one micron). During the observations the cycle of the ozone and oxygen nightglow on Mars was investigated. Water ice content in the upper layer of the Martian ground was measured at the periphery of the sublimating polar cap.

и ночного свечения кислорода на Марсе. Было измерено содержание водяного льда в верхнем слое марсианского грунта на периферии сублимирующей полярной шапки.

С помощью аппарата «Венера-Экспресс» (ЕКА) несколько лет подряд измерялось содержание оксидов серы (SO_2 , SO) на базе данных спектрометров СПИКАВ/СУАР, а также водяного пара в её нижней и средней атмосфере. Создана негидростатическая модель общей циркуляции атмосферы Венеры.

Лаборатория физических исследований поверхности планет (537) (руководитель — канд. физ.-мат. наук Даниил Родионов)

Инструменты и эксперименты, которые создавались в лаборатории с момента её появления, связаны в первую очередь с изучением минерального состава небесных тел. Пылеударный масс-анализатор ПУМА на борту автоматических межпланетных станций «Вега-1» и «Вега-2» во время пролёта вблизи комета Галлея (1986) впервые в мире получил сведения об элементном и минералогическом составе кометных пылинок. В частности, в их составе была обнаружена органическая составляющая. Были определены пики элементов водорода, углерода, азота, кислорода, натрия, магния, алюминия, кремния, серы, хлора, кальция, железа, а также отдельных изотопов, проведён статистический анализ минералогического состава пылинок. Эти данные оставались уникальными на протяжении двух десятилетий, вплоть до доставки кометных пылинок на Землю космическим аппаратом Stardust («звёздная пыль») (NASA) в 2006 г.

Анализ минералогического состава поверхности Марса проводили два мёссбауэровских спектрометра MIMOS II на марсоходах Spirit и Opportunity (проект MER, NASA). Метод мёссбауэровской спектроскопии требует, чтобы изучаемый образец облучался гамма-квантами, поэтому её можно проводить только непосредственно на месте исследований.

Мёссбауэровский спектрометр MIMOS был установлен на манипуляторе космического аппарата «Фобос-Грунт» для минералогического анализа железосодержащих фаз поверхности Фобоса, но из-за аварии проект не дал научных результатов.

Приборы, проекты, результаты

Газоразрядный анемометр разработан для исследования динамики газовых потоков в экспериментальной и космической метеорологии и в частности, для проведения измерений давления, модуля и направления вектора скорости потоков газа в пограничном слое атмосферы Марса.

For several years in a row *Venus Express* (ESA) have been used to measure the sulphur oxides (SO_2 , SO) based on the SPICAV/SOIR spectrometers data and the water vapor in the lower atmosphere of Venus. A non-hydrostatic model of the general atmospheric circulation of Venus was created.

Laboratory of Planetary Surface Physical Studies (537). Head — Dr. Daniel Rodionov

Instruments and experiments created in the laboratory since its foundation are first of all related to the study of the mineral composition of the celestial bodies. PUMA (dust mass spectrometer) onboard the *Vega 1* and *Vega 2* interplanetary stations was the first in the world to obtain information of the element and mineral composition of the comet dust particles while it was passing nearby comet Halley (1986). In particular, they contained organic component. The peaks for hydrogen, carbon, nitrogen, oxygen, sodium, magnesium, aluminum, silicon, sulphur, chlorine, calcium, iron as well as certain isotopes were defined, the statistical analysis of the mineral composition of dust particles was conducted. These data remained unique for two decades until the comet dust particles were delivered to the earth with the *Stardust* spacecraft (NASA) in 2006.

The analysis of the mineral composition of the Martian surface was performed by two MIMOS II Mössbauer spectrometers onboard *Spirit* and *Opportunity* Mars rovers (*Mars Exploration Rovers*, NASA). The method of Mössbauer spectroscopy requires the examined sample to undergo gamma ray irradiation so the spectroscopy may be conducted in situ only.

MIMOS Mössbauer spectrometers were installed on the *Phobos Sample Return* manipulator for mineral analysis of the iron-containing phases of the Phobos surface, but because of the failure the project did not provide any scientific results.

Instruments, Projects, Results

A gas discharge anemometer to research the dynamics of gaseous flows in the experimental and space metrology and, in particular, to measure pressure, module, and vector direction of the gas flow velocity in the boundary layer of the Martian atmosphere.



Даниил Родионов
Daniel Rodionov



Мёссбауэровский спектрометр MIMOS на манипуляторе КА «Фобос-Грунт»

A MIMOS Mössbauer spectrometer onboard the Phobos Sample Return manipulator



Мёссбауэровский спектрометр MIMOS II

MIMOS II Mössbauer spectrometer

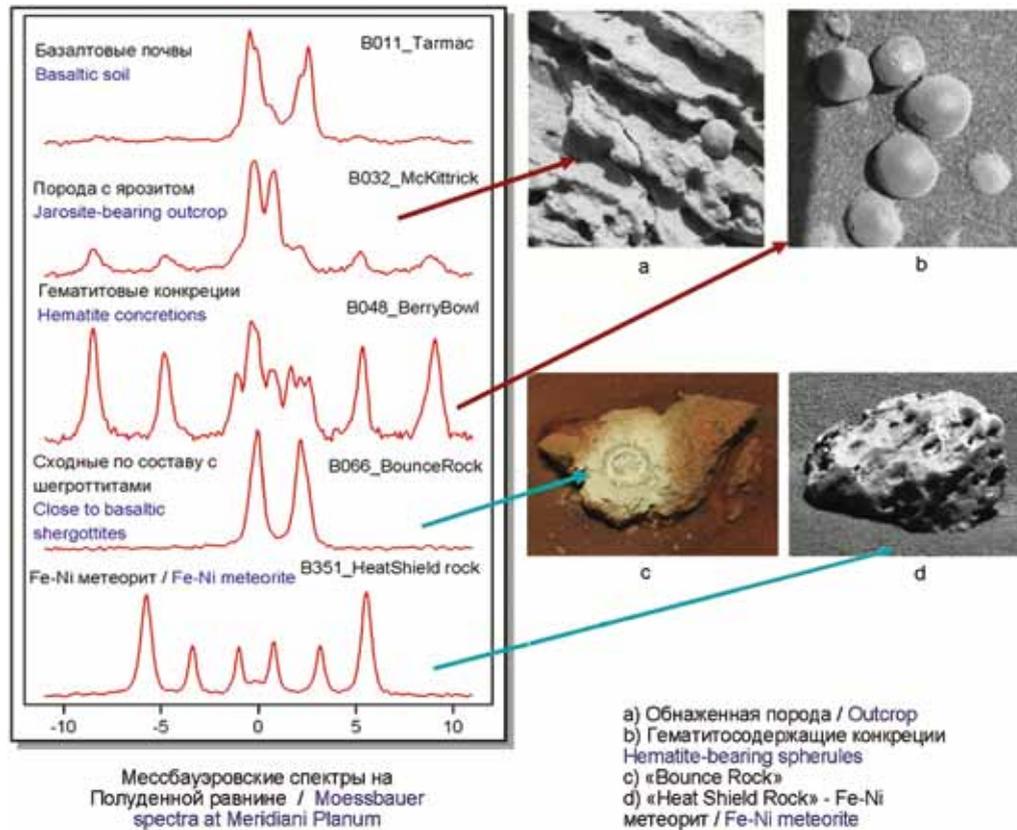


Прототип датчика ветра для проекта ЭКЗОМАРС

Prototype of the ExoMars wind speed sensor

Приборы MIMOS II (MER, NASA) впервые измерили относительные распространённости железа по отношению к его состоянию окисления, и к фазе содержания железа. Совокупность фаз, отождествлённых при помощи мёссбауэровской спектроскопии, указывает, что в местах посадки обоих марсоходов поверхность планеты менялась под воздействием воды

MIMOS II (Mars Exploration Rovers, NASA) instruments were first to measure the relative fractional iron abundance towards its oxidation state and iron content phase. The set of these phases identified using the Mössbauer spectroscopy indicates that on both of the Mars rovers landing sites the planetary surface changes were caused by water



Георгий Манагадзе
Georgy Managadze



Лаборатория активной диагностики и масс-спектрометрии (538) (руководитель — д-р физ.-мат. наук, профессор Георгий Манагадзе)

В основе лаборатории лежит идея о проведении в космическом пространстве физических, и прежде всего плазменных экспериментов, в ходе которых на среду искусственно воздействуют с борта космических аппаратов или с поверхности Земли. По тому, как среда реагирует на воздействие, можно судить о физических процессах, происходящих в космосе. Одни из первых экспериментов такого рода проводились в околоземном пространстве, а воздействие оказывали нагревные стенды на Земле или приборы на геофизических ракетах. Затем были попытки провести активные эксперименты в космосе: в эксперименте ЛИМА-Д на космических аппаратах «Фобос» (1986) планировалось воздействовать на реголит Фобоса пучком лазера. Однако из-за технических неполадок проект не достиг главной цели и эксперимент не состоялся.

В лаборатории был изобретён масс-спектрометр TOF MS для измерения элементного и изотопного состава тяжёлых

Laboratory for Active Diagnostics and Mass Spectrometry (538). Head — Prof. Dr. Georgy Managadze

The laboratory is concentrating on conducting physical and, first of all, plasma, experiments in space. In course of these experiments the medium undergoes artificial activation. The reaction of the medium to the influence helps to estimate the physical processes taking place in space. One of the very first experiments of this kind was conducted in the near-earth space and the influence was exercised with heating stands on the ground or instruments onboard the geophysical rockets. In the following the active experiment was attempted in deep space: in LIMA-D experiment onboard the *Phobos* spacecraft (1986), the Phobos regolith was planned to be analyzed activated by a laser beam. But due to technical hitches the project did not reach its main goals and the experiment didn't take place.

The laboratory have invented a time-of-flight (TOF) mass spectrometer to measure the element and isotopic composition of heavy metals in the solar wind of ~50...60 keV energy range. This instrument was patented in several countries and included into the payload of the international projects: SOHO, WIND, and ACE

металлов в солнечном ветре с энергией ~50...60 кэВ. Он был запатентован в ряде ведущих зарубежных космических держав и включён в состав научной бортовой аппаратуры в международных проектах SOHO, WIND и ACE (NASA). С их помощью впервые был измерен изотопный состав элементов от магния до железа.

В параллельных наземных экспериментах по воздействию лазера на твёрдую мишень были получены результаты, которые стали основой оригинальной концепции возможности зарождения жизни в ходе ударных событий. Под действием коротких, длительностью несколько наносекунд, лазерных импульсов на твёрдотельную мишень образуется плазменный факел, очень похожий на факел ударного воздействия, например, при ударе комет, и могут синтезироваться новые химические соединения, в том числе органические. Длительные исследования показали, что взаимодействие электрических и магнитных полей в плазменном факеле с излучением плазмы могут обеспечить генерацию истинных локальных хиральных полей и привести к нарушению зеркальной симметрии энантиомеров — иными словами, органические вещества, которые образовывались при этом, оказываются в большей степени «левыми», чем «правыми». Если то же происходит в плазменном факеле ударной природы, то это может иметь непосредственное отношение к возникновению простейших форм живой материи, которая, как известно, на Земле строится на основе «левых» аминокислот.

Основные направления

- Экспериментальные исследования химического и минералогического состава вещества космических тел;
- лабораторное моделирование синтеза органических молекулярных структур и механизмов нарушения зеркальной симметрии энантиомеров в локальных хиральных физических полях плазменного факела метеоритного удара, которые предположительно могли обеспечить возникновение условий для формирования простейших форм живой материи;
- разработка методов отождествления признаков жизни внеземного происхождения, с помощью бортовых времяпролетных масс-спектрометрических приборов (TOF MS) методами ионизация вещества с помощью матрицы и лазерного излучения и пиролизными инструментами нового поколения;
- разработка методов определения возраста геологических пород космических тел с борта спускаемого аппарата по измерению соотношений изотопов свинца на базе TOF MS, оснащённого химическим реактором.

(NASA). Isotopic composition of elements from magnesium to iron was measured by means of these instruments for the first time.

Concurrent laboratory experiments of laser effect on solid targets gave results, which have become the basis for an original concept of the origin of life in course of shockwave events. Short series of nanosecond laser pulses on a solid-state target form a plasma flare simulating meteorite impacts, during which new chemical compounds may form including the organic ones. Long-term studies showed that the interaction of electric and magnetic fields in the plasma flare with plasma emission generates local true chiral fields and results in the mirror-symmetry breaking of enantiomers, in other words, the organic compounds formed during this process turn out to be more left-handed than right-handed ones. If the same process is taking place in the plasma flare of the impact nature then this can be directly relevant to the origin of elementary forms of the living matter, which on the Earth, as it is well known, is based on the left-handed amino acids.

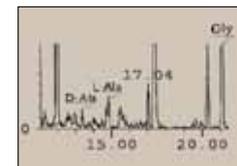
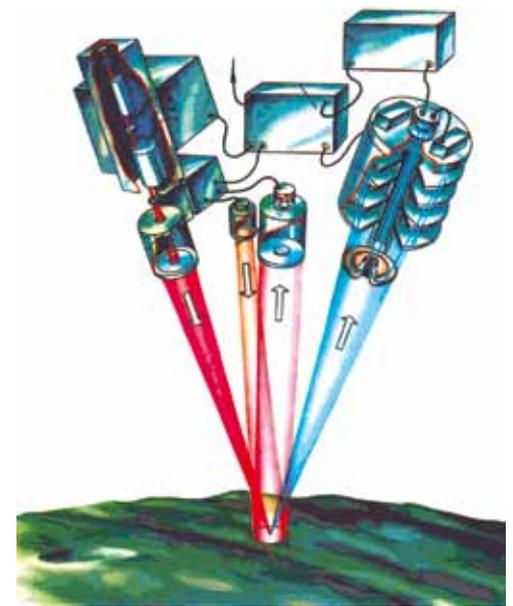


Схема эксперимента ЛИМА-Д на аппаратах «Фобос»

LIMA-D experiment layout onboard the Phobos spacecraft



Планировалось, что приборы ЛИМА-Д (TOF-MS) и ДИОН, установленные на космическом аппарате «Фобос», при пролёте на высоте 50...80 м над поверхностью Фобоса в результате активного воздействия на реголит определят элементный и минералогический состав поверхности Фобоса. В приборе ЛИМА-Д воздействие на реголит осуществлялось пучком лазера, в приборе ДИОН вторичная ионная эмиссия возбуждалась потоком ионов солнечного ветра и космических лучей

LIMA-D (TOF MS) and DION active experiments aboard Phobos spacecraft were supposed to investigate elemental and mineral composition of the Phobos's regolith during their fly-by over the surface at the altitude of 50–80 m. In LIMA-D experiment the surface was affected with laser beam. In DION experiment secondary ion emission was excited by solar wind ions and cosmic rays

Research Areas

- Experimental research of the chemical and mineral composition of cosmic bodies;
- laboratory simulation of organic molecular structures synthesis and mechanisms of mirror-symmetry breaking of enantiomers in the local chiral physical fields of the meteorite impact plasma plume which supposedly could enable the formation of the elementary forms of the living matter;
- development of extraterrestrial life signs identification methods by means of the on-board time-of-flight mass spectrometers (TOF MS) using the soft or matrix-assisted sample ionization technique and the advanced pyrolysis instrumentation;
- development of geological formations age determination methods based on the measurement of lead-isotope ratio using TOF MS equipped with a chemical reactor. This technique is usable from the board of the descending module on the surface of cosmic bodies.

Прибор ЛАЗМА для КА «Луна-25» и «Луна-27» — лазерный компактный времяпролётный масс-рефлектор для исследования лунного реголита в полярных областях, а также паров воды и льда. Совместно с университетом Берна

LASMA instrument for Luna 25 and Luna 27 spacecraft — the laser compact time-of-flight mass reflectron to examine lunar regolith in the polar regions as well as water vapors and ice. In collaboration with the University of Bern



Прибор АБИМАС — модификация прибора ЛАЗМА для проекта ЭКЗОМАРС (Роскосмос/ЕКА) для отождествления биомассы по масс-спектрометрическому анализу матричных и биомаркерных элементов, после подготовки образца с помощью специальной системы экстракции, также разработанной в лаборатории

ABIMAS instrument is a modification of LASMA instrument for ExoMars (Roscosmos/ESA) to identify the biomass by the mass spectroscopic analysis of matrix and biomarker elements after sample preparation using liquid extraction system constructed in the laboratory as well



Аракел Петросян
Arakel Petrosyan



Приборы, проекты, результаты

Обнаружены и исследованы новые свойства плазменного факела, возникающего под воздействием лазерного излучения на мишень, которая включает элементы, входящие в состав органических соединений и обеспечивающие синтез простых и сложных органических соединений в процессе разлёта плазменного факела.

Обнаружены аминокислоты белков, синтезированных в плазменном факеле от воздействия ударника, движущегося со скоростью 7 км/с, а также умеренное нарушение симметрии энантиомеров с избытком L-аминокислот, совпадающее с биоорганическим.

Предложен высокоэффективный способ синтеза воды в космическом пространстве. Опытным путём было показано, что молекулы H_2O могут появляться при взаимодействии ионов водорода звёздных ветров с безатмосферными космическими телами, поверхности которых содержат кислород.

Instruments, Projects, Results

New properties of the plasma flare formed under the influence of laser radiation on the target which includes elements typical for the organic compounds and those inducing the synthesis of simple and complex organic compounds in the course of plasma plume expansion were discovered and studied.

Protein amino acids synthesized in the plasma plume due to the influence of an impactor moving at 7 km/s speed as well as moderate symmetry breaking of enantiomers with surplus of L-amino acids, the same as the bioorganic one were discovered.

A highly efficient method of water synthesis in space was proposed. The experiments have shown that H_2O molecules can form as the hydrogen ions of the solar wind interact with atmosphere-less bodies, if their surface material contains oxygen.

Сектор динамики атмосфер и климата (53.9) (руководитель — д-р физ.-мат. наук, профессор Аракел Петросян)

Сектор динамики атмосфер и климата создан как теоретическое подразделение для научной поддержки экспериментов по изучению планетных атмосфер. В его задачи входит численное моделирование и разработка математического аппарата, который используется для представления процессов, происходящих в атмосферах и магнитных оболочках планет. С одной стороны, мы имеем экспериментальную информацию; с другой стороны, теоретические работы позволяют, во-первых, понять, чего можно ожидать от этих данных, и во-вторых, какого рода эксперименты надо проводить в будущем, чтобы подтвердить или опровергнуть существующие представления.

Sector of Atmosphere Dynamics and Climate (53.9). Head — Dr. Arakel Petrosyan

The division of Atmosphere Dynamics and Climate was established as a theoretical subdivision for scientific support of experiments in planetary atmospheres. Its tasks include numerical simulation and development of the mathematical tools to be used for presentation of processes in the atmospheres and magnetic envelopes of planets. On the one hand, we have experimental information, on the other hand, theoretical insights enable, first, to understand what can be expected from these data and, second, what kind of experiments to conduct in the future to confirm or disprove the current ideas.

Основные направления исследований

- Нелинейные волновые процессы в планетных атмосферах;
- турбулентность в планетных атмосферах;
- новые параметризации пограничного слоя в крупномасштабных моделях атмосферы Марса;
- многочастичные процессы в планетных атмосферах, содержащих аэрозоли;

Research Areas

- Non-linear wave processes in the planetary atmospheres;
- turbulence in the planetary atmospheres;
- new parameterizations of the boundary layer in large-scale models of the Martian atmosphere;
- multi-particle processes in the planetary atmospheres containing aerosols;

- магнитогидродинамическая турбулентность космической плазмы;
- кинетические процессы в диссипативном интервале космической плазмы;
- вычислительные технологии в геофизической гидродинамике планет и Земли и в космической плазме.

Результаты

Разработана модель пограничного слоя Марса, описывающая перенос аэрозолей в областях с горами и кратерами.

Найдены точные решения уравнений мелкой воды нейтральной жидкости над наклонной плоскостью.

Развита теория гидродинамической турбулентности, подверженной вращению, и показана возможность генерации крупномасштабных возмущений в планетных атмосферах.

Развита теория гидродинамической турбулентности в планетных атмосферах, содержащих твёрдые аэрозоли и пузырьки газа, показана возможность зарождения крупномасштабных вихрей в таких системах.

Предложены модернизированные уравнения мелкой воды, учитывающие горизонтальный перенос импульса вследствие вертикальной неоднородности течений и получены их точные решения.

Исследована турбулентность в локальном межзвёздном газе, показана возможность возникновения слабосжимаемого режима турбулентности и объяснены имеющиеся данные о спектрах флуктуации плотности в локальной межзвёздной среде.

Разработан метод исследования масштабно-инвариантных свойств турбулентности космической плазмы на основе прямого и подсеточного моделирования.

Разработан конечно-объёмный численный метод для исследования течений космической плазмы, обеспечивающий высокую точность как в области разрывных, так и непрерывных решений.

- magnetoturbulence of the space plasma;
- kinetic processes in the dissipative interval of the space plasma;
- computer technologies in the geophysical fluid dynamics of the planets and the Earth and in the space plasma.

Results

A model of the Martian boundary layer was developed which describes aerosol transfer in the regions with mountains and craters.

Exact solutions of shallow-water equations for the neutral fluid above the inclined plane were proposed.

The theory of hydrodynamic turbulence subject to rotation was developed and a possibility of large-scale disturbances generation in the planetary atmosphere was shown.

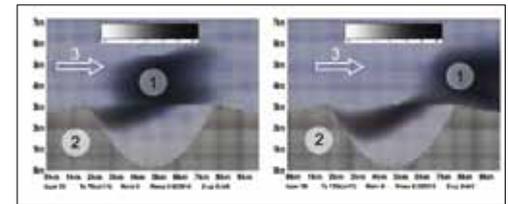
The theory of hydrodynamic turbulence in the planetary atmospheres containing solid aerosols and gas bubbles was developed, a possibility of large-scale vortexes genesis in such systems was shown.

Updated shallow-water equations taking into account the horizontal momentum transfer due to vertical flow nonuniformity were proposed and their exact solutions were obtained.

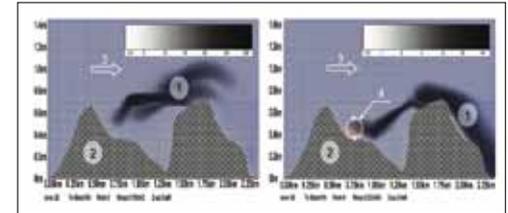
Turbulence in the local interstellar gas was examined, a possibility of a weakly compressible mode of turbulence was shown and current data of the density fluctuation spectra in a local interstellar medium were explained.

The research method of scale-invariant properties of the space plasma turbulence based on the direct and subgrid scale modeling was developed.

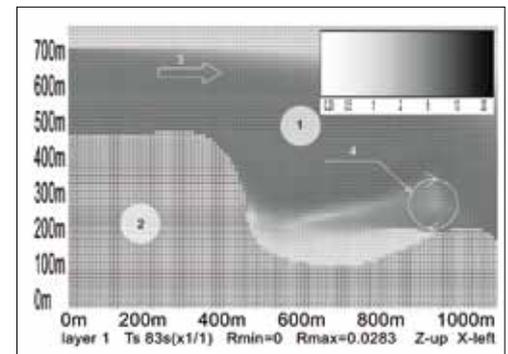
A finite volume numerical method for examination of space plasma fluxes ensuring high precision both for discontinuous and continuous solutions was developed.



1



2



3

Динамика движения облака примеси над кратером (1). Динамика движения пылевого облака над горами (2). Зарождение завихренности над обрывом (3). Цифрами обозначены: 1 — поток примеси; 2 — ландшафт; 3 — направление движения воздушного потока; 4 — области завихрения

Dynamics of the cloud of impurities over the crater (1). Dynamics of the dust cloud over the mountains (2). Vorticity genesis over the precipice (3). Figures indicate: 1 — impurity flow; 2 — landscape; 3 — air flow moving direction; 4 — vortex regions