

НАУЧНЫЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ SCIENTIFIC DEPARTMENTS

В названии отдела соединены космос и Земля, так как работы его сотрудников касаются процессов, общих для природы в целом, — самоорганизации систем, зарождения крупномасштабных структур в сплошных средах, волновые процессы, генерация быстрых частиц. К таким средам относятся и атмосферы планет, в том числе нашей, и солнечный ветер — поток плазмы, и магнитосферы планет и других объектов Вселенной.

За свою историю отдел пережил ряд трансформаций. Он начинался с лаборатории в составе отдела прикладной космической физики, которой руководил профессор **Семён Самойлович Моисеев** (23.11.1929–05.06.2002), крупнейший специалист в области физики плазмы, теории турбулентности и процессов самоорганизации в неравновесных средах.

Позже, когда лаборатория превратилась в отдел прикладных космических исследований (а затем отдел космогеофизики), перед сотрудниками были поставлены следующие задачи: 1) фундаментальные исследования в области физики атмосферы; 2) фундаментальные исследования в области нелинейной физики, физики плазмы и гидродинамики; 3) связь фундаментальных и прикладных исследований. Центральной проблемой, которая объединила эти направления, была самоорганизация и, прежде всего, проблема устойчивости и зарождения крупномасштабных структур в сплошных средах.

Таким образом, тематика работ отдела включала фундаментальные и прикладные задачи, экспериментальные и теоретические работы. Так, в конце 1980-х гг. сотрудники отдела участвовали в экспедициях для экспериментальной проверки теоретических механизмов зарождения тропических циклонов. В 1990-х гг. разрабатывались приборы для дистанционного изучения Марса (бортовой лидар) и наблюдений Солнца (рентгеновский полупроводниковый спектрометр РПС-1), аппаратура для плазменных экспериментов на борту орбитальных станций.

Параллельно с этим в теоретических работах исследовалось распространение электромагнитных волн в плазме, что важно и для ближнего космоса, и для далёких астрофизических объектов. Работы в области теории динамического хаоса развивались в приложения к поверхности Марса, динамике тайфунов, движению астероидов, комет и космических аппаратов.

The department name combines the space and the Earth since its researchers study processes common for the nature in general — self-organization of systems, wave processes, generation of high-energy particle fluxes, large-scale structures formation in continuous media. Among those are planetary atmospheres including our planet and the solar wind — the stream of plasma, as well as planetary and stellar magnetospheres.

Over the course of its history the department experienced several transformations. It was established as a laboratory within the Applied Space Physics department headed by **S. S. Moiseev**, professor, and a distinguished scholar in the field of plasma physics, turbulence theory and self-organization processes in non-equilibrium media.

Later, when the laboratory became the Department for Applied Space Research (and then Space Geophysics Department), the staff members were given the following tasks: 1) fundamental studies in atmosphere physics; 2) fundamental studies in nonlinear physics, plasma physics, and hydrodynamics; 3) connection of fundamental and applied research. Self-organization and, first of all, the problem of large-scale structures' stability and their genesis in continuous media were the major problems, which join these two branches together.

Therefore, the topics of the department included fundamental and applied tasks, experimental and theoretical works. In the end of the 1980's the researchers participated in expeditions, which aimed at experimental checking of theoretical mechanisms for tropical storms' genesis. In the 1990's the instruments for the remote Mars study (an on-board lidar) and Sun observations (an X-ray spectrometer RPS-1), hardware for plasma experiments aboard orbital stations were developed.

Concurrently, theoreticians were studying electromagnetic waves propagation in plasma, which is important for both the near space and the remote astrophysical objects. The works in the field of dynamic chaos theory were applied to the Martian surface, typhoon dynamics, movement of asteroids, comets, and spacecraft.

ОТДЕЛ КОСМОГЕОФИЗИКИ (51) SPACE GEOPHYSICS DEPARTMENT (51)



**Руководитель —
профессор, д-р физ.-мат. наук
Николай Ерохин**

Head — Prof. Dr. Nikolay Erokhin



**Профессор Семён
Самойлович Моисеев
(23.11.1929–05.06.2002)**

*Prof. Semen S. Moiseev
(November 23, 1929 –
June 5, 2002)*

Актуальные задачи отдела сегодня по-прежнему связаны с изучением и моделированием сложных неравновесных процессов, которые происходят на нашей планете и за её пределами. Это генерация структур в атмосфере и околоземном пространстве, механизмы формирования в ионосфере предвестников и индикаторов кризисных событий, влияние спиральности на динамику тайфуногенеза, генерация потоков ультрарелятивистских заряженных частиц в гелиосфере и влияние вариаций потоков космических лучей на крупномасштабный циклогенез в атмосфере Земли, анализ процессов во вторично-эмиссионном радиоизотопном источнике тока и многие другие.

Завершенные проекты и эксперименты

- Исследования Марса: Mars Surveyor'98 Program (аппараты Mars Climate Orbiter и Mars Polar Lander, NASA, 1998)
- Астрофизические эксперименты: ГРИФ и ТАУРУС (станция «Мир», модуль «Спектр», 1995–1997 гг.), НЕГА (орбитальный комплекс «Салют-7» – «Космос-1686», 1985–1988 гг.)
- Исследования Солнца: «КОРОНАС-Ф» (головная организация — ИЗМИРАН, 2001–2005 гг.)

Проекты в стадии разработки

Исследования Марса: ЭКЗОМАРС, ЕКА и Роскосмос (2016 и 2018 гг.)

Лаборатория теоретической гидрофизики, нелинейных и неравновесных процессов в космической среде (511) (руководитель — д-р физ.-мат. наук Алексей Васильев)

Лаборатория физики плазмы и термогидродинамики (512) (руководитель — канд. физ.-мат. наук Сергей Артёха)

Обе лаборатории были созданы в 1983 г., и их деятельность связана с решением основных проблем теоретической гидрофизики применительно к атмосфере, ионосфере и космической среде, включая околоземное пространство, а также динамики нелинейных и неравновесных процессов в системе «атмосфера-ионосфера». К объектам исследования относятся такие феномены, как тропические циклоны и механизмы их зарождения, ускорение космических лучей и многие другие.

Основные направления исследований

- Приложение теории резонансных явлений к задачам о динамике заряженных частиц в электромагнитных полях сложной конфигурации, анализ характеристик стационарных зеркальных структур

Today's major objectives of the department are still related to the study and modeling of complex non-equilibrium processes taking place on our planet and beyond. These include structure generation in the atmosphere and the near space, the mechanisms of critical events premonitory symptoms and the indicators in the ionosphere, influence of helicity on the typhoon genesis, generation of the charged ultrarelativistic particle fluxes in the heliosphere and influence of the cosmic-ray fluxes on the large-scale cyclon genesis in the Earth's atmosphere, analysis of the processes in the secondary emission radioisotope current source and many others.

Completed Projects and Experiments

- Mars exploration: *Mars Surveyor'98 Program* (*Mars Climate Orbiter* and *Mars Polar Lander*, NASA, 1998)
- Astrophysical experiments: GRIF and TAURUS (*Mir* Space Station, *Spektr* Module, 1995–1997), NEGA (*Salyut 7 – Kosmos 1686*, 1985–1988)
- Sun research: *Koronas-F* (principal organization — IZMIRAN, 2001–2005)

Projects in Development

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

Laboratory of Theoretical Fluid Physics, Nonlinear and Non-Equilibrium Processes in the Space Environment (511). Head — Dr. Alexei Vasilyev

Laboratory of Plasma Physics and Thermohydrodynamics (512). Head — Dr. Sergey Artekha

Both laboratories were founded in 1983 and their activity relates to the solution of the major problems of the theoretical fluid physics as applied to the atmosphere, ionosphere, and space environment including the near space as well as nonlinear and non-equilibrium processes in the “atmosphere-ionosphere” system. The subjects of research include such phenomena as tropic cyclones (TC) and their origin, cosmic ray acceleration, and many others.

Research Areas

- Application of the resonance phenomena theory to the tasks relating to the charged particles dynamics in the electromagnetic fields of irregular shape, analysis of the static mirror structures in the space plasma, dynamics

Алексей Васильев
Alexei Vasilyev



Сергей Артёха
Sergey Artekha



в космической плазме, динамика серфотронного ускорения заряженных частиц электромагнитными волнами в космической плазме и вариаций потоков космических лучей, разработка физических принципов конструирования и функционирования квантовых нейронных сетей и современных методов управления автономными аппаратами на их основе;

- развитие нового подхода для изучения крупномасштабного тропического циклогенеза на основе турбулентного вихревого динамо, анализ хода регионального крупномасштабного циклогенеза, взаимосвязь геоэффективных явлений в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли, резонансные механизмы воздействия солнечной активности на земной климат, влияние плазмоподобных подсистем на динамику тайфуногенеза;
- солнечные вспышки малой мощности и всплески рентгеновского излучения, рентгеновская эмиссия ночной ионосферы и её сезонная зависимость, формирование когерентных структур в верхней и нижней ионосфере, их влияние на транспортные свойства, электродинамику, устойчивость гидромагнитных течений в земном ядре;
- влияние захваченных заряженных частиц на плазменные явления, зарядка тел и частиц пыли в космосе и лабораторных условиях, диагностика плазмы электрическими зондами, динамика быстрых электронов в плазме грозовых разрядов при внешних воздействиях, анализ структурных функций электрической турбулентности в грозовой облачности, экспериментальные исследования пристеночных пульсаций потока и формирование турбулентного шума около движущихся объектов в морях;
- резонансное тунелирование электромагнитных и других волн в градиентных средах, удвоение частот электромагнитных волн в неоднородной ионосферной плазме, оптимальные условия прохождения внутренних гравитационных волн из тропосферы в ионосферу с генерацией индикаторов кризисных процессов.

Результаты

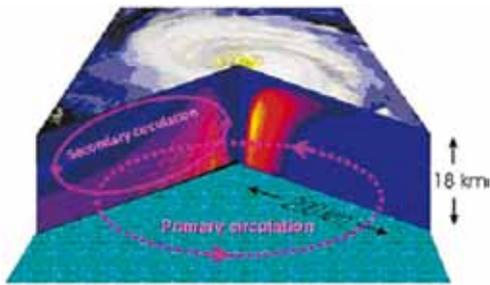
Исследовано серфотронное ускорение заряженных частиц электромагнитными и электростатическими плазменными волнами, изучены условия его реализации, найдены его характеристики. Показано, что в плазме межзвёздных облаков частицы могут ускоряться до энергий порядка 10^{15} эВ. Рассмотрен диффузионный механизм роста энергии заряженных частиц в полях электромагнитных волн.

of the charged particles surfatron acceleration by the electromagnetic waves in the space plasma and variation of the cosmic rays fluxes, development of the physical principles of designing and functioning of the quantum neural networks and modern control methods of the self-contained vehicles based on these networks;

- development of a new approach to study the large-scale tropical cyclogenesis based on the turbulent vortex dynamo, analysis of the regional large-scale cyclogenesis course, interrelations of the geoeffective phenomena in the lithosphere, atmosphere and ionosphere of the Earth, resonance mechanisms of the solar activity influence on the Earth's climate, influence of the plasma-like subsystems on the typhoon genesis dynamics;
- low-intensity solar flares and X-ray bursts, X-ray emission of night-time ionosphere and its seasonal dependence, formation of coherent structures in the upper and lower ionosphere, their influence on the transport properties, electrodynamic, stability of hydromagnetic fluxes in the Earth's core;
- influence of the captured charged particles on the plasma phenomena, charging of the bodies and dust particles in space and laboratory conditions, plasma diagnostics with electrical probes, dynamics of the fast electrons in the plasma of storm discharges under external influences, analysis of the structural functions of electrical turbulence in the thunderstorm, experimental studies of the flow pulsations in the near-wall layers and formation of the turbulent noise near the moving objects in the seas;
- resonance tunneling of electromagnetic and other waves in the gradient media, doubling of electromagnetic waves frequencies in the heterogeneous ionospheric plasma, optimum conditions of internal gravity waves passage from the troposphere into the ionosphere with generation of the crisis process indicators.

Results

Surfatron acceleration of the charged particles using the electromagnetic and electrostatic plasma waves was investigated, conditions of acceleration occurrence were studied, acceleration properties were found. It was shown that the particles in the plasma of the interstellar clouds can accelerate to the energies of around 10^{15} eV. A diffusive mechanism of the charged particles energy growth in electromagnetic wave fields was described.



Диагностика зарождения тропического циклона Genesis, зацепление тангенциальной и трансверсальной циркуляций в усиливающейся вихре

Diagnostics of the Genesis tropical cyclone formation, coupling of tangential and transversal circulations in the intensifying vortex

Эти задачи актуальны для исследования характеристик и описания динамики потоков заряженных частиц в хвосте магнитосферы Земли. Результаты важны в контексте современных представлений о возможных механизмах генерации вариаций потоков ультрарелятивистских частиц в космической плазме.

На основе турбулентного вихревого динамо в атмосфере развит новый подход для исследования тропического циклогенеза, предложены критерии диагностики момента, когда зарождающийся крупномасштабный вихрь становится энергетически самоподдерживающимся. Показано, что формирующийся мезомасштабный вихрь становится самоподдерживающимся из-за того, что зацепляются два режима циркуляции: тангенциальная и трансверсальная (где есть и горизонтальная, и вертикальная скорости) — и происходит это с помощью вращающихся структур облачных масштабов — вихревых горячих башен.

Исследованы возмущения ионосферы при воздействии «снизу», в том числе при цунами и молниях. Обнаружена зависимость амплитуды отклика ионосферы в полном электронном содержании на подводное цунамигенное землетрясение от вертикального смещения в нём. Ионосферный отклик, на основе которого можно сделать вывод о зарождении цунами, регистрируется раньше прихода волны к берегу. Установлено, что возникновение аномальных амплитуд УНЧ/КНЧ-сигналов в верхней ионосфере над грозовыми разрядами может быть обусловлено существованием в нижней ионосфере областей высокоионизованной плазмы от молниевых разрядов. Показано, что молнии — локальные мощные источники ионизации ионосферы, а в области от мезосферы к термосфере в результате неустойчивости экмановского типа создаются условия для генерации квазипериодических вытянутых крупномасштабных структур в нейтральной и плазменной компонентах с наблюдаемой в эксперименте ориентацией.

Предложен резонансный механизм влияния солнечной активности на земной климат: наблюдаемая климатическая вариация есть результат воздействия солнечной квазипериодической вариации на собственную климатическую осцилляцию. Это объясняет, почему солнечный и климатический цикл не строго синхронизированы — между ними существует разность фаз. Учитывая этот механизм, удалось в расчётах воспроизвести квазипериодические (около 11 и 22 лет) компоненты вариаций осадков в районе порта Форталезы (Бразилия) на временном отрезке более 160 лет. Показано наличие корреляций вариации уровня осадков между расчётами и данными наблюдений.

These issues are crucial for research of the properties and description of dynamics of the charged particles fluxes in the Earth's magnetosphere tail. The results are important for the purposes of present-day ideas of possible mechanisms of the generation of ultrarelativistic particles flux variations in the space plasma.

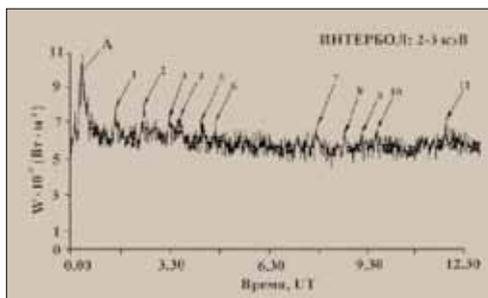
Based on the turbulent vortex dynamo in the atmosphere, a new approach to analyze the tropical cyclogenesis was developed, diagnostic criteria of the momentum when a nascent large-scale vortex becomes a self-maintaining one were proposed. It was shown that a forming mesoscale vortex becomes a self-maintaining one when two circulation modes are coupled: the tangential and the transversal ones (where there are both vertical and horizontal velocities) and the reason is the rotating structures of cloud scales — vertical hot towers.

Ionosphere disturbance as it is influenced from below, including during tsunami and lightning, was studied. The dependence of the ionosphere response amplitude in the total electron content to the tsunamigenic seaquake on the vertical displacement during the quake was found. The ionosphere response, which is the basis for a conclusion on tsunami generation, is recorded before the wave reaches the shore. It was found that the generation of the abnormal amplitudes of LF/ELF-signals in the upper ionosphere above the storm discharges could be associated with highly ionized plasma domains from the lightning discharges in the lower ionosphere. It was shown that the lightning are local powerful sources of ionosphere ionization, and, in the zone from the mesosphere to the thermosphere, the generation of the quasi-periodic stretched-out large-scale structures in the neutral and plasma components with the orientation observed during the experiment is made possible due to Ekman instability.

The resonance mechanism of the solar activity influence on the global climate was proposed: the observed climate variation is a result of the solar quasi-periodic variation influence on its own climate oscillation. That explains why the solar cycle and the climatic one are not completely synchronized, there is a phase difference between them. Taking this mechanism into account, we succeeded in calculations of the quasi-periodic (approx. 11 and 22 years) variation components near Fortaleza (Brazil) over the time line of more than 160 years. It was shown that the correlation of the precipitation variations exists between the calculated and the observed data.

Слабые вспышки в рентгеновском диапазоне излучения Солнца в канале 2...3 кэВ 15 декабря 1995 г. в период с 0 ч 00 м UT. Стрелками и цифрами помечены вспышки класса 0. Буквой помечен всплеск класса А

Weak solar flares in the X-ray spectrum at 2...3 keV on 15 December 1995 from 00:00 UT. Arrows and figures indicate class 0 bursts. A letter indicates class A burst



Исследованы спектр вспышек малой мощности и структура излучения теплового фона короны в январе-феврале 2003 г. по данным аппарата RHESSI (NASA) в мягкой компоненте рентгеновского излучения Солнца. Обнаружено, что интенсивность рентгеновского излучения вспышек и теплового фона короны для энергий 2...15 кэВ падает. Проведён сравнительный анализ данных RHESSI и «Интербол-Хвостовой зонд». Предложен новый механизм нагрева солнечной короны, связанный с микро-вспышками.

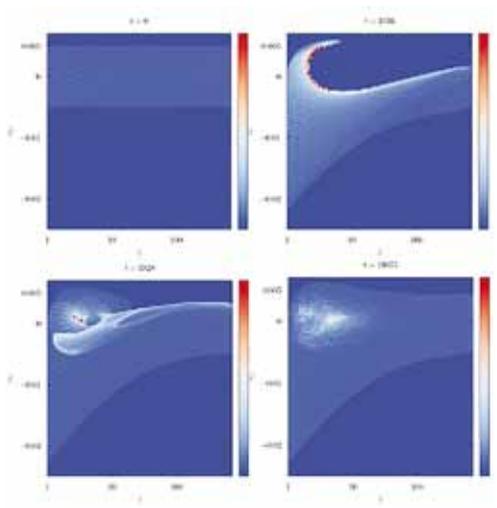
На основе последовательного подхода подробно исследована спутниковая неустойчивость квазимонохроматических волн на ветви свистящих атмосферических волн в атмосфере Земли. Получены аналитические выражения для инкрементов неустойчивости, её аномальное поведение при наличии захваченных волной частиц, при равенстве частоты свистящих волн половине гирочастоты электронов в области интенсивного резонансного взаимодействия волна-частица. Показано, что наблюдаемые нелинейные волновые явления в радиационных поясах Земли тесно связаны с неустойчивостью, обусловленной захватом энергичных электронов. Заряженные частицы, захваченные в электростатические потенциальные ямы, участвуют в экранировании заряженных объектов в плазме и могут играть определяющую роль. Расчёты выявили наличие внешней границы области захвата заряженных частиц и позволили установить целый ряд закономерностей, связанных с её существованием. Проведено численное моделирование зарядки поглощающего сферического тела в бестолковательной плазме. Численный «эксперимент» позволяет определить все физические характеристики системы, включая наблюдение формирования функции распределения захваченных частиц.

Исследован ряд сценариев динамики мощного атмосферного вихря на основе нелинейной малопараметрической модели (МПМ) регионального крупномасштабного циклогенеза (РКЦ). Показано, что выбором параметров МПМ возможно получить сезонный ход РКЦ с формированием в активном сезоне заданного числа ураганов, имеющих различные характеристики (максимальная скорость ветра в ТЦ, длительность жизненного цикла, времена формирования тайфуна и его затухания). Модель описывает и возможность вариаций скорости ветра в ТЦ. Таким образом, в рамках МПМ можно изучать особенности временной динамики тропического циклогенеза в заданном регионе.

In January-February 2003, the low-energy flare spectra and the structure of the corona thermal background were studied based on the data received from RHESSI (NASA) in the soft component of the solar X-ray radiation. It was found that the intensity of the flare X-ray radiation and corona thermal background for 2...15 keV energies is declining. The comparative study of the RHESSI and *Interball Tail Probe* data was conducted. A new mechanism of the corona heating via microflares was proposed.

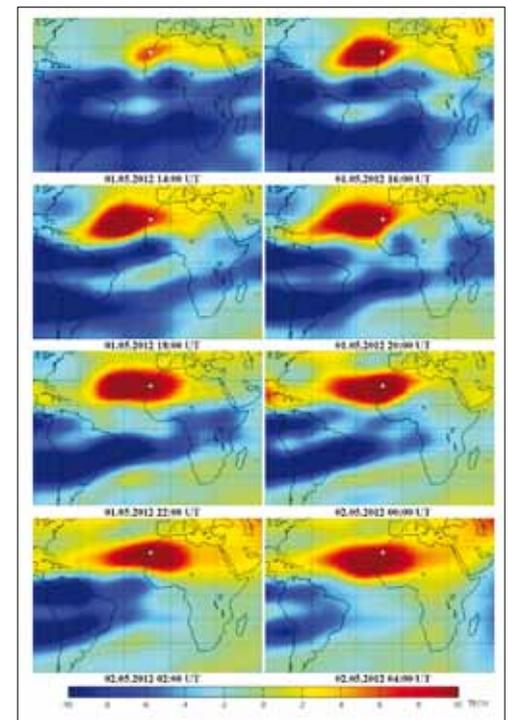
Based on the incremental approach the satellite instability of the quasi-monochromatic waves on the band of whistling atmospheric waves in the Earth's atmosphere was studied in details. We obtained the analytic expressions for the instability increments, its anomalous behavior with particles trapped by the wave when the whistler wave frequency is equal to the half of the electron gyrofrequency in the zone of intensive "wave-particle" resonance interaction. It was shown that the observed nonlinear wave phenomena in the radiation belt are closely related to the instability associated with the energetic electrons capture. The charged particles trapped in an electrostatic potential wells participate in the shielding of the charged objects in the plasma and may play a defining role. Our calculations have shown presence of the external boundary of trapped particles and enabled finding a wide range of regularities associated with its existence. A numerical simulation of the charging of the absorbing globe in the collisionless plasma was conducted. The numerical experiment enables to determine all physical parameters of the system including observation of the generation of the trapped particles distribution function.

A number of scenarios of the powerful atmospheric vortex dynamics based on the small parametric nonlinear model (SPM) of a large-scale regional cyclogenesis (LSRC) were studied. It was shown that the selection of SPM parameters enables obtaining a LSRC seasonal variation with formation of a given number of hurricanes during the active season having various parameters (maximum wind velocity in the tropic cyclone, cyclone life cycle, times of the typhoon formation and its fading). This model also describes possibilities of wind velocity variations in a tropic cyclone. Thus, the SPM can be used to study the peculiar features of the tropical cyclogenesis dynamics in a given region.



Плотность ионов в фазовом пространстве в различные моменты времени. Вдоль горизонтальной оси — радиальное расстояние в кубе. Вдоль вертикальной оси — радиальная скорость частиц. На малых расстояниях формируется плотный сгусток захваченных ионов. Облако захваченных частиц вносит значительный вклад в экранирование заряженной поглощающей сферы

The ionic density in the phase space in the different moments of time. The horizontal axis: particle radial distance cubed. The vertical axis: particle radial velocity. A dense bunch of trapped ions is formed at small distances. A cloud of the trapped particles makes a considerable contribution into the shielding of the charged absorbing sphere



Формирование ионосферных неоднородностей над Атлантическим океаном при прохождении песчаной бури 1–2 мая 2012 г. Красный цвет соответствует повышенному полному содержанию электронов в ионосфере

Formation of ionospheric irregularities over the Atlantic Ocean as a sand storm is passing, 1–2 May 2012. The red color shows high complete concentration of electrons in the ionosphere

Основной источник ионизации в приземной атмосфере — естественная радиоактивность Земли и в первую очередь радон, выделяемый из земной коры. С учётом этого разработана комплексная феноменологическая модель воздействия ионизации на параметры атмосферы и ионосферы. В ней удалось выяснить роль глобальной электрической цепи в электромагнитном взаимодействии атмосферы и ионосферы. За счёт изменения проводимости пограничного слоя воздуха меняется потенциал ионосферы над областью с модифицированной проводимостью, что приводит к формированию крупномасштабных ионосферных неоднородностей. Выводы из модели касаются землетрясений, извержений вулканов, пылевых и песчаных бурь, аварий на АЭС, ядерных взрывов.

Исследуется атмосферная эмиссия в диапазоне мягкого (3...10 кэВ) рентгеновского излучения, впервые зарегистрированная спектрометром РПС-1 в эксперименте на ИСЗ «КОРОНАС-Ф» на ночной стороне атмосферы. Соответствующая атмосферная светимость изменяется в пределах от 10 Вт до 40 кВт в зависимости от времени и географического положения (для сравнения: светимость полярных сияний составляет 10...30 МВт). Разрабатывается численная модель генерации и распространения излучения в предположении, что оно является тормозным излучением электронов, выпадающих из магнитосферы в ходе геомагнитных возмущений. С этой точки зрения рассмотрены наиболее значительные геомагнитные возмущения в ходе миссии КОРОНАС-Ф (6 и 24 ноября 2001 г., октябрь-ноябрь 2003 г., 20 ноября 2004 г. и 15 мая 2005 г.) и показано локальное повышение рентгеновской атмосферной эмиссии в области зазора между внутренним и внешним радиационными поясами.

На основе анализа лучевых траекторий изучено прохождение внутренних гравитационных волн (ВГВ) из тропосферы через вертикально неоднородные ветровые потоки до ионосферных высот. При различных вариантах выбора параметров численно изучены специфические особенности лучевых траекторий, связанные с наличием на трассе распространения волн слоёв горизонтального и вертикального отражений, а также критического слоя. Показано, что для крупномасштабных ВГВ возможно их прохождение из тропосферы до ионосферных высот. Установлено характерное время достижения ионосферных высот ВГВ из тропосферы, выявлены большие вариации значений этого времени при изменении исходных параметров, типичные значения горизонтального смещения (относительно источника генерации) волновых пакетов по достижении ими ионосферы.

Natural radioactivity, and, first of all, radon released from the Earth's crust, is the primary source of ionization in the atmosphere near the Earth's surface. Taking into account this fact, a complex phenomenological model of ionization influence on the atmosphere and ionosphere parameters was developed. This model facilitated discovering the role of the global electric circuit in the electromagnetic interaction of the atmosphere and the ionosphere. Due to variation of the atmospheric boundary layer conductivity, the ionosphere potential above the area with the altered conductivity is changing that results in the formation of large-scale ionospheric irregularities. The conclusions based on this model are relating to the earthquakes, volcano eruptions, dust and sand storms, meltdowns, and nuclear explosions.

The atmospheric emission within the soft X-ray emission (3...10 keV), first recorded by the RPS-1 spectrometer during the *Koronas-F* satellite experiment on the nightside of the atmosphere is being studied. The respective atmospheric luminance is changing within 10 W – 40 kW range depending on the time and a geographic position (in comparison: a polar glow is 10...30 MW). A numerical model of the emission generation and distribution is developing on the assumption that it is a deceleration radiation of electrons precipitating from the magnetosphere during geomagnetic disturbances. From this point of view, the most significant geomagnetic disturbances were considered during the *Koronas-F* mission (6 and 24 November 2001, October-November 2003, 20 November 2004 and 15 May 2005) and a local X-ray atmospheric emission increase was shown in the region of the gap between the inner and outer radiation belts.

Based on the analysis of ray trajectories, the passage of internal gravitational waves (IGW) from the troposphere through the vertically non-uniform wind flows to the ionospheric altitudes was studied. Under various conditions of the parameter selection, the characteristic features of ray trajectories related to the presence of layers of vertical and horizontal reflection as well as critical layers on the wave propagation paths were studied. It was shown that large-scale IGW can pass from the troposphere to the ionosphere altitudes. Characteristic times of IGW reaching the ionosphere altitudes from the troposphere were found, large variations of these times when the initial parameters changed were identified, typical values of the horizontal displacement (relative to the generation source) of the wave trains when they reach the ionosphere were found.

Лаборатория плазменно-пылевых процессов в космических объектах (513)
(руководитель — д-р физ.-мат. наук
Сергей Попель)

Лаборатория создана в 2014 г. на основе лаборатории микроструктурных объектов в геофизике Института динамики геосфер РАН. Этому предшествовал растущий в международном научном сообществе интерес к физике пылевой плазмы, которую составляют не только электроны, ионы и нейтралы, но также и заряженные частицы пыли. Это частый феномен в космосе, и изучение его — ключ к пониманию многих процессов, как, например, образование планет около звёзд или поведение пыли у поверхности Луны.

Среди важнейших результатов лаборатории, полученных до перехода в ИКИ, — теоретическое предсказание в 1996 г. существования нового вида ударных волн в пылевой плазме, диссипация в которых связана с процессом зарядки пылевых частиц, экспериментально подтверждённое в 1999 г. двумя независимыми коллективами из Японии и США. Сотрудники также добились интереснейших результатов в области геологии и физики атмосферы.

Сейчас деятельность лаборатории направлена на решение или приближение к решению основных проблем исследований и освоения Солнечной системы и космического пространства, связанных с плазменно-пылевыми объектами.

В центре работ, которые проводятся в лаборатории сегодня, — Луна, а именно — плазменно-пылевая система над лунной поверхностью. У Луны нет атмосферы, но есть экзосфера — очень разреженная оболочка из нейтральных атомов, фотоэлектронов, «выбитых» солнечным светом, в частности, из поверхности Луны, и заряженных пылевых частиц. Понимание того, что происходит в этой среде, чрезвычайно важно, в том числе для будущих лунных экспедиций и возможной обитаемой лунной базы.

Основные направления исследований

- Процессы происхождения частиц пыли в Солнечной системе и космосе; анализ свойств частиц указанной пыли, распределений пыли по размерам, химического и минералогического состава пылевых частиц;
- процессы зарядки частиц пыли и механизмы формирования плазменно-пылевых объектов в Солнечной системе и космосе;
- анализ лабораторных исследований по явлениям в пылевой плазме с точки зрения их применения к реальным плазменным процессам в Солнечной системе и космосе;

Laboratory of Dusty Plasma Processes in Space Objects (513). Head — Prof. Dr. Sergey Popel

The laboratory was established in 2014 on the basis of the laboratory of microstructural objects in geophysics within the RAS Institute of Geosphere Dynamics. This was preceded by the growing interest in the international scientific community to dusty plasma physics, which consists not only of electrons, ions, and neutrals, but also of the charged particles of dust. This is a frequent phenomenon in space, and its study is the key to understanding of many processes, such as, for instance, planet formation near the stars or dust behavior near the lunar surface.

Among most significant results of the laboratory obtained before it moved to IKI is a theoretical prediction in 1996 of existence of a new type of shock waves in the dusty plasma, dissipation of which is related to the process of the dust particles charging, in 1999 this prediction was experimentally confirmed by two independent groups from Japan and the USA. The laboratory's staff members have also obtained fascinating results in the sphere of physics, geology, and atmospheric physics.

Today, the laboratory's activity is aimed at the solution or approach to solution of primary problems of the Solar system and outer space study and exploration, those that are connected with the dusty plasma objects.

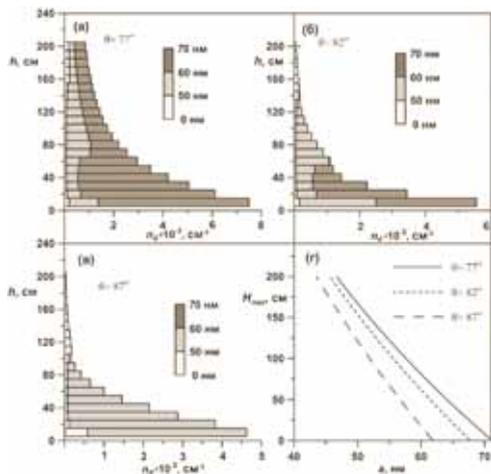
The primary focus of the activities in the laboratory today is the Moon, namely the dusty plasma system above the lunar surface. The Moon does not have an atmosphere but it has an exosphere, a very rarefied envelope consisting of neutral atoms, photoelectrons expelled by the solar light, in particular, out of the lunar surface, and charged dust particles. Understanding of what is going on in this environment is of crucial importance, including its application in the future lunar missions and a possible inhabited lunar base.

Research Areas

- The process of dust particles origin in the Solar system and outer space; analysis of particle properties of this dust, dust distribution by sizes, chemical and mineralogical composition of the dust particles;
- the process of dust particles charging and the mechanisms of dust plasma object formation in the Solar system and the outer space;
- analysis of the laboratory research of the phenomena in the dusty plasma from the point of view of their application to actual plasma processes in the Solar system and the outer space;



Сергей Попель
Sergey Popel



Распределение пылевых частиц (а-в) над поверхностью Луны для различных значений угла θ между местной нормалью и направлением на Солнце, а также максимально возможные высоты подъёма пылевых частиц (г) для условий, соответствующих участкам лунного реголита

Dust particles distribution (a-c) above the lunar surface for various values of θ -angle between the local normal line and the direction to the Sun as well as maximum possible altitudes of the dust particles (d) for the conditions corresponding to the lunar regolith regions

- свойства, характеристики и особенности плазменно-пылевых систем в Солнечной системе и космосе и процессов самоорганизации, приводящих к формированию и эволюции плазменно-пылевых систем;
- теоретическое исследование и численное моделирование процессов в плазменно-пылевой системе Земля-Луна в применении к будущим лунным миссиям;
- теоретическое исследование и численное моделирование процессов с участием пылевых частиц в применении к будущим марсианским миссиям;
- разработка рекомендаций по развитию экспериментальных методов сбора и исследования частиц пыли в Солнечной системе и космосе.

- properties, characteristics and peculiar features of the dusty plasma systems in the Solar system and the outer space and the processes of self-organization resulting in formation and evolution of the dusty plasma systems;
- theoretical study and numerical modeling of the processes in the Earth-Moon dust plasma system as applied to the future lunar missions;
- theoretical study and numerical modeling of the processes with dust particles as applied to the future Mars missions;
- formulation of recommendations on development of the experimental methods of collection and analysis of the dust particles in the Solar system and the outer space.

Проекты и результаты

Разработана теоретическая модель для самосогласованного описания концентраций фотоэлектронов и пылевых частиц над поверхностью освещённой части Луны. Она учитывает положение места наблюдения, эффекты образования фотоэлектронов на поверхности Луны и поверхностях пылевых частиц, динамику пылевых частиц в электрическом и гравитационном полях, зарядку пылевых частиц за счёт их взаимодействия с фотонами солнечного излучения, электронами и ионами солнечного ветра, фотоэлектронами и т. д.

Разработаны методы и создан численный код для вычисления параметров и функций распределения фотоэлектронов у поверхности Луны. Показано, что при расчётах параметров плазменно-пылевой системы и, в частности, фотоэлектронов весьма существенное значение имеет квантовый выход лунного реголита, т.е. количество электронов, выбиваемых одним фотоном с поверхности реголита

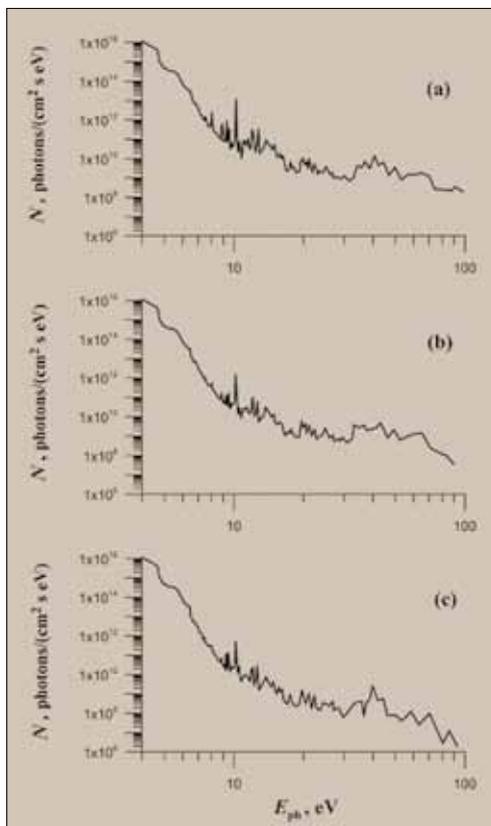
По-видимому, достаточно сложно доставить лунный грунт на Землю так, чтобы избежать его взаимодействия с земной атмосферой. В качестве варианта предложено проводить эксперименты по измерению квантового выхода и работы выхода лунного реголита непосредственно на поверхности Луны, что может быть сделано в будущих лунных миссиях.

Projects and Results

A theoretical model for a self-consistent description of photoelectrons and dust particles concentrations above the surface of the lit portion of the Moon was proposed. This model takes into account the observer's position, the effects of photoelectrons formation on the lunar surface and the dust particles surfaces, dust particles dynamics in the electric and gravitational fields, charging of the dust particles due to their interaction with the photons of the solar radiation, electrons and ions of the solar wind, photoelectrons and so on.

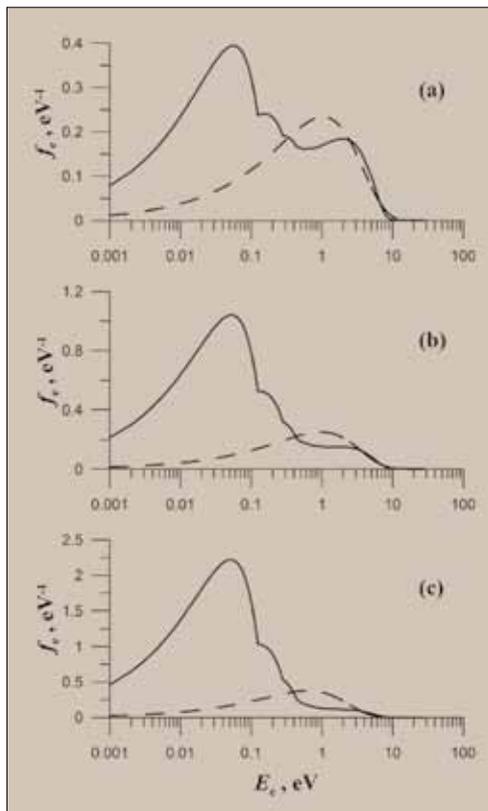
The methods were developed and the numerical code was created to calculate the parameters and functions of the photoelectron distribution near the lunar surface. It was shown that during the parameter calculation of the dust plasma system and, particularly, of photoelectrons, the quantum yield of the lunar regolith is of crucial importance, that is the amount of the electrons expelled by one photon from the regolith surface.

Apparently, it is difficult to deliver the lunar soil to the Earth without its interaction with the Earth's atmosphere. Alternatively, it was proposed to conduct experiments for measurement of the quantum yield and lunar regolith work function directly on the lunar surface that can be implemented during the future lunar missions.



Потоки солнечного излучения в зависимости от энергии фотона (в логарифмическом масштабе), соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (б) и солнечному минимуму (с)

Solar radiation fluxes depending on the photon energy (in the logarithmic scale) corresponding to a class X28 Sun flare (a), solar maximum (b) and solar minimum (c)



Функции распределения фотоэлектронов по энергиям (сплошные кривые) у освещённой части поверхности Луны, соответствующие солнечной вспышке класса X28 (а), солнечному максимуму (b) и солнечному минимуму (c). Пунктиром показаны максвелловские распределения, вычисленные для значений средней энергии фотоэлектронов, характеризующих соответствующие распределения, изображённые сплошными кривыми

Functions of energy distribution of the photoelectrons (solid curves) near the lit portion of the lunar surface corresponding to the class X28 Sun flare (a), solar maximum (b), and solar minimum (c). The dotted line indicates the Maxwell distributions calculated for the average energy values of photoelectrons marking the respective distributions shown in solid curves

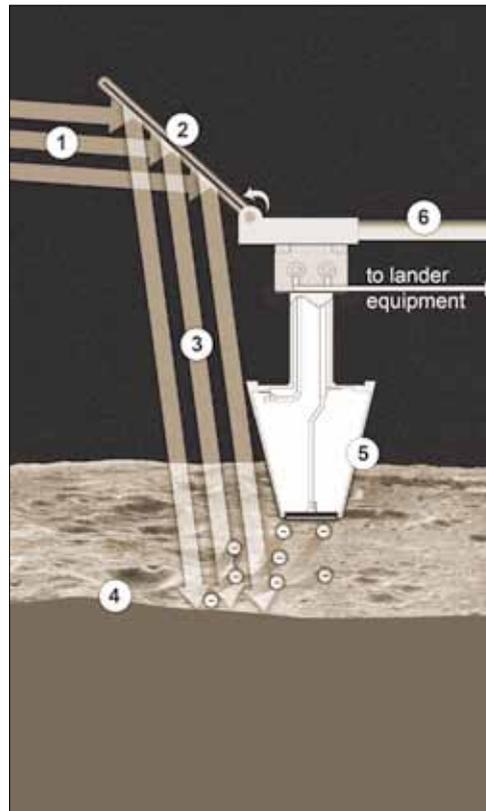


Схема эксперимента для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита: 1 — световой поток от источника излучения; 2 — зеркало; 3 — световой поток, преобразованный зеркалом; 4 — лунная поверхность; 5 — зонд Ленгмюра; 6 — штанга, на которой укреплено оборудование для измерений. Стрелка указывает направление на научную аппаратуру посадочного аппарата

The experiment layout to measure the quantum yield and lunar regolith workfunction: 1 — light flux from the radiation source; 2 — mirror; 3 — light flux refracted by the mirror; 4 — lunar surface; 5 — Langmuir probe; 6 — arm where the measurement hardware is attached. The arrow indicates the direction to the scientific equipment of the descending module

Движение частиц солнечного ветра по отношению к фотоэлектронам над лунной поверхностью приводит к развитию неустойчивости, в результате чего происходит генерация высокочастотных электростатических колебаний с частотами, находящимися в диапазоне частот ленгмюровских и электромагнитных волн. Не существует факторов, запрещающих возбуждение пылевых звуковых волн над освещённой частью Луны, генерация которых возможна, в частности, в области лунного терминатора. Движение терминатора может быть ассоциировано с распространением ударно-волновой пылевой звуковой структуры.

Solar wind particles motion with respect to photoelectrons above the lunar surface causes instability which results in generation of high-frequency electrostatic oscillations with frequencies in the range of Langmuir and electromagnetic waves. There are no factors preventing dust acoustic waves excitation above the lit portion of the Moon, these waves can be generated specifically in the region of the lunar terminator. The terminator motion can be associated with the propagation of the shock wave dust acoustic structure.