

НАПРАВЛЕНИЕ 9. Методы исследований Солнечной системы

Кураторы направления: Герасимов М.В. (ИКИ), Боровин Г.К. (ИПМ), Гальченко В.Ф. (ИНМИ).

9.1	Проект 9.1: Применение НПВО спектроскопии для выявления биомаркеров в составе инопланетного грунта и льда	ИКИ РАН	Григорьев А.В., Воробьева Е.А.
9.2	Проект 9.2: Методика и аппаратура нового поколения предназначенная для выявления биомассы земного типа на космических объектах Солнечной Системы	ИКИ РАН	Манагадзе Г.Г.
9.3	Проект 9.3: Антенная диагностика неравновесных электромагнитных излучений и параметров околоземной плазмы и плазмы солнечного ветра	ИПФ РАН	Чугунов Ю.В.
9.4	Проект 9.4: Создание архива данных радиофизических экспериментов и программного обеспечения для анализа результатов радиопросвечивания и радиолокации.	ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Гаврик А.Л., Юшкова О.В.

Проект 9.1. Устойчивость биоформ и биомаркеров в космической и инопланетной среде.

Аннотация. Получены новые статистически подтвержденные данные по сохранению жизнеспособных бактерий в грунте (мерзлой осадочной породе, ксерофитной песчаной почве) после гамма-облучения дозой до 1МГр при температуре -50°C и давлении 1 торр, что (в соответствии с данными миссии Curiosity [1] по дозам на поверхности реголита) свидетельствует о возможности сохранения жизнеспособных микроорганизмов в поверхностном слое реголита (защищенном от УФ-излучения) в течение не менее 20 млн. лет после утраты Марсом атмосферы. Полученные данные *обладают научной новизной* и расширяют существующие представления о пределах радиорезистентности микроорганизмов.

Разработана новая климатическая вакуумная камера для моделирования воздействия космических условий на биологические объекты в составе грунта при облучении электронами и в условиях низкой температуры и давления. Камера позволит сопоставить реакцию микробных систем на различные виды излучения. Проведены тестовые лабораторные испытания камеры.

В комплексе лимитирующих факторов, способных за геологическое время уничтожить предположительно сложившуюся биосферу раннего Марса, ключевым фактором является ионизирующее излучение. Устойчивость микробных экосистем к воздействию радиации остается не выясненной. Имеющиеся данные противоречивы и существенно расходятся по дозам, называемым в качестве стерилизующих. Оценка последствий воздействия ионизирующего излучения подразумевает как проявление отложенных негативных пост-эффектов в случае нестерилизующей дозы, так и возможности реактивации и репарации покоящихся клеток, в том числе, пробуждение глубоко дормантных клеток микробного «пула» в результате шокового воздействия. Учитывая сказанное, изучение воздействия ионизирующего излучения на природные микробные системы необходимо должно подразумевать определенный мониторинг процессов, происходящих в гетерогенной минеральной среде, равно как сочетание методов *in situ* и *ex situ* исследования.

Изучено совместное воздействие радиации, низкой температуры и низкого давления на сообщества микроорганизмов, населяющих экстремальные, но принципиально различные по генезису и физико-химическим условиям ксерофитные местообитания. Объектами-моделями в исследовании послужили образцы арктической древней вечномерзлой породы (Восточная Сибирь, отложения олёрской свиты с глубины 34.0 м, возраст мерзлой породы достигает 1.8-2 млн. лет. [2]), вечномерзлой породы Антарктиды (долина Бикона, крупнозернистый песок с включениями гальки, сцементированный льдом; с глубины 1.3-1.5 м; датировки возраста мерзлоты противоречивы по разным оценкам: 50-300 тыс. или 8.1 млн. лет. [3]), а также ксерофитные почвы пустыни Негев (Израиль, серозем на лессовидном суглинке; [4]) и горной пустыни у подножия Атласа (Марокко, горная серо-коричневая почва на андезите. Возраст – Прекембрий, Верхний Палеозой), как условные природные аналоги марсианского реголита.

Для проведения экспериментов по гамма-облучению использовали созданную в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН климатическую камеру [5], позволяющую поддерживать низкое давление и низкую температуру при облучении. Проведено облучение образцов гамма-излучением дозой 1 МГр в условиях низкого давления (1 торр) и низкой температуры (-50°C), т.е. смоделированы основные физические параметры поверхностного слоя реголита Марса, защищенного от ультрафиолетового излучения, с учетом накопления дозы во времени.

Получены статистически обоснованные экспериментальные данные о сохранении микробными сообществами экстремальных местообитаний высокой численности

жизнеспособных клеток и биоразнообразия при облучении ионизирующей радиацией дозой 1 МГр в условиях, приближенных к параметрам реголита Марса. Часть популяций переходила в некультивируемое (возможно, покоящееся) состояние, другая часть, напротив, активизировалась. Следствием этих процессов явилась перестройка таксономической структуры сообществ.

Следует подчеркнуть, что сведения о сохранении бактериями жизнеспособности при облучении гамма-излучением в дозах свыше 80 кГр отсутствуют [6-9]. Полученные данные расширяют существующие представления о пределах радиорезистентности микроорганизмов.

Гетерогенность почвенной среды и возникновение стохастических эффектов при воздействии радиации вызывают вопрос о воспроизводимости результатов лабораторного моделирования. Такая оценка была проведена в работе после проведения экспериментального облучения в трехкратной повторности. Различия в показателях численности бактерий в трех повторностях не превышали НСР, отклоняясь на $\pm 10\%$ от среднего значения, при этом все повторности значительно отличались от контроля. Различия индексов функционального состояния биосистемы и спектров потребления субстратов между облученными образцами также были незначительны, что подтверждено результатами кластерного анализа (рис. 1). Несмотря на относительно малые изменения, показатели *in situ* метаболической активности бактериальных сообществ после облучения объединяются в один кластер на очень близком расстоянии, тогда как контрольный образец выделяется в отдельный кластер, что свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов эксперимента.

Рассмотрен также вопрос развития возможных постэффектов воздействия гамма-излучения на микробиоту в образцах. Повторный анализ образца мерзлой осадочной породы облученного в 2005 г. дозой 150 кГр. показал, что за время хранения (-18°C) показатели численности бактерий в контрольном и облученном образцах выровнялись. Бактериальные сообщества в облученном образце более интенсивно развивались в сукцессии (рис. 2), что свидетельствовало о повышенном жизненном потенциале, их функциональное разнообразие вернулось к контрольному уровню. Сделан вывод, что исследуемая биосистема не только выдержала без значительных потерь воздействие высокой дозы гамма-излучения, но и сохранила во времени способность нормальной репродукции и функционирования.

Для сравнительной экспериментальной оценки воздействия различных видов космического излучения в сочетании с другими физическими факторами на жизнеспособность микроорганизмов, адаптированных к естественной минеральной

среде, в 2015 г. разработана новая климатическая вакуумная камера (рис. 3), позволяющая проводить облучение образцов электронами в условиях низкой температуры (около -130°C при охлаждение жидким азотом) и давления ($8-9 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.). Проведены тестовые лабораторные испытания камеры.

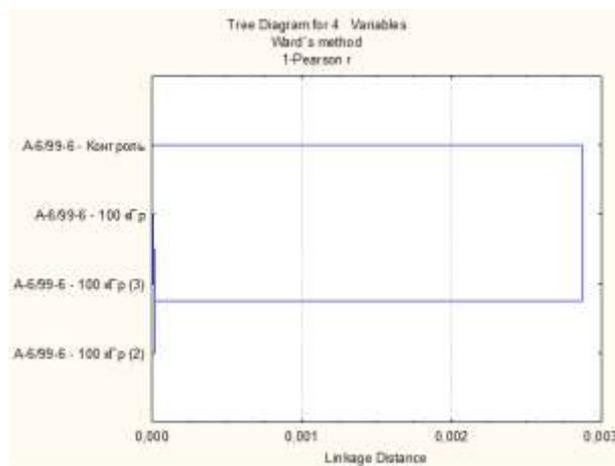


Рис. 1. Кластерный анализ спектров потребления субстратов сообществами контрольных и облученных образцов мерзлой осадочной породы Антарктиды.

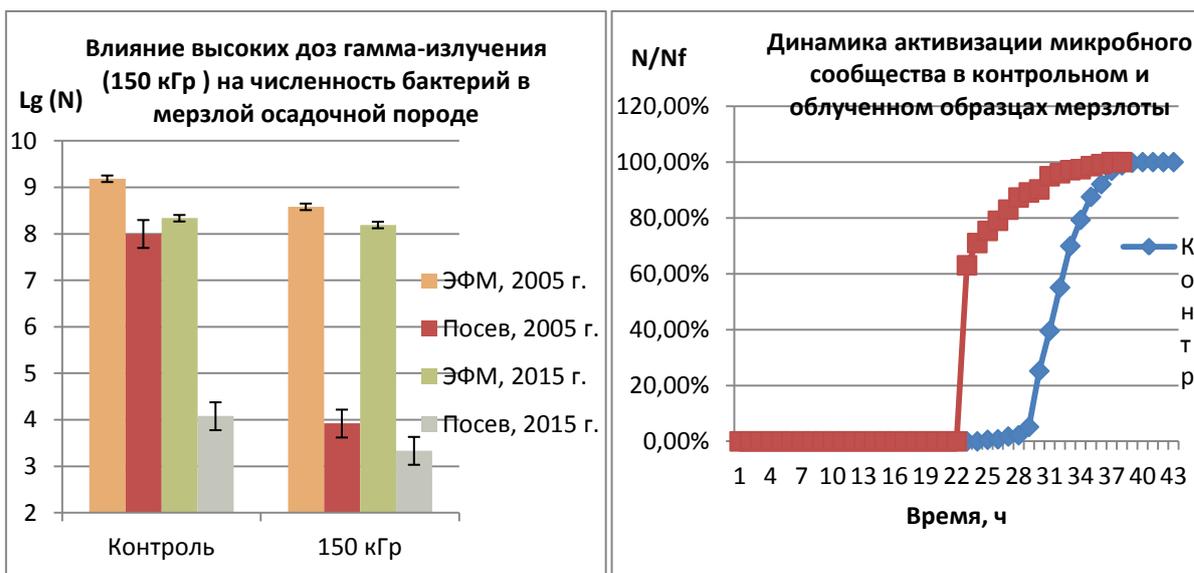


Рис. 2. Оценка последствий высоких доз гамма-излучения (150 кГр) на репродуктивность бактерий в мерзлой осадочной породе.



Рис. 3. Вакуумная климатическая камера для облучения электронами.

Литература:

1. Hassler D.M., Zeitlin C., et al. Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science*, 2014, 343(6169), 1244797.
2. D.A. Gilichinsky, E.A.Vorobyova, L.G. Erokhina, D.G. Fyodorov-Davydov, and N.R. Chaikovskaya. 1992. Long-term preservation of microbial ecosystems in permafrost. *Adv. Space Res.*, 12, 4, 255-263;
3. Gilichinsky D.A., Wilson G.S., et al. Microbial populations in Antarctic permafrost: biodiversity, state, age, and implication for astrobiology // *Astrobiology*, 2007, 7(2), pp. 275-311.
4. Angel R, Soares M.I.M., Ungar E.D., Gillor O. Biogeography of soil archaea and bacteria along a steep precipitation gradient.// *ISME J.*, 2009, 4, pp. 553–563.
5. Pavlov A.K., Shelegedin V.N., Vdovina M.A. and Pavlov A.A. Growth of microorganisms in Martian-like shallow subsurface conditions: laboratory modeling // *International Journal of Astrobiology*, 2010, V. 9, Issue 1, pp 51-58.
6. Rainey F.A., Ray K., et al. Extensive diversity of ionizing-radiation-resistant bacteria recovered from Sonoran Desert soil and description of nine new species of the genus *Deinococcus* obtained from a single soil sample // *Applied and environmental microbiology*, 2005, 71(9), pp. 5225-5235.
7. Pavlov A.K., Kalinin V.L., Konstantinov A.N., Shelegedin V.N., Pavlov A.A.. Was Earth ever infected by martian biota? Clues from radioresistant bacteria // *Astrobiology*, 2006, 6(6), pp. 911-918.
8. Dartnell L.R., Desorgher L., Ward J.M., Coates A.J. Martian subsurface ionising radiation: biosignatures and geology // *Biogeosciences*, 2007, 4, pp. 545–558.
9. Cox, M.M., Battista, J. R. *Deinococcus radiodurans* - the consummate survivor // *Nature Reviews Microbiology*, 2005, 3(11), pp. 882-892.

Руководитель проекта: Воробьева Елена Алексеевна, ИКИ РАН, к.б.н., инж. тел. +7915-495-5336, esautin@yandex.ru;

Состав группы: Воробьева Елена Алексеевна, Павлов Анатолий Константинович (ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе); Чепцов Владимир Сергеевич (МГУ, ф-т почвоведения)

Публикации:

1. Чепцов В.С., Воробьева Е.А., и др. Воздействие гамма-излучения, низкого давления и низкой температуры на жизнеспособность микробного сообщества серозема как

аналитическая модель марсианского реголита // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3;URL: www.science-education.ru/123-20100

2. Cheptsov, V. S., E. A. Vorobyova E.A., Pavlov A. K., Vdovina M. A, Lomasov V. N., Bulat S. A . Gamma-affected (under Martian conditions) microbial communities of Arctic permafrost analyzed by sequencing of 16S rDNA genes: *Arthrobacter* prevalence at 100 kGy dose.//Extremophiles. In Press.

3. Чепцов В.С., Воробьева Е.А., и др. Реголит Марса как потенциальная среда сохранения микробных экосистем. Труды конф. «Современные направления в радиобиологии. Молекулярные, генетические, клеточные и тканевые эффекты. Астробиология». Дубна, 27-30 окт. 2015. В печати.

4. Cheptsov V.S, Vorobyova E.A., et al. Long-term impact of low pressure on bacterial biodiversity and activity in soil and sediments. In: *The sixth Moscow Solar System Symposium, 5-9 October, 2015, Space Research Institute, Ed. Space Research Institute, Moscow*, v. 1, с. 235-ab

5. Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., et al. The Microbial Community Inhabiting Ancient Arctic Permafrost Withstands Gamma Irradiation Dose of 1 MGy in Simulated Martian Conditions. *Int. Conference «Permafrost in XXI century: basic and applied researches». Sept. 27 – Oct. 1, 2015, Pushchino, Moscow region, Russia. Conference materials*, ed. Pushchino, v.1, с. 105-106

Проект 9.2. Методика и аппаратура нового поколения предназначенная для выявления биомассы земного типа на космических объектах Солнечной системы.
Руководитель темы: Манагадзе Г.Г.

Отчет не представлен.

Проект 9.3. Антенная диагностика неравновесных электромагнитных излучений и параметров околоземной плазмы и плазмы солнечного ветра.

Аннотация. Проанализирован отклик приемной антенны в анизотропной среде (анизотропной плазме, плазме с потоком частиц) на падающий электромагнитный импульс излучения; сделаны расчеты эффективной длины антенны в резонансной анизотропной плазме.

Важной характеристикой приемной антенны является ее эффективная длина, позволяющая найти напряжение на терминале этой антенны. Для определенности будем считать, что внутреннее сопротивление приемника много больше, чем импеданс антенной системы. Понятно, что возможность приема падающего на антенну излучения связана с переизлучением электромагнитных волн этой антенной. В вакууме при регистрации плоской (квазиплоской) волны эффективная длина короткой (квазистатической) антенны порядка геометрической длины. В средах с анизотропной дисперсией (в ионосферной и магнитосферной плазме, плазме солнечного ветра) эффективная длина в резонансных частотных интервалах может сильно возрастать (в десятки и сотни раз) по сравнению с вакуумным значением даже для короткого диполя. Это соответствует резонансному отклику приемной антенны на падающую волну.

В общем случае напряжение на терминале этой антенны можно определить как произведение амплитуды электрического поля в падающей волне на эффективную длину этой антенны, которая пропорциональна произведению действующей длины диполя в вакууме на коэффициент возбуждения волн. Важно отметить, что электрическое поле падающей волны может иметь достаточно сложную пространственно-временную структуру. Например, при излучении волн резонансного конуса, как правило, происходит возбуждение широкого спектра волновых векторов даже в случае квазигармонического сигнала. Дисперсия этих волн такова, что при малой вариации волнового вектора по углу вблизи асимптоты волновой поверхности

имеется значительный разброс по его величине. При этом переизлучается также широкий пакет квазиплоских волн.

В рамках работ по Программе была проанализирована работа короткой (по сравнению с длиной электромагнитной волны) приемной антенны в анизотропной среде (анизотропной плазме, потоке изотропной плазмы).

На первом этапе был рассчитан сигнал, наводимый на антенне флуктуацией заряда (тока) в плазме. Расчет был основан на теореме взаимности, которая справедлива и для гиротропных сред, и для сред с пространственной дисперсией. Использование этой теоремы позволило избежать решения сложной задачи о рассеянии (переизлучении) падающей волны на приемной антенне. В качестве «взаимных» распределений заряда и создаваемого им электрического поля были использованы прямоугольное распределение заряда вдоль антенного провода и соответствующее ему поле излучения. С целью обоснования использования такого распределения заряда в рассматриваемом случае была поставлена и решена классическая электродинамическая задача о распределении заряда вдоль короткой дипольной антенны в плазме. Ее решение было основано на анализе соответствующего интегрального уравнения, полученного из граничного условия на поверхности идеального проводника (антенны), с использованием приближения «тонкой» антенны при различной ее ориентации относительно оси анизотропии среды. Результаты расчетов совпали с результатами, полученными ранее другими способами, если ось антенны не слишком близка к направлению асимптоты раскрытой поверхности волновых векторов. В частности, найденный таким образом импеданс совпадает с импедансом, найденным с помощью расчета мощности излучения в приближении заданного прямоугольного распределения заряда вдоль провода. Отдельно был рассмотрен случай ориентации антенны вдоль асимптоты волновых векторов, в окрестности которой резко меняется угловая зависимость реальной и мнимой частей импеданса.

На втором этапе было проведено усреднение найденного напряжения на терминале приемной антенны по соответствующей функции распределения зарядов (токов). Эта процедура зависит от вида импульса падающего излучения. В случае монохроматического сигнала использовалась флуктуационно-диссипативная теорема, примененная к регулярному электромагнитному полю и приемной антенне как частному случаю неравновесной системы, в которой устанавливается «равновесие» (стационарное состояние) между падающим полем излучения и переизлученным электромагнитным полем. В случае же сильных дисперсионных искажений сигнала (аномального расплывания) в процессе его распространения от источника до приемной

антенны в квадратичной величине, полученной из теоремы взаимности, была выделена часть, которая отвечает потерям энергии приемной антенной на переизлучение.

Полученные результаты были применены для предварительного анализа излучений, регистрируемых на спутниках «Cluster» в плазме солнечного ветра в окрестности плазменной частоты электронов.

Руководитель темы: Чугунов Юрий Владимирович, chugun@appl.sci-nnov.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Состав группы: Грач Вероника Савельевна, Губченко Владимир Михайлович, Пасманик Дмитрий Львович, Широков Евгений Алексеевич.

Публикации:

1. Чугунов Ю. В., Широков Е. А., Фомина И. А. К теории короткой цилиндрической антенны в анизотропных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 5. С. 352—361.
2. Чугунов Ю. В., Широков Е. А. Квазистатический диполь в магнитоактивной плазме в резонансной полосе частот. Отклик приемной антенны и распределение заряда на антенном проводе // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 1. (Статья принята к печати.)
3. Чугунов Ю. В. К теории короткой цилиндрической антенны в анизотропных средах // Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». Тезисы докладов. Москва, ИКИ РАН, 16–20 февраля 2015 г. С. 146.

Проект 9.4. Создание архива данных радиофизических экспериментов и программного обеспечения для анализа результатов радиопросвечивания и радиолокации.

Аннотация. Использование архива данных радиопросвечивания со спутников "Венера-15,-16" показало, что в дневной ионосфере Венеры регулярно формируется спорадический слой с вертикальным масштабом 5...10 км, мигрирующий в интервале высот 150...170 км, он может быть обусловлен распространением волн из атмосферы в ионосферу и проявляется в виде дополнительного максимума электронной

концентрации либо в виде изменения вертикального градиента электронной концентрации.

В период с 12.10.1983 по 24.09.1984 было проведено двухчастотное радиопросвечивание ионосферы Венеры с помощью КА *Венера-15,-16*. Антенна АДУ-1000 в г. Евпатория принимала когерентные сигналы КА *Венера-15,-16* с длинами волн 32 см (ДМ) и 8 см (СМ), штатная аппаратура обеспечивала усиление, гетеродинирование и фильтрацию сигналов. Затем сигналы поступали в комплекс аппаратуры дисперсионного интерферометра, он осуществлял узкополосную фильтрацию с помощью следящих фильтров, а фазометр измерял разностную фазу, которая регистрировалась самописцем. В состав аппаратуры была также включена новая в то время цифровая система регистрации. Напряженность поля ДМ- (1 ± 0.06 кГц) и СМ- (4 ± 0.12 кГц) сигналов с выходов полосовых фильтров дисперсионного интерферометра кодировалась с частотой дискретизации ~ 0.55 кГц и записывалась на магнитную ленту. Применение цифровой системы позволило через 30 лет восстановить зарегистрированные сигналы КА *Венера-15,-16* с целью более точных измерений параметров радиоволн. Разработка новых технологий обработки и анализа радиозатменных данных позволит выявлять новые свойства ионосферы Венеры, не наблюдавшиеся ни в одной миссии к Венере.

Радиозатменные данные КА *Венера-15,-16* являются важным звеном для анализа закономерностей образования ионосферы Венеры. Использование дециметрового диапазона длин волн $\lambda = 32$ см оказалось существенным преимуществом наших радиозатменных экспериментов (по сравнению с диапазоном $\lambda = 13$ см в иностранных миссиях), т.к. обеспечило уникальную возможность исследования разреженной плазмы в нижней области дневной ионосферы Венеры и выделения возмущений в области максимальной ионизации.

На рис. 1-3 представлено сравнение профилей электронной концентрации со спорадическими слоями в интервале высот 150...170 км.

На рис. 1 спорадический слой в виде изменения вертикального градиента электронной концентрации появился на высоте 157 км и наблюдался в 2 сеансах, выполненных через 1 сутки. В эти дни распределения электронной концентрации выше 140 км хорошо согласуются между собой, а нижняя часть ионосферы различается.

На рис. 2 спорадический слой в виде дополнительного максимума электронной концентрации появился на высоте 170 км (синяя линия) и на высоте 154 км (красная линия). В эти дни интенсивность солнечного излучения разная, поэтому максимальные

электронные концентрации различаются. Распределения электронной концентрации ниже 140 км согласуются между собой, а верхняя часть ионосферы (выше 140 км) в этих сеансах разная.

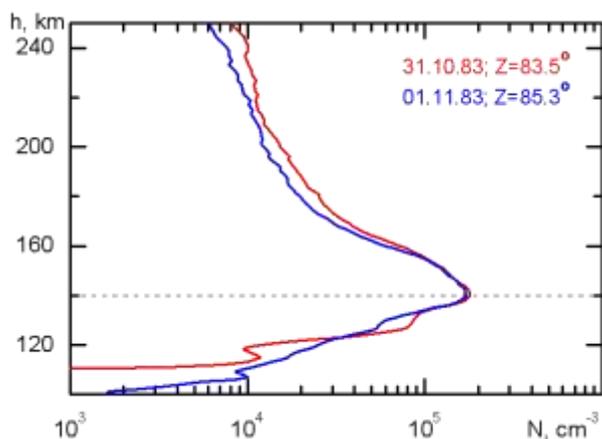


Рис. 1. Распределения электронной концентрации.

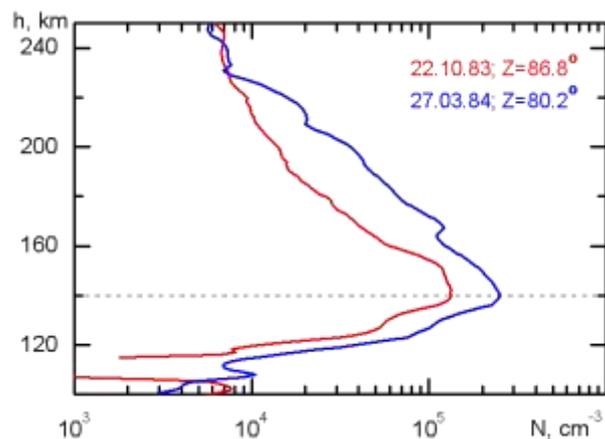


Рис. 2. Распределения электронной концентрации.

На рис. 3 показано, что спорадический слой на высотах 160...170 км может наблюдаться в течение нескольких дней. Изменение формы слоя и миграция по высоте могут быть обусловлены волновыми процессами при распространении возмущений из атмосферы в ионосферу.

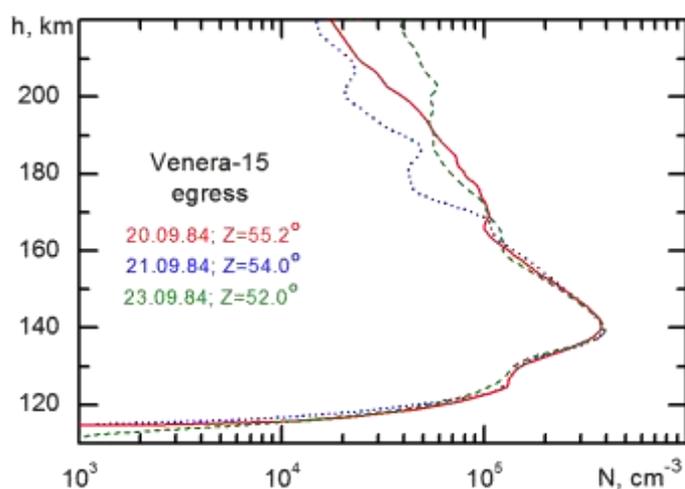


Рис. 3. Распределения электронной концентрации в ионосфере Венеры.

Таким образом, созданный архив данных экспериментов двухчастотного радиопросвечивания газовой оболочки Венеры ("Венера-15,-16") и экспериментов радиолокации астероидов 6489 Голевка и 1998 WT24, а также разработанное программное обеспечение позволяют выявлять новые свойства ионосферы Венеры и

исследованных астероидов. В частности, показано, что в дневной ионосфере Венеры регулярно формируется спорадический слой с вертикальным масштабом 5...10 км, мигрирующий в интервале высот 150...170 км, он может быть обусловлен распространением волн из атмосферы в ионосферу и проявляется в виде дополнительного максимума электронной концентрации, либо в виде изменения вертикального градиента электронной концентрации.

Руководители проекта: Гаврик А. Л., Юшкова О. В., ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН.

Состав группы: Смыслов А.А. студ. МИРЭА, Кулешов Е.А. ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Анненков М.А., ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН/ аспирант МГУ, Гаврик Ю.А. Senior Front-End Engineer, Apple Inc (USA), к.ф.-м.н.

Публикации:

1. Полушковский Ю.А., Скрипачев В.О., Гаврик А.Л. Способ приема и комплексной обработки данных от спутниковых навигационных приемников космических аппаратов для диагностики возмущения ионосферы и аппаратно-программный комплекс для его реализации // Патент на изобретение № . 2564450, от 04.09.2015.
2. Ю. А. Гаврик, А. Л. Гаврик, А. А. Смыслов. Распределение радиояркости поверхности астероида Голевка по данным радиолокации //Радиотехника и электроника, в печати 2015
3. Юшкова О.В., Юшков В.В. Взаимосвязь угла Брюстера и комплексной диэлектрической проницаемости угла Брюстера// Известия ВУЗов, Радиофизика, (в редакции,2015)
4. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. Новые методы в экспериментах двухчастотного радиопросвечивания ионосфер планет / Электронный ресурс 2015-06-06 <http://litterref.ru/bewqasbewrnaotrqas.html>
5. Юшкова О.В., Анненков М.А., Юшков Е.В. Возможности радиолокации при идентификации типа льда в ядре кометы// Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике / Муром: .2015., стр. 71-72, ISSN 2304-0297 (CD-ROM),
6. А.Л. Гаврик, Т.Ф. Копнина, А.А. Смыслов. Архив данных двухчастотного радиопросвечивания в экспериментах со спутниками Венера-15, Венера-16/ 10 конф. "Физика плазмы в Солнечной системе". Москва. ИКИ РАН. 2015. С. 87-88.
7. Gavrik A.L., Kopnina T.F., Bondarenko M.I., Smislov A.A. Multi-frequency phase-coherent systems: new instrument for occultation in the project Venus-D / The Sixth Moscow

Solar System Symposium (6MS³). Moscow. Russia. SRI. 2015. P. 6MS³-PS-37. P. 243-ab – ab-244.

8. Гаврик А.Л., Копнина Т.Ф., Бондаренко М.И., Смыслов А.А. Анализ возмущений в ионосфере Венеры по данным радиозатмений / 13-ая всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 2015. С. 327.

9. Bondarenko M., Gavrik A. On Non-Meteoritic Origin of Layers below V1 in Venusian Ionosphere / The Sixth Moscow Solar System Symposium. Moscow. Russia. SRI. 2015. P. 6MS³-VN-10.

10. М.И. Бондаренко, А.Л. Гаврик. Анализ волновых возмущений на ионосферных высотах в сигналах радиозатмений Венера-15.16 методом частотно-временных преобразований / 10 конф. "Физика плазмы в Солнечной системе". Москва. ИКИ РАН. 2015. С. 71-72.

11. А.Л. Гаврик, Т.Ф. Копнина, Е.А. Кулешов, А.А. Смыслов, М.И. Бондаренко. Временная и пространственная изменчивость ионосферы Венеры / Тезисы 10 конф. "Физика плазмы в Солнечной системе". Москва. ИКИ РАН. 16-20 февраля 2015. С. 72-73.

Руководители проекта: Гаврик А. Л., Юшкова О. В., ФИРЭ им.В.А.Котельникова РАН

Состав группы: Смыслов А.А. студ. МИРЭА, Кулешов Е.А. ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Анненков М.А., ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН/ аспирант МГУ, Гаврик Ю.А. Senior Front-End Engineer, Apple Inc (USA), к.ф.-м.н.

Проект. Оценка радиационной опасности от сверхмощных солнечных вспышек и гамма-всплесков при освоении Луны и Марса.

Аннотация. В 2015 году в рамках проекта проведены модельные расчеты образования радионуклидов в грунте Луны под действием сверхмощных солнечных вспышек и галактических гамма-всплесков с использованием последней версии численного кода GEANT4 и расчет устойчивости детекторов космических излучений под действием таких событий.

Аннотация. Проведены расчеты образования космогенных радионуклидов по глубине в поверхностном слое Луны для событий с экстремально высокими импульсными потоками высокоэнергичных протонов и гамма квантов аналогичных событиям 775 и

993 года. Получены ограничения на частоту и энергетику сверхмощных солнечных вспышек и галактических гамма всплесков на шкале 10^4 - 10^7 лет.

Проведена оценка устойчивости работы кремниевых детекторов космического излучения, как важных элементов электронного оборудования, для потоков протонов большой интенсивности при подобных событиях.

Руководитель темы: Васильев Г.И., Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Gennady.Vasilyev@mail.ioffe.ru

Состав группы: снс Павлов А.К., мнс Вдовина М.А., внс Еремин В.К., нс Крутьков С.Ю.

Подготовлена к печати статья.

Проект. Лунная обсерватория.

Аннотация. Разработано научное и техническое обоснование необходимости создания оптической обсерватории на поверхности Луны для исследования и выяснения физических причин и надежного прогнозирования климатических изменений посредством мониторинга отклонения среднегодового энергетического баланса планеты от равновесного состояния и вариаций свойств поверхности и атмосферы системой двух оптических телескопов с подвижными козырьками (патент РФ № 155044).

Активные исследования и выяснения причин климатических изменений ведутся с использованием различных методов и возможностей, в том числе, и астрономических – посредством измерения отдельных составляющих энергетического баланса Земли, в частности измерения величины альbedo Бонда планеты по пепельному свету Луны или изучения перспективы возможности таких измерений непосредственно с видимой поверхности Луны. Актуальность исследований, выяснение механизмов и физических причин изменений глобального климата с каждым годом резко возрастает и приобретает большое практическое значение, поскольку высока вероятность ускорения изменений глобальных характеристик климата вследствие долговременного отрицательного отклонения среднегодового энергетического баланса Земли от равновесного состояния, вызываемого активным уменьшением и грядущим наступлением глубокого квазидвухвекового минимума солнечной постоянной.

Среднегодовой энергетический баланс Земли как планеты в приходе и расходе тепловой энергии определяется разностью между поступающей во внешние слои атмосферы энергией солнечного излучения и уходящих в космическое пространство отраженной и рассеянной планетой во все направления доли энергии солнечного излучения, определяемой величиной альbedo Бонда Земли, и собственной энергией теплового излучения

$$E = (S_{\odot} + \Delta S_{\odot})/4 - (A + \Delta A)(S_{\odot} + \Delta S_{\odot})/4 - \varepsilon \sigma (T_p + \Delta T_p)^4,$$

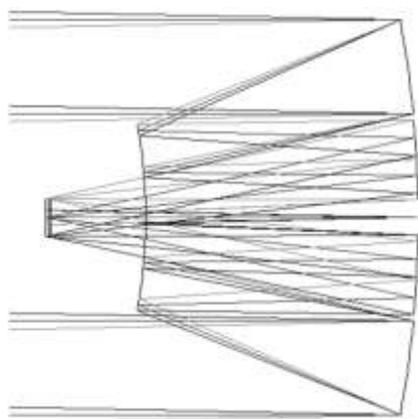
Где E – удельная мощность изменения теплосодержания Земли как планеты, S_{\odot} – солнечная постоянная, ΔS_{\odot} – приращение солнечной постоянной, A – альbedo Бонда Земли, ΔA – приращение альbedo Бонда Земли, ε – излучательная способность (степень черноты) системы поверхность-атмосфера, σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_p – термодинамическая планетарная температура, ΔT_p – приращение планетарной термодинамической температуры. Мониторинг и исследование долговременных вариаций глобальных климатических параметров являются чрезвычайно важной задачей в глубоком понимании физических механизмов изменений глобального климата и определении закономерностей его формирования, что позволит разработать надежные методы прогнозирования грядущих глубоких изменений климата. При этом изменение во времени среднегодовой энергии собственного теплового излучения Земли в космическое пространство вследствие медленного изменения ее теплосодержания всегда отстает от среднегодовой энергии поглощенного солнечного излучения, варьирующего с 11-летним и квазидвухвековым циклами, в течение периода времени 20 ± 8 лет, определяемого термической инерцией Мирового океана. В результате планета поглощает и излучает всегда неодинаковое количество среднегодовой энергии, образуя избыток или дефицит среднегодового энергетического баланса Земли, т.е. приходные и расходные части среднегодового энергетического баланса Земли всегда находятся в неравновесном состоянии $E \neq 0$, которое является естественным состоянием климатической системы и колеблется вокруг его квазидвухвекового равновесного. В фазе роста квазидвухвекового солнечного цикла 11-летние циклы, как правило, имеют меньшую продолжительность, а высота их максимума и среднециклическая абсолютная энергетическая мощность увеличиваются. Вследствие этого в фазе роста квазидвухвекового солнечного цикла наша планета получает больше энергии, чем отдает излучением в космос, и ее среднегодовой энергетический баланс положителен ($E > 0$). В результате такого длительного поглощения и накопления океаном дополнительной солнечной энергии, поступающей в течение всей фазы роста квазидвухвекового цикла, планета может постепенно нагреваться. А в фазе спада

квазидвухвекового цикла – наоборот, среднегодовой энергетический баланс Земли отрицателен ($E < 0$) и длительный дефицит поступающей солнечной энергии может вести к остыванию планеты.

Исследование долговременных вариаций величины отклонения среднегодового энергетического баланса планеты от равновесного состояния позволит надежно определять энергетическое состояние планеты, суммарную величину накопленного Мировым океаном избытка поступившей энергии или ее дефицита, что с учетом прогноза грядущих циклических вариаций абсолютной величины солнечной постоянной может достоверно определять и заблаговременно предсказать направление грядущего изменения климата. А суммарная величина накопленной энергии $\sum \Delta E$ или ее дефицита за длительный период может определять соответствующую глубину грядущей вариации климата. Это является научной проблемой фундаментальной важности и уникальным инструментом наилучшего и более глубокого познания физики солнечно-земных связей и установления физических причин климатических изменений и, следовательно, их наиболее надежного прогнозирования. Однако определение значения альbedo Бонда Земли на основе прямых измерений отраженной и рассеянной планетой доли энергии поступающего солнечного излучения во все направления радиометрами известных экспериментов с околополярными солнечно-синхронными орбитами (проекты ERBE, SCARAB, CERES) и геостационарными экваториальными орбитами (проект GERB) или радиометрами любого другого орбитального эксперимента не может выполняться достаточно надежно и с необходимой точностью ($\approx 0.1\%$) в течение длительного времени, поскольку альbedo Бонда является характеристикой отражения и рассеяния в полусферу. Они способны измерять энергию отраженного и рассеянного Землей солнечного излучения лишь от отдельных частей планеты и практически только под определенным углом. Радиометры с борта космического аппарата (КА) DSCOVR в точке Лагранжа L1 системы Солнце-Земля также смогут обеспечить прямые измерения энергии отраженного и рассеянного Землей солнечного излучения только практически в одном направлении, т.е. только значения геометрического альbedo Земли.

Для успешного решения данной важнейшей климатической проблемы единственным и наиболее перспективным местом в космосе, обеспечивающим более надежные и долговременные высокоточные прямые измерения вариаций комплекса глобальных климатических параметров, а именно значений энергий, исходящего от Земли, в диапазонах солнечного спектра, собственного теплового излучения Земли и окна прозрачности атмосферы, а также дистанционного зондирования Земли с поверхности

Луны (ЗЗЛ), является видимая поверхность Луны. Твердая поверхность Луны и медленное незначительное ее колебание при движении вокруг Земли делают поверхность Луны идеальной стабильной платформой в космосе для установки оптических телескопов для проведения *астрономических* наблюдений, в том числе и Земли, особенно в лунное ночное время. При этом установка оптических телескопов на стабильной платформе – твердой поверхности Луны обладает и рядом других уникальных преимуществ по сравнению с их установками на бортах орбитальных КА. КА присуще наличие механических колебаний и дрожаний изображения, необходимость регулярной коррекции своих орбит, выполнения точного слежения за Землей и термостабилизации НА в период рабочего режима КА, а также относительно короткий срок службы и невозможность получения достаточно длительных однородных рядов измерений.



Зеркало 1 асферическое Ø300.2/157.4

Зеркало 3 асферическое Ø147.8/36.0

Зеркало 2 асферическое Ø141.2/60.2

Пластина кварцевая $d=2\text{мм}$ Ø29.8

Изображение Ø28.4

Рис. 1. Предварительная оптическая система COT-300.

Объектив 3-х зеркальный: $f' = 750$, $D:f' = 1:2.5$, $2\omega = 2.167^\circ$.

Относительное отверстие: 1:2.5, экранирование: 27.53%, виньетирование по полю: 0.0%.

Для надежного измерения и исследования распределения энергии излучения по поверхности Земли разрабатывается компактный неосесимметричный трехзеркальный специальный оптический телескоп с диаметром главного зеркала 300 мм (COT-300) и рабочим полем зрения диаметром $\approx 130'$ (рис. 1). COT-300 снабжен сменным матовым стеклом, устанавливаемым на его входном зрачке во время проведения ежемесячного контроля стабильности чувствительности матричного приемника излучения. Согласно

проведенным оптическим расчетам качество формируемого такой оптической системой СОТ-300 изображения полного диска Земли на плоской поверхности – практически дифракционное с нулевым виньетированием по всему полю зрения. В фокальной плоскости СОТ-300 устанавливается регистрирующая энергию излучения высокоразрешающая (~2048x2048пикс) микроболометрическая матрица с динамическим диапазоном 4 порядка, чувствительные элементы которой покрыты золотой чернью. Матрица измеряет распределение энергетического потока излучения, исходящего от Земли, как локально, в любом заданном регионе, так и по всему изображению диска Земли последовательно во всем рабочем спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 0.2...100$ мкм и в его 12 отдельных заданных широких и узких полосах, поочередно пропускающих поступающее излучение в заданных интервалах спектра. В десяти узких полосах диапазона $\Delta\lambda = 0.2...3$ мкм последовательно можно получать снимки всей видимой поверхности Земли с пространственным разрешением 6.5 км на пиксель и собрать весьма ценные данные об атмосфере и поверхности нашей планеты. Слежение за Землей СОТ-300 с поверхности Луны может осуществляться ступенчато интервалом через каждые 6-10 час по заданным программам, поскольку земной диск висит в небе Луны почти неподвижно (рис. 2), а фокусное расстояние СОТ-300 выбрано так, чтобы изображение Земли было несколько меньше размера площадки чувствительных элементов матрицы. Однако проведение комплекса измерений только в идеальных условиях лунного ночного времени непрерывно в течение более 90% времени лунных суток возможно только с помощью системы двух одинаковых СОТ-300.

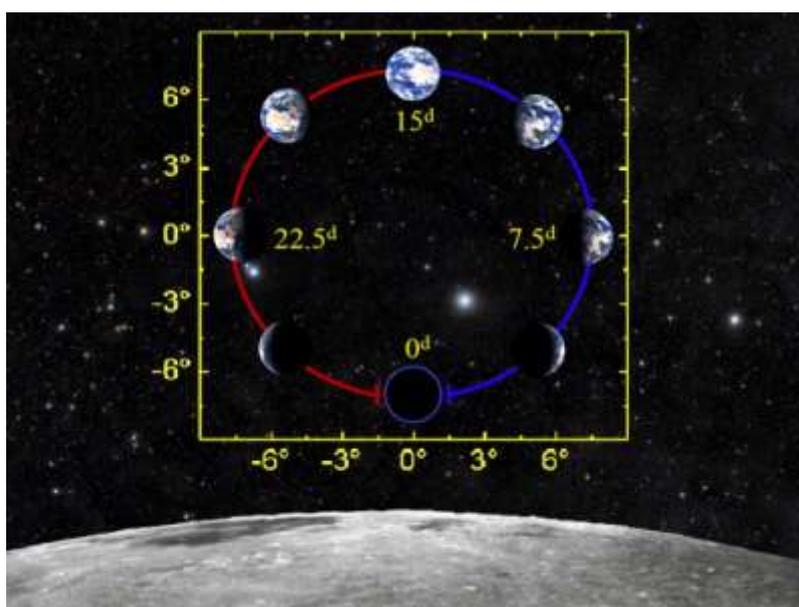


Рис. 2. Земной диск висит в небе Луны почти неподвижно.

Телескопы СОТ-300 устанавливаются на высоте более 1000 мм над ровной площадкой видимой поверхности Луны вдоль ее узкой (в несколько градусов) по широте экваториальной зоны на противоположных краях Луны, удаленных от ее видимого центра на $\pm(80.9^\circ \pm 0.1^\circ)$. При таком размещении СОТ-300 на лунной поверхности Земля всегда будет находиться в поле их зрения, а лучи, исходящие от нее, падают на данные лунные поверхности почти по касательной – угол наклона оптической оси телескопов к лунной поверхности составит менее 20° , а зеркал – более 70° . В лунной обсерватории комплексные измерения глобальных климатических параметров Земли проводятся последовательно системой двух СОТ-300, функционирующей как единый телескоп, по одной и той же научной программе в течение $\sim 94\%$ лунных суток непрерывно только в лунное ночное время в местах их установки (рис. 3).



Рис. 3. Лунная обсерватория – система двух одинаковых СОТ-300 для измерения комплекса глобальных климатических параметров Земли с поверхности Луны в лунное ночное время.

Комплексные измерения распределения интегрального энергетического потока излучения по всему диску Земли осуществляется во всем рабочем спектральном диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 0.2 \dots 100$ мкм и в заданных его отдельных широких и узких интервалах ультрафиолетового, видимого и ближнего ИК диапазонов с помощью создаваемого на базе каждого СОТ-300 мультисканального спектроболметра. Первым каналом регистрируется полная энергия излучения Земли в диапазоне

$\Delta\lambda = 0.2 \dots 100$ мкм, а во втором канале – энергии отраженного и рассеянного Землей солнечного излучения во все направления в диапазоне $\Delta\lambda = 0.2 \dots 4$ мкм. Поток энергии собственного теплового излучения в диапазоне $\Delta\lambda = 4 \dots 100$ мкм будет определен путем вычитания измеренной энергии излучения в коротковолновом диапазоне (второй канал) от измеренной энергии полного излучения Земли (первый канал). Третий канал с фильтром, пропускающим излучение в диапазоне $\Delta\lambda = 8 \dots 13$ мкм, регистрирует излучаемую энергию в пределах основного окна прозрачности атмосферы. Это позволит регистрировать и контролировать временного изменения пропускания атмосферой теплового излучения поверхности Земли в космос и лучше понять относительный вклад вариации содержания парниковых газов в атмосфере в климатические изменения. Для локального и глобального ЗЗЛ в фокальной плоскости СОТ-300 устанавливаются последовательно вводимые 10 интерференционных фильтров с различными узкими полосами пропускания в диапазоне $\Delta\lambda = 0.2 \dots 3$ мкм. Получаемые в течение суток в этих десяти дополнительных каналах – спектральных интервалах изображения освещенной и неосвещенной (в ИК диапазоне) Солнцем частей Земли позволят осуществить мониторинг состояния земной поверхности, облачности, растительности, криосферы, концентрации аэрозолей и озона всего земного шара с пространственным разрешением 6.5 км.

Система СОТ-300 работает со следующим циклом наблюдений Земли, начинающимся после наступления каждого полнолуния. Первый восточный СОТ-300, установленный на расстоянии $9.1^\circ \pm 0.1^\circ$ от восточного края экваториальной зоны Луны, начинает наблюдение Земли только после захода Солнца за лунный горизонт в месте его установки и остывания до рабочей температуры через ~ 24 часов после наступления полнолуния. Второй западный СОТ-300, установленный также на расстоянии $9.1^\circ \pm 0.1^\circ$, но от западного края экваториальной зоны Луны, подключается одновременно с восточным СОТ-300 к наблюдениям Земли только после захода Солнца за лунный горизонт в месте его установки и остывания до рабочей температуры за ~ 12 часов до наступления новолуния. С этого времени в течение ~ 12 часов до наступления новолуния и ~ 18 часов после наступления новолуния оба СОТ-300 как восточный, так и западный будут вести одновременные параллельные наблюдения Земли по одной и той же научной программе. Эти наблюдения используются также и для ежемесячной калибровки телескопов СОТ-300 между собой. После восхода Солнца над горизонтом в месте установки восточного СОТ-300, вследствие его нагрева солнечным излучением и высокого температурного фона вокруг него, он становится неработоспособным, а продолжающиеся непрерывные наблюдения Земли только западным СОТ-300

прекратится за ~18 часов до наступления полнолуния. В течение ~18 часов до наступления и ~24 часов после наступления полнолуния и остывания восточного СОТ-300 до рабочей температуры оба телескопа становятся неработоспособными (в период, когда видна только ночная и около ночная сторона Земли) из-за их нагрева солнечным излучением, а также высокого температурного фона вокруг них. Такой ~6% перерыв в наблюдениях Земли только в течение ~42 часов за весь промежуток времени между двумя последовательными полнолуниями – за лунные сутки, когда отраженное и рассеянное планетой солнечное излучение в период видимости ночной и около ночной стороны Земли имеет весьма незначимую долю энергии, не внесет значимого влияния в точности определения значений ее альбедо Бонда. После захода Солнца за лунный горизонт в месте установки восточного СОТ-300 и его остывания до рабочей температуры через ~24 часов после наступления очередного полнолуния начинается новый цикл таких наблюдений Земли системой двух СОТ-300. Только такая лунная астрономическая обсерватория, состоящая из системы двух одинаковых СОТ-300 на указанных противоположных краях видимой поверхности Луны, работающих последовательно только в лунное ночное время в местах их установки как единый СОТ-300, позволит получать комплекс наиболее точных глобальных климатических параметров, надежно измерять расходуемой планетой поступающей среднегодовой энергии солнечного излучения на внешней границе ее атмосферы и определять относительный вклад вариации концентрации парниковых газов в атмосфере в климатические изменения.

Получаемые в течение не менее 11-летнего цикла Солнца прецизионные однородные ряды данных о вариациях среднегодовых значений наиболее эффективных глобальных параметров, характеризующих и определяющих климат, а также состояний земной поверхности, облачности, растительности, криосферы, содержания аэрозолей и озона всего земного шара позволят надежно определять долговременные вариации поглощаемой и расходуемой планетой поступающую на внешнюю границу атмосферы среднегодовую энергию солнечного излучения и величины отклонения среднегодового энергетического баланса Земли от равновесного состояния. Это кардинальным образом расширит наши представления о закономерностях формирования и изменения глобального климата. Лунная обсерватория обеспечит важнейшими недостающими крайне необходимыми надежными глобальными климатическими данными, которые не могут быть получены никакими другими космическими методами их прямых измерений, и создание новой важнейшей базы данных величины отклонения среднегодового энергетического баланса планеты от равновесного состояния.

Создание такой оптической обсерватории на поверхности Луны крайне необходимо именно сейчас в связи с наблюдаемым долговременным отрицательным отклонением среднегодового энергетического баланса Земли от равновесного состояния вследствие активного уменьшения и грядущего наступления глубокого минимума солнечной постоянной квази-двухвекового цикла. Непрерывные измерения комплекса глобальных климатических параметров, особенно величины и направления отклонения среднегодового энергетического баланса Земли от равновесного состояния и накапливаемого ежегодно избытка или дефицита энергии в течение не менее 11-летнего цикла Солнца позволяет определять их зависимость от циклических вариаций солнечной постоянной. Полученная зависимость является надёжным индикатором определения соответствующих изменений величины отклонения среднегодового энергетического баланса Земли от равновесного состояния в течение всего периода высокоточных измерений солнечной постоянной КА с 1978 г. Их сопоставление с соответствующими изменениями климата за этот же период (с 1978 г.) позволит определять физические механизмы формирования, физические причины и закономерности изменений климата нашей планеты, и разработать надежные методы его прогнозирования, что является важнейшей проблемой современной цивилизации.

Получен патент РФ на полезную модель № 155044 "Оптический телескоп" с системой защиты от лунной пыли (автор Абдусаматов Х.И.). Защита оптических элементов телескопа в ночное время от опускающихся вертикально частиц лунной пыли обеспечивается подвижным козырьком, снабженным механизмом возвратно-поступательного перемещения, размещаемым параллельно оптической оси над входным зрачком. Величина возвратно-поступательного перемещения козырька телескопа $L = (D + a + b) \cdot \operatorname{tg} \alpha$, где D – диаметр входного зрачка оптического телескопа, a – расстояние от внешней верхней поверхности козырька до верхнего края входного зрачка телескопа, b – расстояние от нижнего края входного зрачка телескопа до нижней наружной поверхности переднего торца корпуса его трубы, $\alpha \leq 75^\circ$ – угол наклона оптической оси телескопа к поверхности Луны. При этом длина козырька $L_V = L_{\max}$, а его ширина $H_V > D$. В лунной обсерватории при наблюдениях Земли угол наклона оптической оси телескопов к поверхности всегда составит менее 20° ($\alpha < 20^\circ$, $\operatorname{tg} 20^\circ = 0.36$). Следовательно, величина перемещения козырька телескопа при наблюдениях Земли L_E существенно уменьшится, и будет иметь только два положения: исходное задвинутое в пределы корпуса трубы нерабочее положение козырька и одно выдвинутое от входного зрачка телескопа рабочее положение козырька, определяемое как $L_E = 0.36 \cdot (D + a + b)$, что значительно упростит его конструкцию и управление.

При этом наклон зеркал всегда под углом более 70° к поверхности дополнительно защитит их от осаждения частицами лунной пыли. При транспортировке козырек задвигается в пределы корпуса трубы, доведя продольные габариты телескопа до безкозырькового состояния.

Руководитель темы: Абдусаматов Х.И., зав. СКИС ГАО РАН, abduss@gao.spb.ru

Состав группы: Ханков С.И., в.н.с., д.т.н., ГАО РАН; Лаповок Е.В., с.н.с., к.т.н., ГАО РАН; Гарбуль А.А. – внештатный сотрудник.

Публикации:

1. *Абдусаматов Х.И.* Патент РФ на полезную модель № 155044 «Оптический телескоп» с системой защиты от лунной пыли // Бюллетень изобретений. 2015, № 26. С. 1-6.
2. *Абдусаматов Х.И.* Лунная обсерватория для исследований отклонения энергетического баланса Земли от равновесного состояния и причин климатических изменений // Исследование Земли из космоса. 2016, № 3. <http://jizk.ru/>
3. *Абдусаматов Х.И.* Оптический телескоп с системой защиты от лунной пыли // Тезисы докладов XIX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2015». Санкт-Петербург. 2015. С. 3.
4. *Abdussamatov H.* Current long-term negative average annual energy balance of the Earth leads to the new Little Ice Age // Thermal Science. 2015. Vol. 19. Suppl. 2, pp. S259-S268.
5. *Абдусаматов Х.И.* Энергетическая мощность 11-летнего солнечного цикла и ее зависимость от продолжительности цикла // Кинематика и физика небесных тел. 2015. Т. 31, № 4. С. 54-60.
6. «Лунная обсерватория» http://www.gao.spb.ru/russian/project/lunar_observatory.pdf 2015.