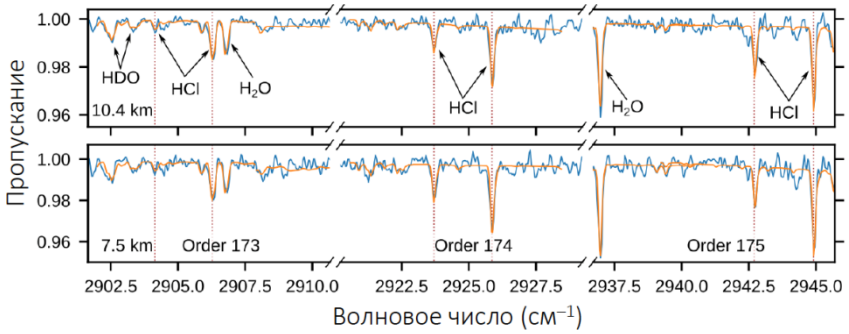
ВАЖНЕЙШИЕ (УНИКАЛЬНЫЕ) РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИКИ РАН 2021г.

Открытие и исследование хлороводорода в атмосфере Марса

Кораблев О.И., Трохимовский А, Федорова А.А., Беляев Д., Лугинин М., Патракеев А., Игнатьев Н., Шакун А., Григорьев А.,
Институт космических исследований РАН в кооперации с научными организациями Великобритании, Бельгии, Франции, США, Украины, Испании, Италии.

Обнаружен новый газ в атмосфере Марса. В спектрах российского спектрометра ACS на космическом аппарате ExoMars Trace Gas Orbiter уверенно отождествлены 12 линий хлороводорода (HCl). Хлороводород в количестве 1–4 ppbv был зарегистрирован в атмосфере во время глобальной пылевой бури 34 марсианского года (2018), и постепенно исчез после ее окончания. Газ появился и в следующий, 35 марсианский год – хотя глобальной пылевой бури в этот год не было. Вне пылевого сезона установлены верхние пределы ≤0,1 ppbv, в согласии с прежними наблюдениями с земли и космической обсерватории Hershel. Вероятно, HCl образуется ежегодно во время пылевого сезона (лето в южном полушарии) в результате химических реакций с участием пыли и водяного пара. Не исключены и источники на поверхности. Исследован изотопный состав хлора $H^{37}Cl/H^{35}Cl$. В отличие от других газов, обогащенных тяжелыми изотопами вследствие потери Марсом атмосферы, изотопное отношение в хлороводороде близко к земному. Это указывает, что хлор в его составе не участвует в длительных процессах обмена между атмосферой и поверхностью.



Участки спектров атмосферы Марса измеренные прибором ACS MIR, демонстрирующие шесть линий поглощения открытого хлороводорода ($H^{35}Cl$ и $H^{37}Cl$).

Korablev, O., Olsen, K.S., Trokhimovskiy, A., Lefevre, F., Montmessin, F., Fedorova, A.A. Toplis, M.J., Alday, J., Belyaev, D.A., Patrakeev, A., Ignatiev, N.I., Shakun, A.V., Grigoriev, A.V., …, Vandaele, A.C. Transient HCl in the atmosphere of Mars. *Science Adv.* 7, eabe4386 (2021) doi:10.1126/sciadv.abe4386

Olsen, K.S., Trokhimovskiy, A., Montabone, L., Fedorova, A.A., Luginin, M., Lefevre, F., Korablev, O.I., Montmessin, F., …, Belyaev, D.A., Patrakeev, A. Shakun, A. Seasonal reappearance of HCl in the atmosphere of Mars during the Mars year 35 dusty season. *Astron. Astrophys.* 647, A161 (2021) doi:10.1051/0004-6361/202140329

Aoki, S., Daerden, F., Viscardy, S., …, Trokhimovskiy, A., Fedorova, A.A., Korablev, O., Vandaele, A.C. Annual appearance of hydrogen chloride on Mars and a striking similarity with the water vapor vertical distribution observed by TGO/NOMAD. *Geophys. Res. Lett.* 48, 2021GL092506 (2021) doi: 10.1029/2021GL092506

Trokhimovskiy, A., Fedorova, A.A., Olsen, K.S., Alday, J., Korablev, O., Montmessin, F., Lefevre, F., Patrakeev, A., Belyaev, D., Shakun, A.V. Isotopes of chlorine from HCl in the Martian atmosphere *Astron. Astrophys.* 651, A32 (2021) doi:10.1051/0004-6361/202140916

-Результат получен при поддержке темы «Планета» и гранта РНФ-ANR 20-42-09035
-номер научного направления ПФНИ: 1.3.7.5 Планеты и планетные системы.

Строение экзопланетных систем. Коррекция наблюдательной селекции

Статистические распределения экзопланет, получаемые и наземными, и спутниковыми телескопами, сильно искажены наблюдательной селекцией. Массивные планеты, находящиеся на близких к звезде орбитах, обнаруживать несравненно легче, чем планеты малых масс и планеты с большими орбитальными периодами. Легкие планеты с орбитальными периодами около года и больше, попадающие в обитаемую зону солнцеподобных звезд, вообще не обнаружимы современными средствами. Для учета этого фактора предложен и исследован метод коррекции наблюдательной селекции, названный «окном видимости» – матрица на плоскости «Орбитальный период – проективная масса», элементы которой равны вероятности обнаружить планету в каждом выбранном интервале периодов и масс. Скорректированные при помощи «окна видимости» распределения экзопланет по массам *m* хорошо описываются кусочным степенным законом, показанным на рисунке 1. Видно насколько наблюдательная селекция может занизить реальное число маломассивных экзопланет (синяя и малиновые линии на рисунке). Важно, что результат находится в согласии с известной теорией популяционного синтеза Мордасини (Mordasini, 2018, Emsenhuber et al., 2021) и демонстрирует ряд новых особенностей. Показано, что распределения планет, открытых разными методами, в частности, транзитным и методом лучевых скоростей, хорошо согласуются друг с другом.

Скорректированные распределения по орбитальным периодам планет разных массовых интервалов свидетельствуют об усредненном строении планетных систем, где более массивные планеты находятся преимущественно на дальних орбитах, так что строение Солнечной системы, скорее всего, является более- менее типичным в нашей Галактике.

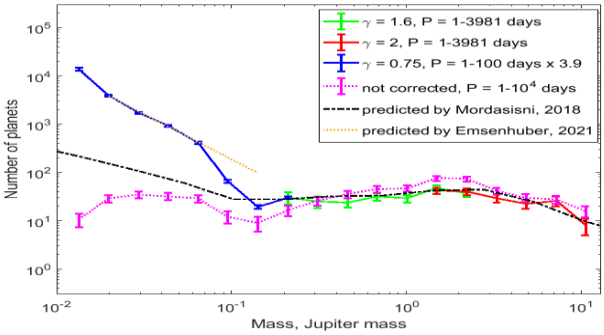


Рисунок: скорректированное распределение RV экзопланет (с массами 0.011-13 масс Юпитера). Для экзопланет малых масс (0.011-0.21 масс Юпитера) $dN/dm \propto m^{-3}$, для экзопланет средних масс (0.21-2 масс Юпитера) $dN/dm \propto m^{-1}$, и для экзопланет больших масс (2-13 масс Юпитера) $dN/dm \propto m^{-2}$. Точечная малиновая линия – нескорректированное распределение. Черной штрих-пунктирной линией показано распределение, предсказанное в (Mordasini, 2018), оранжевой точечной линией – распределение, предсказанное в (Emsenhuber et al., 2021).

Работа поддерживается грантом Министерства высшего образования и науки РФ 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039) «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет». ПФНИ 1.3.7.5 Планеты и планетные системы

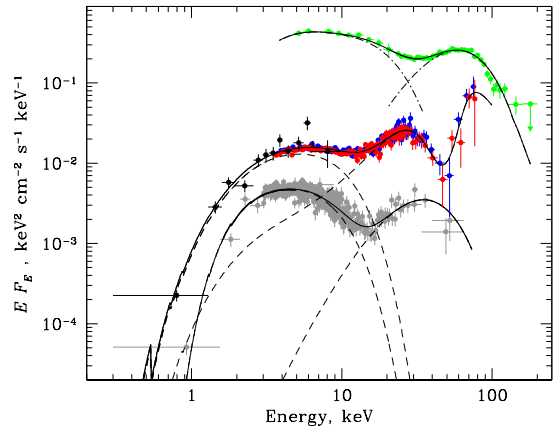
1. Yakovlev, O. Y., Ananyeva, V. I., Ivanova, A. E., & Tavrov, A. V. (2021). Comparison of the mass distributions of short-period exoplanets detected by transit and RV methods. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, *509*(1), L17-L20 https://doi.org/10.1093/mnrasl/slab115

2. Ivanova, A. E., Yakovlev, O. Y., Ananyeva, V. I., Shashkova, I. A., Tavrov, A. V., & Bertaux, J. L. (2021). The ‘‘Detectability Window’’Method to Take into Account Observational Selection in the Statistics of Exoplanets Discovered through Radial Velocity Measurements. *Astronomy Letters*, *47*(1), 43-49. https://doi.org/10.1134/S1063773721010059

Открытие циклотронного излучения от аккрецирующих сильно-замагниченных нейтронных звезд

Цыганков С.С., Муштуков А.А., Лутовинов А.А., Поутанен Ю., Дорошенко В., Сулейманов В.Ф., Мольков С.В.
Институт космических исследований РАН

Учеными из ИКИ РАН и их зарубежными коллегами, благодаря серии специально спланированных наблюдений на международных космических обсерваториях, впервые была обнаружена эмиссионная компонента в спектрах аккрецирующих нейтронных звезд в жестком рентгеновском диапазоне, связанная с циклотронным излучением в атмосфере нейтронной звезды и теоретически предсказанная десятилетия назад. Коллективом авторов также предложена и наблюдательно верифицирована модель, объясняющая возникновение этой компоненты излучения в результате столкновительного возбуждения электронов на верхние уровни Ландау, и их дальнейшей рекомбинацией и комптонизацией фотонов перегретым электронным газом в тонком верхнем слое атмосферы. Открытие российских ученых позволяет получить уникальную информацию о свойствах взаимодействия вещества с излучением в сверхсильных магнитных полях (10^{12}–10^{14} Гс), которые недоступны в земных лабораториях.



Спектры нескольких рентгеновских пульсаров при низких темпах аккреции. Хорошо видны отдельные компоненты излучения с максимумами около 5 кэВ (тепловое излучение) и около 50 кэВ (циклотронное излучение).

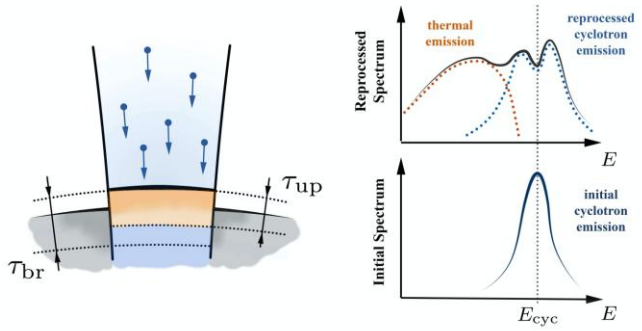


Схема предложенной теоретической модели. Циклотронное излучение, образующееся в результате столкновительного возбуждения электронов, частично поглощается в атмосфере и образует высокоэнергетический компонент спектра, в то время как поглощенная энергия высвобождается в виде теплового излучения (низкоэнергетическая часть спектра).

[1] **Mushtukov Alexander A., Suleimanov Valery F., Tsygankov Sergey S.,** Portegies Zwart Simon "*Spectrum formation in X-ray pulsars at very low mass accretion rate: Monte Carlo approach*", MNRAS (2021) 503, 5193–5203 (IF=5.356)

[2] **Lutovinov A., Tsygankov S., Molkov S., Doroshenko V., Mushtukov A.,** Arefiev V., Lapshov I., Tkachenko A., Pavlinsky M. "*SRG/ART-XC and NuSTAR Observations of the X-Ray pulsar GRO J1008-57 in the Lowest Luminosity State*", ApJ (2021) 912, 1, id17 (IF=5.356)

[3] **Tsygankov Sergey S., Molkov Sergey V., Doroshenko Victor, Mushtukov Alexander A.,** Mereminskiy Ilya A., Semena Andrei N., Thalhammer Philipp, Wilms Joern, **Lutovinov Alexander A.** "*SRG/ART-XC, Swift, NICER and NuSTAR study of different states of the transient X-ray pulsar MAXI J0903-531*", принята к печати в A&A (2021) (IF=5.636)

Номер ПФНИ: 1.3.7.3 Физика звезд и компактных объектов.

Открытие далеких квазаров и событий приливного разрушения телескопом СРГ/eROSITA

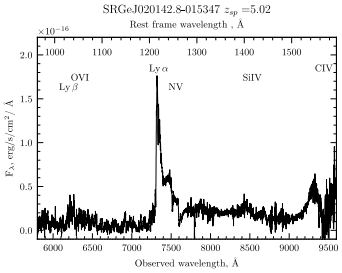
Р.А.Сюняев, М.Р.Гильфанов, П.С.Медведев, А.В.Мещеряков, С.Ю.Сазонов, Г.А.Хорунжев

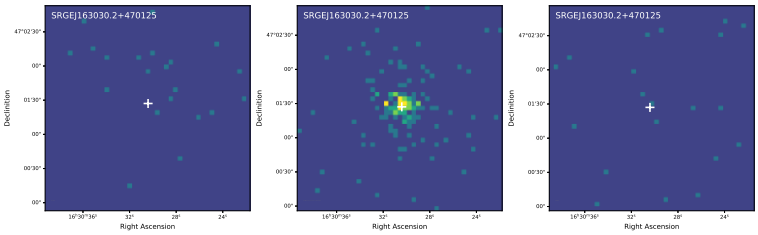
Гранты РНФ 19-12-00369, 19-12-00396, 21-12-00343

Направление ПФНИ: 1.3.7 (Астрономия и исследования космического пространства)

Обсерватория СРГ успешно работает на орбите вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля-Солнце. В середине декабря 2021 г. завершается четвертый из 8 запланированных обзоров всего неба в рентгеновских лучах. С помощью телескопа eROSITA ведется поиск редчайших объектов и явлений во Вселенной, таких как далекие рентгеновские квазары и события приливного разрушения звезд. Для отбора интересных объектов используется созданная в ИКИ РАН система машинного обучения $SRGz$, а для уточнения их природы проводятся наблюдения на российских и зарубежных оптических телескопах. С помощью телескопа eROSITA открыт квазар на красном смещении z=5.5 и впервые зарегистрировано рентгеновское излучение от ранее известного квазара на z=6.2. Эти объекты оказались самыми мощными в рентгене среди квазаров на z>5. Их огромная светимость говорит о том, что черные дыры с массой более миллиарда масс Солнца сформировались в ядрах галактик менее чем за миллиард лет после Большого Взрыва. С ядрами галактик связано и другое явление – разрыв звезд приливными силами сверхмассивной черной дыры. Захват гравитацией черной дыры части вещества звезды и аккреция делают ядро на несколько месяцев ярким источником рентгеновского излучения. После запуска СРГ наступила новая эпоха в исследовании этих космических катастроф: уже за первые полтора года обзора всего неба с помощью телескопа eROSITA открыто несколько десятков событий приливного разрушения, самое далекое из которых произошло в галактике на расстоянии более 5 миллиардов световых лет от нас. Выпущен первый каталог таких событий. Показано, что в среднем события приливного разрушения происходят раз в сто тысяч лет на галактику.

1. Медведев, Гильфанов, Сазонов и др. «XMM-Newton observations of the extremely X-ray luminous quasar CFHQS J142952+544717=SRGE J142952.1 + 544716 at redshift z = 6.18», MNRAS, 504, 576 (2021)
2. Хорунжев, Мещеряков, Медведев и др., «Открытие самого мощного в рентгене квазара SRGE J170245.3+130104 на красном смещении z=5.5», ПАЖ, 47, 155 (2021)
3. Сазонов, Гильфанов, Медведев, и др. «First tidal disruption events discovered by SRG/eROSITA: X-ray/optical properties and X-ray luminosity function at z < 0.6», MNRAS, 508, 3820 (2021)
4. Хорунжев, Додонов, Мещеряков и др., «Поиск далеких и ярких рентгеновских квазаров СРГ/eРОЗИТА (программа DaLeQo). Первые результаты по наблюдениям на телескопе БТА», ПАЖ, в печати (2021)
5. Бельведерский, Мещеряков, Медведев, Гильфанов, «SRG: построение модели оптического кросс-отождествления рентгеновских источников СРГ/eРОЗИТы на примере данных области Дыры Локмана», ПАЖ, в печати (2021)





Слева: Полученный на 6-метровом телескопе БТА (САО РАН) оптический спектр квазара на z=5.02, открытого в рентгене телескопом СРГ/eROSITA. Справа: Событие приливного разрушения звезды на z=0.29, открытое телескопом СРГ/eROSITA (показаны три рентгеновские изображения, полученные с интервалами в полгода).

Обнаружение фундаментального ослабления солнечного ветра в 23 и 24 солнечных циклах

Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Хохлачев А.А., Ермолаев М.Ю., Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Бородкова Н.Л., Сапунова О.В., Москалева А.В., ИКИ РАН

Прямые измерения солнечного ветра вблизи Земли на различных космических аппаратах за период 1976-2019 годов (два последних цикла солнечной активности) показали, что за исключением скорости, все его основные параметры снизились (см. Рис.). Согласно общепринятым представлениям, средние характеристики солнечного ветра (плотность, скорость, температура протонов, доля альфа-частиц, величина магнитного поля) возрастают во время максимумов солнечной активности за счет появления возмущений от солнечных вспышек и корональных дыр. В годы минимумов активности значения параметров снижаются до некоторой константы, характеризующей «базовое» состояние солнечной короны.

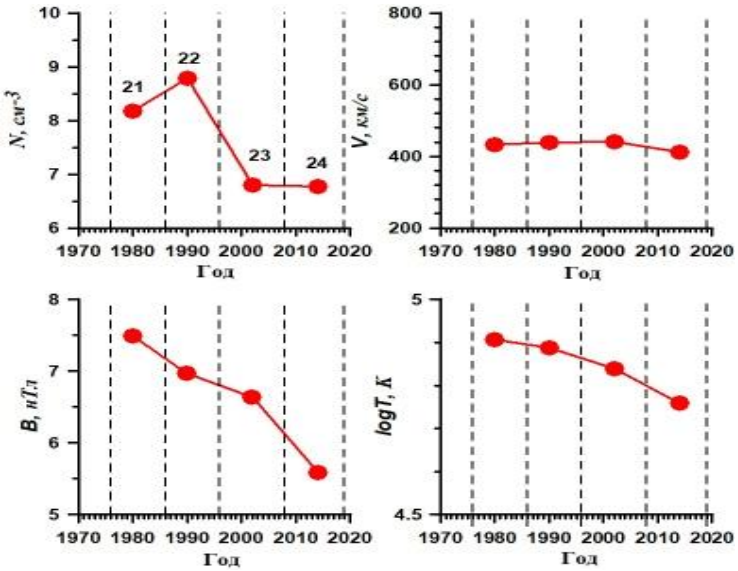


Рис. Временной ход параметров солнечного ветра (концентрация N, скорость V, температура T и магнитное поле B), усредненные за 11-летние циклы 21-24 солнечной активности

Полученные данные для 23 и 24 цикла нельзя объяснить в рамках этой модели. На основе созданного в ИКИ РАН «Каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра», который охватывает период с 1976 года по настоящее время (см. сайт http://www.iki.rssi.ru/pub/omni) была проведена привязка всех 1-часовых данных каталога (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni) к типам солнечного ветра.

В результате было получено, что интенсивность всех типов солнечного ветра, в то м числе, «фонового» невозмущенного солнечного ветра действительно существенно снизилась в период фазы минимума между 22 и 23 циклами и сохранилась низкой в течении 23 и 24 циклов. Это можно объяснить исключительно долговременными изменениями в тех областях солнечной короны, которые образуют солнечный ветер.

Публикация: Yu. I. Yermolaev, I. G. Lodkina, A. A. Khokhlachev, M. Yu. Yermolaev, M. O. Riazantseva, L. S. Rakhmanova, N. L. Borodkova, O. V. Sapunova, A. V. Moskaleva, Drop of solar wind at the end of the 20th century. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021**, 126,** 9, e2021JA029618 DOI: https://doi.org/10.1029/2021JA029618

Направление: 1.3.7.4. Солнце и околоземное космическое пространство, солнечно-земные связи

Выбор основного и резервного районов посадки космического аппарата «Луна-25»: благоприятный рельеф, продолжительность периода освещенности, повышенное содержание водорода

Митрофанов И.Г.[1], Виллиямс Ж.-П. [2], Глейсер П.[3], Дьячкова М.В.[1], Литвак М.Л.[1], Оберст Й.[4], Санин А.Б. [1] и Третьяков В.И. [1]

Показано, что полярные районы повышенной концентрации водорода в лунном реголите, обнаруженные российским нейтронным телескопом ЛЕНД на борту лунного спутника НАСА ЛРО (рисунок 1), не обязательно совпадают с областями постоянно низких температур реголита на дне постоянно затененных полярных кратеров [1]. Такие районы лунной вечной мерзлоты могут регулярно освещаться Солнцем в течение продолжительных периодов лунных суток. Этот вывод имеет принципиальное значение для выбора районов посадки российского автоматического космического аппарата «Луна-25», энергетика которого обеспечивается солнечными батареями. Намеченные [2] основной и резервный районы посадки этого аппарата имеют координаты 69.55º ю.ш., 43.54º в.д. и 68.77º ю.ш., 21.21º в.д., соответственно (рисунок 2).

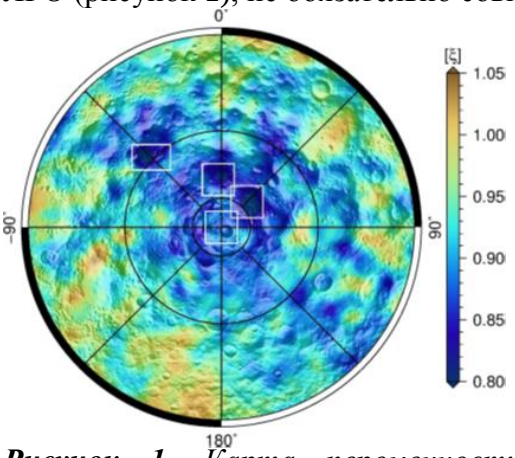


Рисунок 1. *Карта переменности нейтронного сигнала ξ, измеренного прибором ЛЕНД на Южном полюсе Луны. Прямоугольниками выделены области, для которых проводилось моделирование [1]. Синий цвет соответствует повышенной концентрации воды*

Согласно данным нейтронного картографирования Луны телескопом ЛЕНД, в реголите намеченных приполярных районов может содержаться не менее 0.5% водного льда, что делает их многообещающими для намеченных научных исследований полярного реголита непосредственно на борту первого российского лунного исследовательского аппарата.

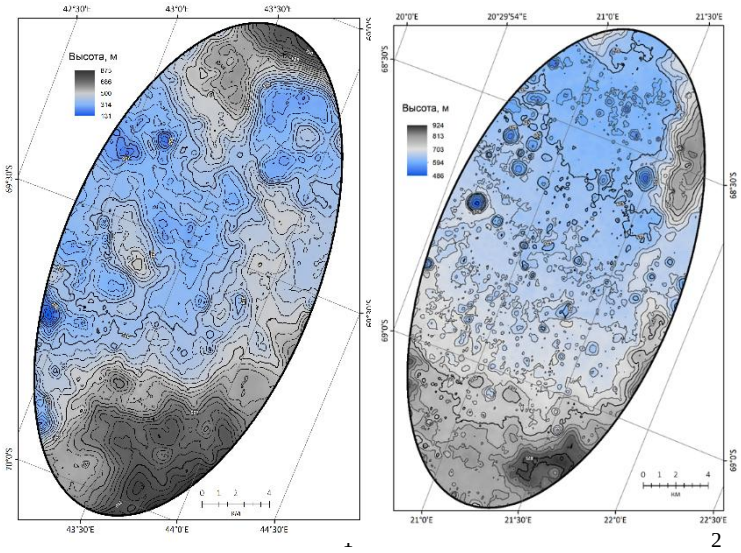


Рисунок 2. *Основной (1) и запасной (2) районы посадки космического аппарата Луна-25. Цвета соответствуют высоте места, горизонтали проведены через 25 метров*

Результат опубликован:
[1] Glaser P., Sanin A. et al., Temperatures near the lunar poles and their correlation with hydrogen predicted by LEND. Journal of Geophysical Research: Planets, September 2021, Volume126, Issue 9;
[2] Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б., Литвак М.Л., Третьяков В.И., Характеристика мест посадки космического аппарата Луна-25, Астрономический вестник, 2021, том 55, № 6, с. 522–541.

Направление программы:
1.3 Физические науки, разделы 1.3.3.6, 1.3.3.7, 1.3.7.5

Тема ОСВОЕНИЕ, № 0028-2019-0003, рег. № АААА-А18-118012290370-6

[1]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
[2]University of California Los Angles, USA
[3]Technische Universität Berlin, BRD

[4]Technische Universität Berlin, Institute of Geodesy and Geoinformation Science, BRD

Прибор звездной ориентации БОКЗ-МР сверхвысокой точности для КА ДЗЗ нового поколения «Ресурс-ПМ»

(2.3.1.1. Общая механика, навигационные системы, динамика космических тел, транспортных средств и управляемых аппаратов, механика живых систем).

В 2021 году закончена разработка прибора звездной ориентации нового поколения БОКЗ-МР, которая длилась 7 лет. Первые летные образцы приборов поставлены в РКЦ «Прогресс» для комплектования КА ДЗЗ «Ресурс-ПМ». По отношению к приборам предыдущего поколения БОКЗ-М60 (см. рис. 2), используемых на КА «Ресурс-П» в БОКЗ-МР улучшены технические характеристики в 5-10 раз практически по всем показателям: по частоте обновления информации, диапазону рабочих угловых скоростей и помехозащищенности. Достигнута главная цель разработки прибора - повышение точности угловых измерений на порядок. В результате достигнутые характеристики по точности измерения ориентации составляют 0,4 доли угловой секунды (1 СКО). В настоящий момент БОКЗ-МР при массе в 4 кг наиболее высокоточный прибор в мире.

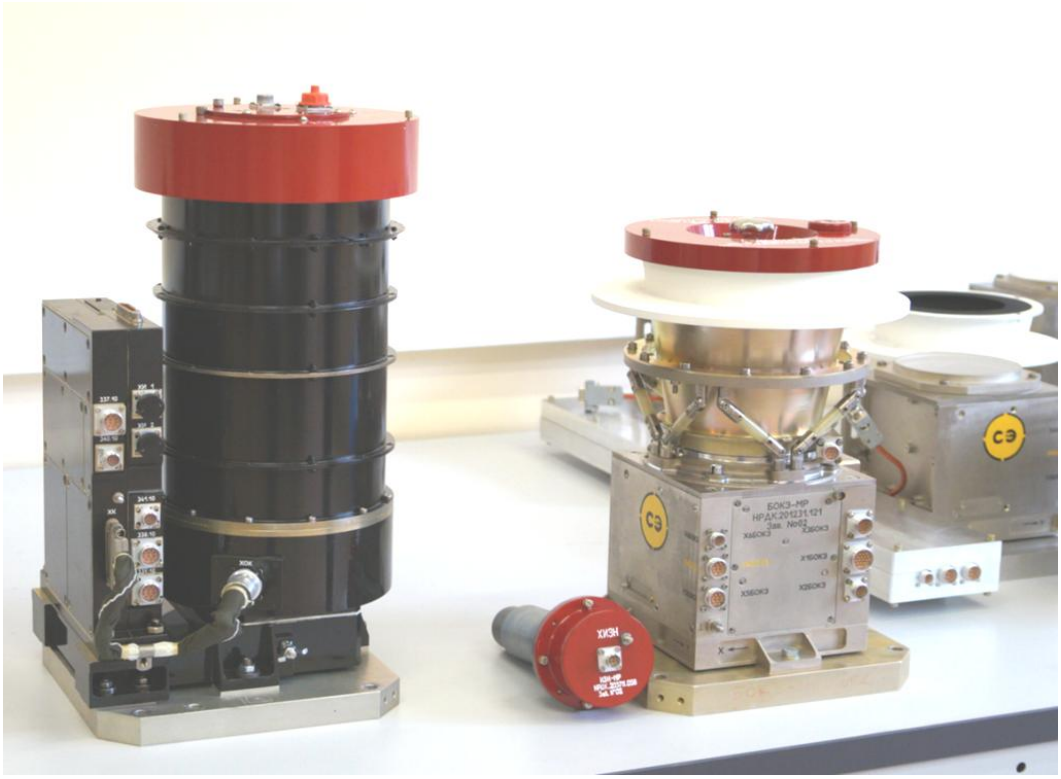


Рисунок 1. БОКЗ-М60 для КА «Ресурс-П» - 2010 год (слева), БОКЗ-МР – 2021 год (справа) для КА «Ресурс-ПМ»

Уже изготовлено и испытано и поставлено предприятиям отечественной космической промышленности 20 приборов. БОКЗ-МР на основе отечественной комплектации. Это наиболее сложный прибор созданный в направлении оптико-электронного приборостроения в последнее десятилетие Его создание безусловно является выдающимся достижением ИКИ РАН.

Коллектив отдела «Оптико-физических исследований» ИКИ РАН