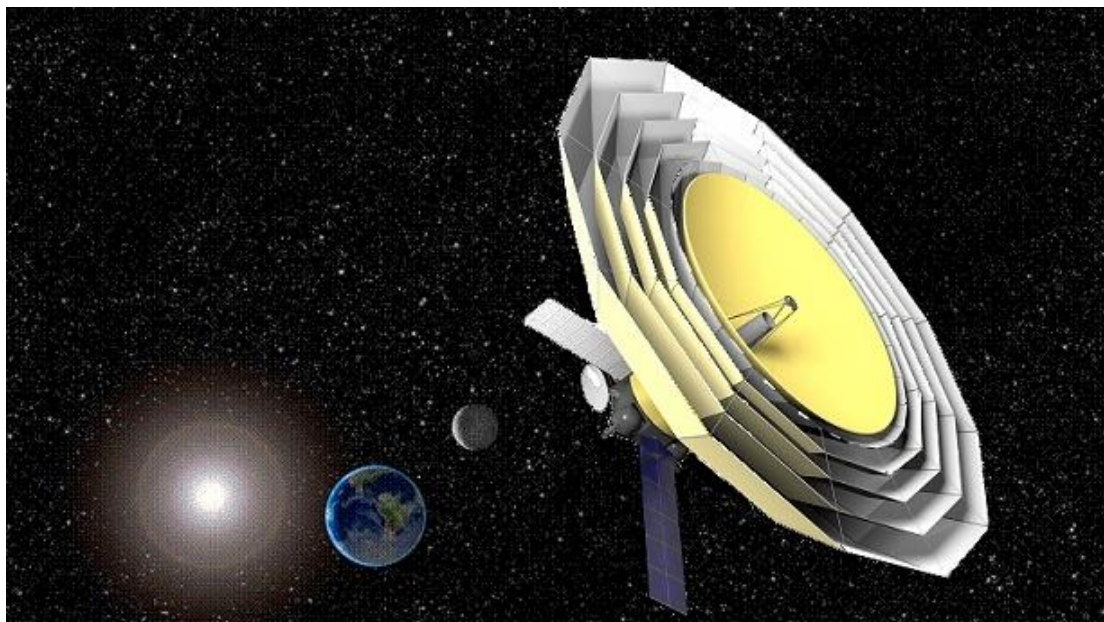


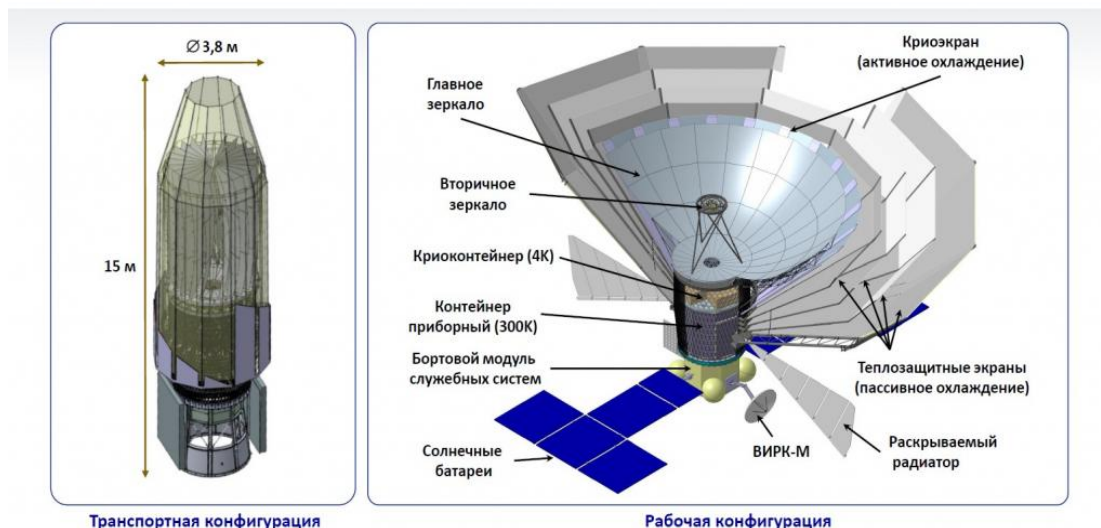
«Миллиметрон» станет самой большой охлаждаемой антенной в космосе до середины XXI века

30 ноября 2021 15:41



После задержки и отмены двух крупных зарубежных проектов, российский космический телескоп «Миллиметрон» становится единственной в мире космической обсерваторией миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн в ближайшие 10-20 лет, что сделает Россию мировым лидером в важнейшем направлении космических исследований. Детальное обсуждение хода реализации этого проекта на Совете по космосу РАН в ноябре 2021 г. позволило лучше понять грандиозность его задач и сложность проблем, которые еще предстоит решить до планируемого на 2030 г. запуска космического аппарата (КА) «Спектр-М» с этим радиотелескопом.

После задержки и отмены двух крупных зарубежных проектов, российский космический телескоп «Миллиметрон» становится единственной в мире космической обсерваторией миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн в ближайшие 10-20 лет, что сделает Россию мировым лидером в важнейшем направлении космических исследований. Детальное обсуждение хода реализации этого проекта на Совете по космосу РАН в ноябре 2021 г. позволило лучше понять грандиозность его задач и сложность проблем, которые еще предстоит решить до планируемого на 2030 г. запуска космического аппарата (КА) «Спектр-М» с этим радиотелескопом.



Сравнения неизбежны

О главных чертах уникального проекта рассказал в своем докладе Сергей Лихачев, директор Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), организации, которая выступает инициатором и координатором этого проекта.

Сергей Лихачев отметил, что космическая обсерватория «Миллиметррон» – это самый высокотехнологичный российский научный проект в космосе. Он предполагает вывод в 2030 г. в окрестность точки Лагранжа L2 системы Земля – Солнце телескопа с охлаждаемым зеркалом диаметром 10 м – самой большой охлаждаемой антенной в космосе на ближайшие десятилетия.

Для сравнения: диаметр зеркала Космического телескопа им. Джеймса Уэбба (James Webb Space Telescope, JWST) равен 6,5 м. Разумеется, прямое сопоставление здесь не совсем корректно, поскольку JWST будет работать в ближнем и среднем ИК диапазонах электромагнитного излучения (длина волны 0,6–28 мкм), более близких к видимому свету и предъявляющих более высокие требования к точности геометрии и чистоте обработки поверхности зеркала, в то время как «Миллиметррон» рассчитан на дальний ИК и субмиллиметровый диапазон (0,1–10 мм, то есть 100–10000 мкм), более близкий к радиоволнам, поэтому его главное зеркало также называют антенной, хотя чистота обработки ее поверхности и точность геометрии также должны быть очень высоки.

«Миллиметррон» и JWST скорее дополняют друг друга, чем конкурируют, однако от сравнений, конечно, здесь не уйти. Слишком много у проектов общего: работа в окрестности точки L2 в 1,5 млн км от Земли; использование раскрываемых на орбите зеркал, поскольку под обтекателями ракет их можно уместить только в сложенном виде; охлаждение до криогенных температур, управление геометрией «лепестков» зеркал с помощью высокоточных актуаторов, огромные теплоизоляционные экраны, прикрывающие телескопы от Солнца, близкая масса КА – 6,5 т у JWST и 6,6 т у «Миллиметррона», схожие габариты – около 20 м. Сопоставления здесь неизбежны, и не всегда они, кстати, в пользу JWST.

К примеру, зеркало JWST будет иметь лишь пассивное охлаждение за счет теплозащитных экранов до температуры около 45°K. Активно охлаждаться криогенными машинами до 7°K будет лишь приемник на его борту. Охлаждение зеркала «Миллиметррона» предполагается вести до температуры менее 10°K, поскольку тепловые помехи особенно критичны в дальнем ИК диапазоне. Причем это будет не только пассивное охлаждение за счет экранов, но и активное – с помощью механических криомашин со сроком эксплуатации 3 года – уникальная по сложности задача для антенны диаметром 10 м.

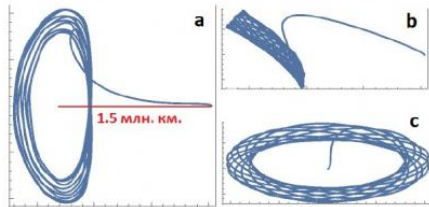
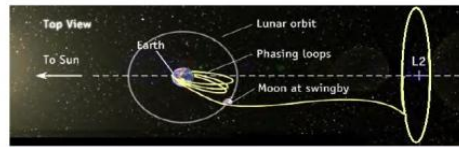
Есть и другие преимущества. К примеру, диапазон излучения, в котором будет работать «Миллиметррон», позволяет ему видеть объекты сквозь облака космической пыли, чего JWST не может. Но главное преимущество «Миллиметррона» состоит в том, что он способен работать не только как одиночный телескоп, но и в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ) с наземными обсерваториями, что позволит добиться невиданного ранее углового разрешения – порядка 10^{-8} угловых секунд.



Геометрия обсерватории

Орбита L2

- Гало орбита в окрестности точки L2 системы Солнце-Земля на расст. 1.5 млн. км
- Период орбиты – 178 days.
- Макс. проекция базы – 1 500 000 км
- *Рассматривается вариант комбинированной орбиты L2 + ВЭО*



Проекция гало орбит: (a) – плоскость XY, (b) – плоскость XZ, (c) – плоскость YZ

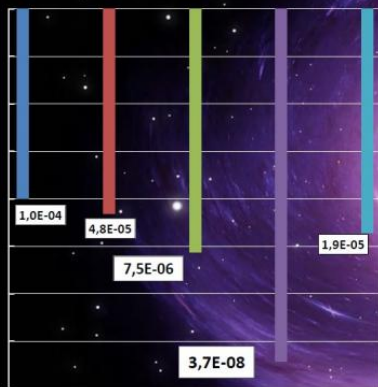
*Andrianov et al., MNRAS, 2021

Орбита/ телескопы	Макс. угл. разрешение, (μ ас)				
	43 ГГц	90 ГГц	240 ГГц	330 ГГц	690 ГГц
Круговая 40000 км	36	18	5.9	4.8	2.2
ВЭО 350000 км	4.5	2.1	0.8	0.6	0.27
L2 1500000 км	0.8	0.4	0.14	0.1	0.05
EHT	--	--	23	15	--
ngEHT	--	--	15	13	--

Предыдущий рекорд для космических интерферометров был установлен российской орбитальной обсерваторией «Радиоастрон» («Спектр-Р») – $7,5 \times 10^{-6}$ угловых секунд. «Миллиметрон» улучшит этот параметр на два порядка. Самое большое угловое разрешение, которое получено с помощью наземной сети под названием «Телескоп горизонта событий» (Event Horizon Telescope, EHT), составляет порядка 10^{-5} угловых секунд, на три порядка хуже. EHT представляет собой глобальный радиоинтерферометр, состоящий из восьми наземных обсерваторий и работающий на длине волны 1,3 мм. EHT – это именно та сеть, которая недавно прославилась тем, что опубликовала первое, хотя и очень размытое изображение тени черной дыры. С помощью «Миллиметрона», который будет работать с EHT, можно будет получать уже не тень, а прямое изображение горизонта событий релятивистских объектов. Собственно, во многом именно для этого «Миллиметрон» и создается.



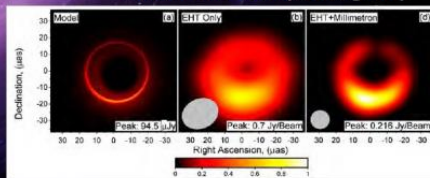
Наземно-космическая РСДБ



- VSOP
- VSOP2
- Radioastron
- Millimetron
- EHT



Global mm-VLBI (EHT, ngEHT)



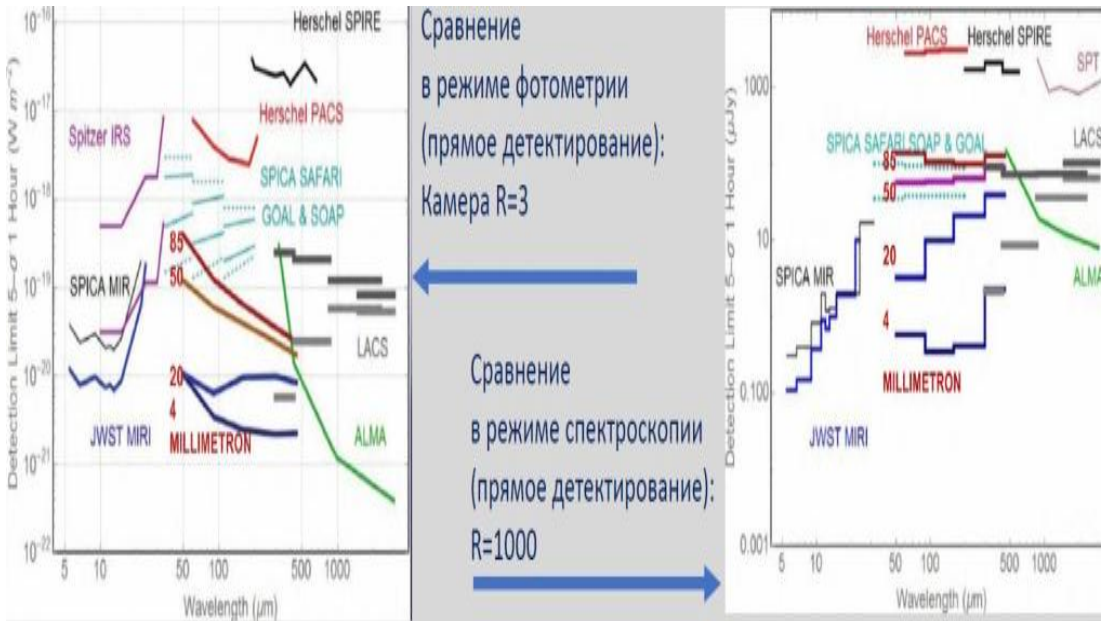
10-м телескоп, расположенный в точке Лагранжа L2 и работающий в режиме наземно-космической РСДБ, в 100 раз повышает угловое разрешение ($\approx 10^{-8}$ arcsec).
01/09/2021 • URSI GA 2021

В поисках кротовых нор

«Хочу напомнить, что сразу после создания Общей теории относительности были теоретически предсказаны три удивительнейших объекта: черные дыры, гравитация вакуума и кротовые норы, – рассказал Совету научный руководитель АКЦ ФИАН, руководитель научной программы «Миллиметрона», член-корреспондент РАН Игорь Новиков. – Это сразу же было категорически отвергнуто практически всеми физиками и астрофизиками того времени, включая самого Эйнштейна. Что мы имеем сейчас? Черные дыры – открыты, гравитационные волны – открыты, кротовые норы – не открыты. Мы считаем, что поиски этих объектов и возможность их открытия – более чем важный и амбициозный проект, ибо кротовые норы обладают удивительной топологией. Их открытие изменило бы наше представление о структуре пространства нашей Вселенной. Это было бы открытие, которое важно не только для астрофизики, но вообще для всей науки. И как я уже сказал, возможности таких открытий и исследований с помощью обсерватории «Миллиметрон» тщательным образом обсуждалось с нашими коллегами в России и за рубежом, в том числе и с

наиболее выдающимися».

Стоит заметить, что сторонником реальности существования кротовых нор был Николай Семенович Кардашёв, который выдвинул идею проекта «Миллиметрон» еще в середине 1980-х годов и под руководством которого этот проект начал реализовываться.



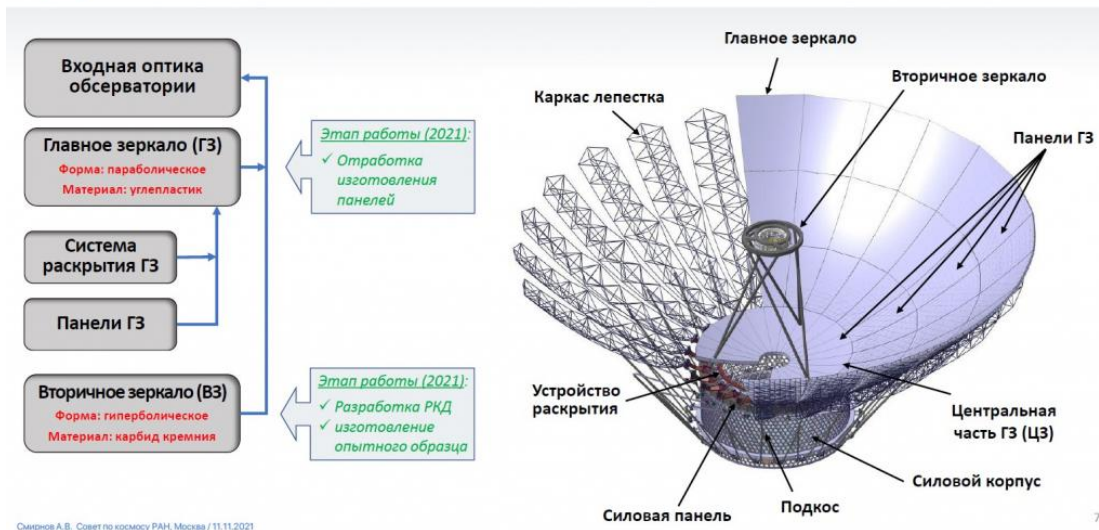
Разумеется, только лишь кротовыми норами научная программа «Миллиметрона» не ограничивается. Список задач огромен: от изучения крупномасштабной топологии Вселенной до поисков воды в Солнечной системе. При этом «Миллиметрон» благодаря 10-метровой охлаждаемой антенне и в качестве одиночного телескопа будет обладать в 100 раз большей чувствительностью, чем любой из его предшественников. И если вновь возвращаться к сравнению с «Уэббом», то, по данным доклада Сергея Лихачева (см. слайд выше), в режиме фотометрии чувствительность «Миллиметрона» будет значительно выше, чем у JWST, а в режиме спектроскопии чувствительности вполне сравнимы. «Миллиметрон» не станет очередным «царь-колоколом», который впечатляет лишь размерами. Это будет высокоэффективный научный инструмент мирового уровня.

Потенциал «Миллиметрона» не мог оставить равнодушным мировое научное сообщество. Его возможности выглядят тем более привлекательными из-за схода с дистанции двух крупных зарубежных проектов. Совместная японско-европейская космическая ИК-обсерватория SPICA была отменена в 2020 году по финансово-политическим причинам. И, по словам Сергея Лихачева, в начале ноября пришло сообщение, что проект OST был отодвинут Национальным научным фондом США за горизонт 2040 года. Таким образом, «Миллиметрон» стал единственной обсерваторией дальнего ИК-диапазона в перспективе ближайших 20-30 лет.

Не удивительно, что заинтересованность в участии в этом проекте уже подтвердили ряд стран. Подписано соглашение с Итальянским космическим агентством (ASI). В стадии подготовки соглашения с Южной Кореей (KASI), Китаем (CNSA), Францией (CNES). Готовится меморандум о взаимопонимании с Испанией.

Для подготовки научной программы исследований «Миллиметрона» в 2020 году сформировано 6 научных групп, в которые входят 85 ученых, 80 % из которых иностранцы. Будет создан независимый международный комитет по распределению наблюдательного времени.

«В рамках подготовки миссии «Миллиметрон» происходит создание и развитие технологий, ранее не представленных в РФ», – подчеркнул Сергей Лихачев.



Смирнов А.В. Совет по космосу РАН, Москва / 11.11.2021

7

Статус проекта

О том, что уже сделано в части создания обсерватории «Миллиметрон», рассказал заведующий проектно-комплексной лаборатории ФИАН, технический руководитель проекта Андрей Смирнов.

Если оставить в стороне рассмотрение наземного сегмента проекта «Миллиметрон», то КА «Спектр-М» состоит из космической платформы «Навигатор-М», за которую отвечает АО «НПО Лавочкина», и бортового комплекса научной аппаратуры, созданием которого руководит АКЦ ФИАН. Что касается «Навигатора-М», то его эскизный проект АО «НПО Лавочкина» защитило еще в 2013 году. Эта платформа уже прошла проверку в космосе. К примеру, сейчас она успешно работает в районе точки Лагранжа L2 в составе космической обсерватории «Спектр-РГ». Здесь никаких проблем не ожидается, и после выделения соответствующих средств платформа будет изготовлена.

Самая заметная в буквальном смысле этого слова часть «Миллиметрона» – его антенна. Она состоит из главного и вторичного зеркал. В главное зеркало входит центральное зеркало диаметром 3 м и 24 «лепестка», каждый из которых состоит из 3 панелей, а также система их раскрытия. Материал панелей – углепластик. Всего таких панелей будет 96, из которых 72 на «лепестках». Вторичное зеркало изготавливается из карбида кремния.



Смирнов А.В. Совет по космосу РАН, Москва / 11.11.2021

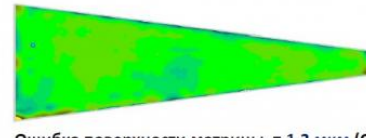
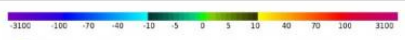
8

В 2016 г. на ведущем российском предприятии по изготовлению спутников «Информационные спутниковые системы» им. М.Ф. Решетнёва (ИСС) был изготовлен полномасштабный кинематический макет раскрытия 24 «лепестков» главного зеркала. На нем удалось получить повторяемость раскрытия 200 мкм, то есть геометрия антенны после раскрытия не отклоняется более чем на 0,2 мм. В 2021 году был изготовлен опытный образец системы раскрытия главной антенны. Следующий этап – проведение его испытаний.

Метод: репликация (копирование)



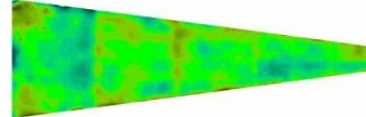
Доработанная параболическая матрица из астросилла



Ошибка поверхности матрицы = 1,2 мкм (СКО)*
 $F_{best-fit} = 2400 \text{ мм}$



Панель ЦЗ (1,3 м)



Ошибка поверхности панели = 1,9 мкм (СКО)*

*Измерено с помощью КИМ (Carl Zeiss Prismo ultra), T=20°C

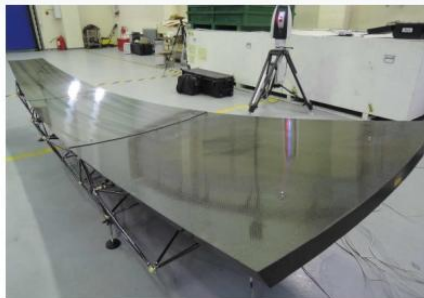
Результат (2021):

✓ изготовлен опытный образец панели ЦЗ

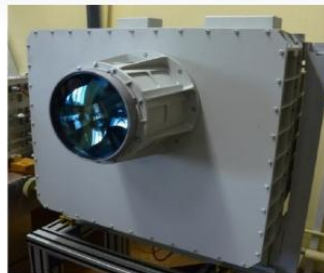
18 шестигранных «лепестков» американского JWST изготовлены из бериллия с покрытием из золота. У нас в стране бериллий нужного качества в настоящее время не производится. Поэтому было принято решение изготавливать панели главного и центрального зеркал «Миллиметрона» из углепластика с алюминиевым покрытием. При этом для создания входной оптики дифракционного качества для длины волны 100 мкм необходимо обеспечить точность поверхности зеркальной системы порядка 6 мкм среднеквадратичного отклонения (СКО). Причем панели не должны деформироваться более этой величины при криогенных температурах.

В настоящее время ведется отработка технологии изготовления панелей. На Лыткаринском заводе оптического стекла изготовлены высокоточные матрицы с СКО не более 1,5 мкм для формовки панелей. Получен комплект панелей всех типоразмеров с нужной чистотой поверхности. Ведутся их испытания при криогенных температурах. Результат положительный, и это говорит о том, что решен один из самых проблемных вопросов проекта.

Контроль положения панелей и корректировка тремя актуаторами на панелях



Кинематический макет лепестка ГЗ (1:1) для отработки алгоритмов адаптации панелей



Технологический образец (ТО) абсолютного дальномера из состава системы контроля

Результаты (2021):

- ✓ Отработан алгоритм адаптации панелей лепестка ГЗ
- ✓ определен исполнитель криогенных актуаторов
- ✓ изготовлен ТО дальномера

Точность геометрии зеркала на орбите обеспечит не только качество поверхностей панелей и точность системы раскрытия, но и система адаптации и контроля. За развертывание и юстировку зеркала JWST отвечают 132 микромотора. Каждая панель главного зеркала «Миллиметрона» будет снабжена тремя приводами точного позиционирования – актуаторами. Работа над этой системой начата в 2018 году. Изготовлен технологический образец.

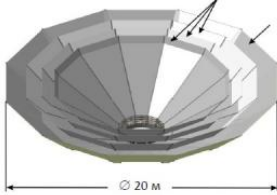
Результат (2021):

По результатам комплексного анализа конструктивного решения ТЭ и КЭ, а также учитывая результаты испытаний целесообразно перейти к альтернативному варианту исполнения (техническая справка)

ЦНИИМАШ

Текущий вариант

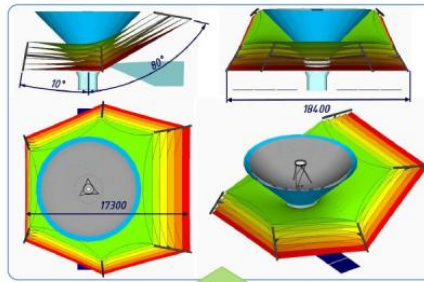
2÷4-й ТЭ – 2 слоя пленок ПМ-1ЭУ-ДА (t = 20 мкм)
1-й ТЭ – ЭВТИ (35 слоев)



Лимитная сводка масс, кг

	Техническое задание	Текущий вариант	Альтернативный вариант
Теплозащитные экраны	400	868	338
Криоэкран	100	310	142

Альтернативный вариант



- более эффективное радиационное охлаждение
- не изменяется поле обзора обсерватории
- изменения не затрагивают другие СЧ БКНА-М

Новостью стало возможное изменение конфигурации тепловых экранов системы пассивного охлаждения, которое приведет к существенному выигрышу в радиационном охлаждении обсерватории «Миллиметрон» и изменению ее облика, что в свою очередь увеличит количество его общих черт с JWST.

«По результатам комплексного анализа конструктивного решения тепловых экранов и криоэкрана, а также учитывая результаты испытаний, мы сегодня считаем целесообразным перейти к альтернативному варианту, – рассказал Андрей Смирнов. – Он обеспечивает более эффективное радиационное охлаждение, а результат виден по лимитной сводке масс. Относительно текущего варианта мы больше чем в два раза улучшаем массовые показатели. Предварительно ЦНИИМАШ одобрил этот вариант, и мы сейчас готовим техническую справку для того, чтобы внести конструктивные изменения».

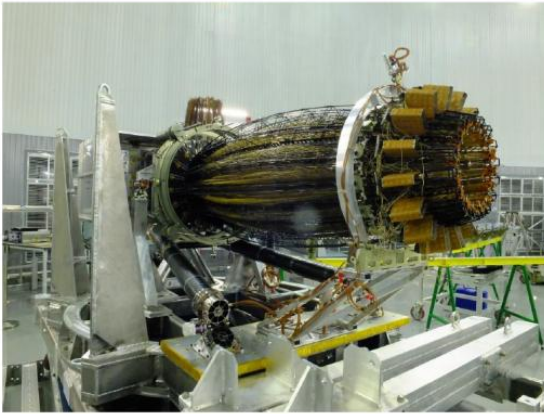


Результаты (2021):

- ✓ изготовлен опытный образец прибора для КДИ
- ✓ проведены КДИ (кроме испытаний на ресурс)

Вполне успешно идет разработка служебных систем комплекса научной аппаратуры, за которые в большинстве случаев отвечают российские компании. К примеру, предприятие «Время-Ч» в Нижнем Новгороде изготовило опытный образец бортового водородного стандарта частоты для конструкторских доводочных испытаний, которые успешно проведены. Впереди испытания на ресурс.

- Используем опыт АО «ИСС» в создании раскрываемых сетчатых антенн \varnothing 4 м для КА «Луч»
- Антенна АФС ВИРК-М с апертурой 4 м позволяет использовать в качестве НСС наземные антенны с апертурой не менее 30 м



Смирнов А.В. Совет по космосу РАН, Москва / 11.11.2021



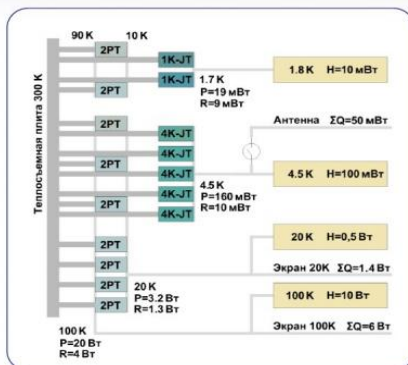
Результат (2021):
✓ изготовлен опытный образец для КДИ

29

Для передачи большого объема научных данных на Землю используется опыт ИСС по созданию раскрываемых сетчатых антенн диаметром 4 м для космических аппаратов серии «Луч». Антенна такого диаметра позволит в качестве наземных станций использовать антенны с апертурой 30 м. Изготовлен опытный образец для конструкторско-доводочных испытаний.

Увы, не все задачи по созданию столь сложного КА Россия способна решить своими силами. К сожалению, в первую очередь это относится к двум критически важным системам проекта – приемникам, которые во многом определяют научную эффективность обсерватории, и механическим криогенным машинам замкнутого цикла, которые обеспечивают активное охлаждение антенны и приемников до температур менее 10°K .

Принципиальная схема активного охлаждения



Смирнов А.В. Совет по космосу РАН, Москва / 11.11.2021



Результаты (2021):
✓ определены зарубежные поставщики криомашин
✓ Завершен предварительный этап с Air Liquide (выпущен НТО)

20

Что касается криомашин, то в России есть компании – производители криогенного оборудования. К примеру, «Сибкриотехника» делает в том числе и бортовые криомашины космического назначения. В 2017 году эта компания рассматривалась как возможный соисполнитель по системе активного охлаждения «Миллиметрона».

«Мы обсудили с ними вариант создания возможного технического задания, но те параметры, которые предложила эта организация, повлекли за собой увеличение количества бортовых криогенных машин до 17 штук, что повлекло за собой весовые и энергетические параметры, неприемлемые для космоса», – прокомментировала ситуацию заместитель директора ФИАна Лариса Лихачева.

В итоге в качестве соисполнителей проекта были выбраны французская компания Air Liquide, которая сможет поставить двухступенчатые криомашины с охлаждением до 100 и 20°K и японская компания Sumitomo, изготовитель криомашин на 4 и 1°K . Всего система активного охлаждения, по сегодняшним расчетам, будет включать 9 французских и 7 японских криомашин.

Не менее сложная «международная обстановка» сложилась и вокруг приемников. Из четырех приборов только один, предназначенный для работы в режиме радиоинтерферометра, будет создаваться российскими специалистами Института радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН им. В.А. Котельникова, но и в этом случае, видимо, потребуется помощь коллег из Южной Кореи.

«У нас есть проблемы с терагерцовыми приемниками, – пояснил ситуацию Сергей Лихачев. – Они связаны с тем, что мы очень давно не занимались по ряду причин исследованиями в данном диапазоне. Мы в ФИАНе начали деятельность по восстановлению российских терагерцовых технологий. Мы и другие группы пытаемся развивать это направление, но здесь играет роль фактор времени».

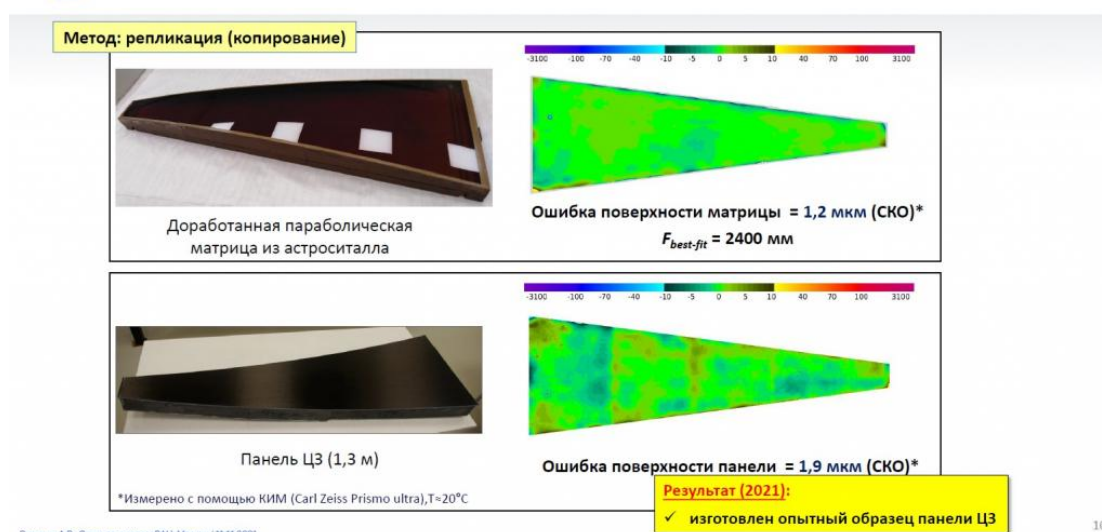
Увы, «Миллиметронтрон» роднит с JWST еще одно обстоятельство – постоянные сдвиги по срокам запуска. Когда американский проект задумывался в 1996 г., ожидалось, что супертелескоп улетит в небо в 2007 году, но в результате дата его старта сдвинулась на 14 лет и на текущий момент запланирована на 18 декабря 2021 г.

«Создание и разработка технологий требуют больших затрат времени, поэтому мы очень понимаем американских коллег с их задержками. Поэтому мы привлекаем тех соисполнителей, которые уже хорошо продвинулись в нужном направлении», – объяснил ситуацию Сергей Лихачев в ответ на вопрос о том, почему не всегда привлекаются российские разработчики.

В 2013 году планировалось, что «Миллиметронтрон» стартует в 2019 году, однако все более обостряющиеся проблемы с финансированием проекта привели к тому, что еще летом этого года вице-президент РАН, академик Юрий Балега сообщил, что запуск проекта перенесен на неопределенный срок, за горизонт 2030 года. Однако в результате нескольких совещаний по космосу под председательством Президента России Владимира Путина и с участием президента РАН Александра Сергеева было принято решение вернуть финансирование научного космоса на уровень как минимум 15 млрд руб. в год до 2025 года с сохранением этого уровня финансовой поддержки космической науки и в дальнейшем. Это позволило вновь говорить о реальности старта «Миллиметронтрона» в 2030 году.



Изготовление панелей ГЗ



Подковать блоху

И все-таки есть один фактор, при рассмотрении которого «Миллиметронтрон» и JWST совершенно несопоставимы. Это стоимость двух проектов. В 1997 году на проект телескопа следующего поколения, как тогда назывался JWST, предполагалось потратить всего 0,5 млрд долларов. В реальности же эти затраты выросли в 20 раз и ныне достигли 9,7 млрд долларов. Российские ученые о таких бюджетных щедротах, заваливающих деньгами все организационные сложности и технологические проблемы, даже не мечтают.

«Денег катастрофически не хватает, и мы не будем сравнивать стоимость «Джеймса Уэбба» с «Миллиметронтроном», поскольку «Миллиметронтрон» это по стоимости пара лепестков «Джеймса Уэбба», – признался Сергей Лихачев.

Согласно технико-экономическому обоснованию эскизного проекта, разработанного в 2012 году, стоимость «Миллиметронтрона» оценивалась в 20 млрд руб. По сегодняшнему курсу это 270 млн долларов – в 36 раз меньше затрат на JWST.

«Если посчитать все коэффициенты и дефляторы и если вычесть те средства, которые вложены сегодня, то, честно говоря, для той реализации, которая была заложена в эскизном проекте, необходимо еще 15 млрд, – пояснила сегодняшнюю ситуацию с финансированием Лариса Лихачева. – На следующий контракт на 2021–25 годы в планах заложено 3,3 млрд, хотя мы, конечно же, просили немножко больше. Но еще раз спасибо лично Александру Михайловичу (Сергееву, президенту РАН. – Прим. ред.) за поддержку и помощь, потому что было заложено еще меньше».

Подводя итог заседания Совета, президент РАН Александр Сергеев подчеркнул, что вопрос финансирования – самый главный. В связи с этим он обратил внимание руководителей проекта на необходимость в случае использования зарубежных поставщиков привлекать их в качестве международных партнеров к совместному финансированию.

В ответ на это предложение Сергей Лихачев заметил, что вся бортовая научная аппаратура для работы в режиме одиночной антенны по планам будет сделана и оплачена национальными космическими агентствами других стран.

«Мне прислали голландскую смету на гетеродинный приемник ИК диапазона MHIFI, – привел пример подобных затрат Сергей Лихачев. – Ее сумма составляет 187 млн евро. Один прибор! Если по цене перевести на наши деньги, то второй «Миллиметрон» можно сделать. Мы обсуждаем вопрос, чтобы CNES, космическое агентство Франции, и Голландия участвовали в его оплате».

Еще один яркий пример такого подхода привела Лариса Лихачева, рассказав, что, по имеющейся информации, идут переговоры «Роскосмоса» с руководством CNES о возможности оплаты Францией изготовления криогенных машин компанией Air Liquide. Речь идет о сумме порядка 2,5 млрд рублей. Франция пока относится к этому вопросу доброжелательно.

И все же основной вклад в успех проекта вносят российские технологии и умение российских специалистов обходиться теми средствами, которые есть в их распоряжении.

«Ну что говорить о «Джеймсе Уэббе» или о наших технологиях! – восклицает Лариса Лихачева. – Мы пытаемся, как всегда, подковать блоху. Слава богу, что в самом начале за неимением в России бериллия мы все-таки сделали ставку на конструкционный углепластик, потому что даже если бы нам пообещали поставить это сырье, то сейчас санкции его, без сомнения, закрыли бы. Живем так как живем. На самом деле мы сегодня уже изготавливаем панели из углепластика с точностью до 3 микрон. Эти панели, кроме того, термостабильны. Я считаю, что в этом вопросе блоха уже подкована».

Подготовил Леонид Ситник, редакция сайта РАН