

РОЛЬ ЗЕМЛИ В ИССЛЕДОВАНИИ ВСЕЛЕННОЙ

НАЗАРОВ Владимир Николаевич

Институт космических исследований РАН



DOI: 10.7868/50044394825010062

Поступила в редакцию: 05.04.2025

Принята к публикации: 05.04.2025

Еще в 1957 г., когда на орбиту был выведен первый искусственный спутник Земли, стало очевидным, что без средств наземной поддержки невозможно реализовать космические проекты.

Кстати, тогда на Первом спутнике были установлены два радиопередатчика для передачи информации на Землю в диапазонах около 20 и 40 мегагерц. Эти диапазоны были выбраны для того, чтобы радиолюбители всего мира смогли принимать сигнал с первого спутника без переделки своей аппаратуры. Такой же подход был использован уже в новом тысячелетии в проекте «Чибис-М», где в дополнение к штатным радиосистемам,

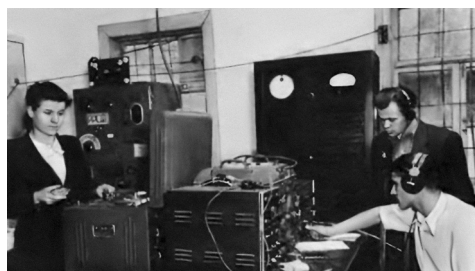


Рис. 1. Дежурные радисты Свердловского областного радиоклуба принимают сигналы первого спутника. Источник: фотохроника ТАСС

обеспечивающим передачу полного потока научной информации и управление космическим экспериментом, был также установлен передатчик в радиолюбительском диапазоне. И когда в ночь с 25 на 26 января 2012 г. космический аппарат (далее – КА) «Чибис-М» начал свой автономный полет, то одним из первых сигнал от него принял именно радиолюбитель.

Этот проект имел научно-образовательный характер, и передатчик в радиолюбительском диапазоне служил в основном его образовательной составляющей, но насколько нам, находящимся в Центре управления полетом «Чибис-М», стало легче, когда из Японии от радиолюбителя с позывным Fumio Kuge пришло сообщение «Сигнал принят».

Дело в том, что самым напряженным этапом работы, во всяком случае в эмоциональном плане, является начало автономного полета, пока ориентация КА не построена, параметры орбиты не определены с необходимой точностью, состояние бортовых систем космического аппарата и то, как они перенесли старт и полет на ракете-носителе, неизвестно.

Только позже, когда космический аппарат попал «в объятия» наземного сегмента (см. рис. 2), начинаются в не-

котором смысле рутинные операции по реализации полета и космических экспериментов.

Одна из самых первых классических информационных моделей космического проекта [1] описывает его как систему, состоящую из следующих основных элементов (см. рис. 3):

- On-board End Users, т. е. бортовых окончательных пользователей, в нашем случае – космических научных приборов, а также и других бортовых измерительных и исполнительных устройств;

- On-board Data Handling, бортовых средств обработки информации;

- On-board Data Transport, бортовых средств информационного обмена;

- Ground Data Transport, средств космической связи между наземным и космическими сегментами;

- Ground Data Handling/Networking, наземных средств обработки; и

- Ground End Users, окончательных наземных потребителей, под которыми понимается достаточно широкий круг пользователей, включая научное и техническое руководство проекта,

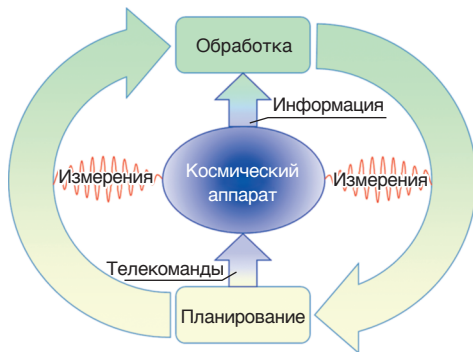


Рис. 2. Рабочий цикл наземного сегмента

экспериментаторов и других участников научного космического проекта.

Как видно из рис. 3, наземный и космический сегменты проекта представляют собой взаимосвязанную информационную систему, на сленге специалистов в области космических операций эти два сегмента обычно называются «Борт» и «Земля».

Вот об этой «Земле», или, другими словами, – о наземных сегментах научных космических проектов мы и хотели рассказать в настоящей статье.

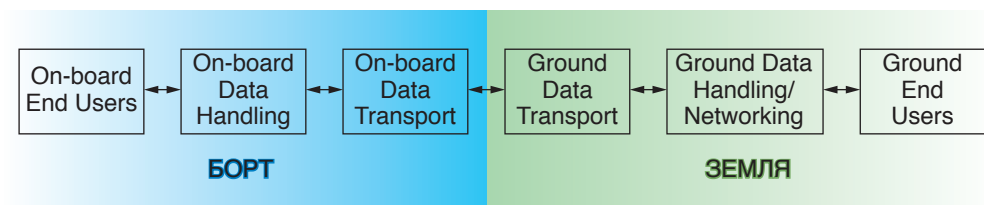


Рис. 3. Вверху: классическая информационная модель космического проекта; внизу: бортовой («Борт») и наземный («Земля») сегменты космического проекта



И ВСЕ-ТАКИ ЗЕМЛЯ – КРУГЛАЯ

«Земля», или наземный сегмент космических проектов, как и практически любая полноценная информационная система описывается с помощью классической модели [2], представленной на рис. 4.



Рис. 4. Модель «Земли» – наземного сегмента космического проекта

Основной рабочий цикл наземного сегмента космического проекта – это получение информации с КА, ее обработка и подготовка на основе результатов обработки планов работ и в конечном итоге последовательностей телекоманд управления (циклограмм). При этом осуществляются измерения навигационных параметров КА, результаты которых также учитываются при подготовке планов работ.

Описывая работу наземных сегментов на основе представленной круговой диаграммы, следует отметить, что основная работа в научном космическом проекте делается людьми и для людей.

ЛЮДИ – СОЛЬ ЗЕМЛИ

Так, специалисты, которые создают и эксплуатируют наземный сегмент (на диаграмме они описываются, может быть, и не совсем удачным, но уже

устоявшимся термином «персонал») на основе разработанных ими же процедур, используя соответствующее вычислительное оборудование, программное обеспечение и средства связи, получают данные, которые, в свою очередь, представляют собой новые знания о Вселенной для всего человечества.

Как правило, когда заходит речь о персонале, то обсуждаются аспекты образования, профессиональной подготовки, условий работы и тому подобные. Ни в коей мере не умаляя важность этих вопросов, хочу на собственном опыте отметить, что практически у всех специалистов, вовлеченных в космические операции, есть одна общая черта – это увлеченность своей работой, что и является залогом успеха в сопровождении реализации и подготовки новых проектов.

И поэтому люди являются важнейшим элементом всей «Земли». Без них получить результат будет невозможно ни при каких технических средствах.

ДАННЫЕ – ЭТО НЕ ТОЛЬКО ЦЕННЫЙ РЕЗУЛЬТАТ, НО ЕЩЕ И НЕЗАМЕНИМЫЙ ИНСТРУМЕНТ

Когда мы говорим о получении новых данных, то фактически мы говорим о получении новых знаний, поскольку именно в этом и состоит цель научного космического эксперимента (КЭ), а не в том, чтобы получить данные ради данных.

Представляется очевидным, что такие элементы наземных сегментов, как технические и вычислительные средства, программное обеспечение, процедуры и средства связи, являются инструментами, которые используют люди для получения данных. Но это не совсем так. Дело в том, что сами данные также используются в качестве инструмента для получения новых данных.

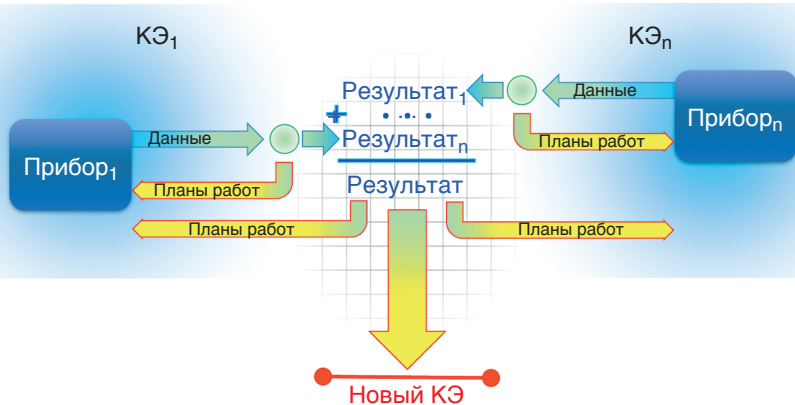


Рис. 5. Данные как инструмент

Рассмотрим этот процесс подробнее. Как уже отмечалось выше, основной цикл проведения космического эксперимента (КЭ) состоит из следующих этапов: получения результатов измерений, их обработки и анализа результатов, а также подготовки новых планов работ и передачи соответствующих программ (последовательностей телекоманд) на борт. Такие телекоманды могут, например, изменять коэффициенты усиления или сменить диапазон измерений, но могут и радикальным образом изменить режим работы прибора. Таким образом, даже в простейшем случае, когда мы рассматриваем работу только одного прибора, данные (результаты измерений) используются как инструмент для получения новых данных.

И намного более эффективным будет использование для подготовки планов проведения КЭ результатов, полученных не только в рамках непосредственно данного, но также и других КЭ. При этом могут использоваться результаты работы приборов, которые могут быть размещены на другом космическом аппарате, или реализуются в другом космическом проекте, или даже получены в ходе уже завершён-

ных миссий. В этом случае мы получим мультиплицирующий синергетический эффект.

Следует отметить, что такой подход использовался всегда, но осуществлялся он как бы в «ручном» режиме. Научный комитет проекта при формировании планов работ руководствовался не только непосредственно результатами, получаемыми в текущий момент, но и своими экспертными знаниями и оценками.

Но намного более эффективным будет использование специализированной системы, построенной на современной вычислительной базе и использующей новейшие технологии в области интеллектуальных методов и «больших данных».

Но для этого (в отличие от простейшего случая, рассмотренного выше) необходимо четко структурировать и аннотировать все данные, создать информационную среду, обеспечивающую их общее оркестрирование, а также совместную их обработку и интерпретацию, которая часто носит междисциплинарный характер.

В этом направлении сейчас работают большинство ведущих космических агентств, и российские исследователи

и специалисты также выступают одними из пионеров в данной области.

Один из примеров – создаваемый ИКИ РАН совместно с кооперацией, в которую входят Астрокосмический центр ФИАН, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Институт астрономии РАН, Московский институт геодезии и картографии, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова и др., по заданию Госкорпорации «Роскосмос», российский сегмент объединенного российско-китайского Центра данных по исследованиям Луны и дальнего космоса (ЦДЛидК) [3]. А подход к управлению космическими экспериментами на основе знаний, вкратце изложенный выше, также впервые был предложен российским коллективом авторов [4], его первая практическая реализация планируется в рамках предстоящей отечественной миссии по изучению Луны с орбиты ее спутника «Луна-26».

ДАнные НАДО НЕ ТОЛЬКО ПОЛУЧИТЬ, НО И ПЕРЕДАТЬ, А ПОТОМ ЕЩЕ И ПРИНЯТЬ

Рассуждая о том, как лучше всего использовать данные, полученные в ходе космического эксперимента, не стоит забывать о такой «немаловажной детали», что эти данные надо каким-то образом передать на Землю.

И здесь мы переходим к следующему элементу мозаики – средствам связи. Строго говоря, средства космической связи – это комплексный вопрос, поскольку здесь задействуются средства, расположенные как на Земле, так и на космическом аппарате. Но в любом случае это неотъемлемая часть наземного сегмента.

И как бы ни хотелось избежать использования каких-либо формул в данной статье, одну из них придется использовать. Но, поверьте, она того стоит – это так называемая формула Шеннона–Хартли, которая является базисом современной теории передачи информации и определяет максимально возможную скорость передачи данных¹:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (1)$$

где C – максимально возможная скорость передачи информации, B – ширина полосы пропускания, S – мощность сигнала, а N – мощность шума.

Как видно из формулы (1), скорость передачи информации определяется двумя параметрами – шириной полосы B и отношением S к N , т. е. отношением «сигнал/шум» (SNR – Signal to Noise Ratio). Как следует из формулы Шеннона–Хартли, если при передаче данных шума не будет вовсе (N стремится к нулю), то можно передавать информацию со сколь угодно большой скоростью при любой ненулевой полосе пропускания. Но поскольку такие методы передачи – удел научно-фантастических романов, а в реальной жизни нам приходится сталкиваться с целым рядом помех распространению сигнала, то для повышения скорости передачи информации (за счет увеличения SNR) у нас есть всего три способа. Можно либо повысить мощность передаваемого сигнала, либо понизить уровень шума, либо повысить уровень принимаемого сигнала. Но каждый из этих способов имеет свои ограничения.

Так, первый способ – увеличение мощности – имеет свои пределы для

¹ Следует отметить, что приведенная формула справедлива при определенных условиях, а именно в условиях аддитивного белого гауссовского шума, но для дальнейшего изложения этим можно пренебречь.

бортовой аппаратуры, поскольку существуют ограничения по энергопотреблению для космических аппаратов, где основной источник энергии – это, как правило, солнечные батареи, а также другие ограничения технического характера. Тем не менее этот способ применяется по возможности.

Теперь рассмотрим, как можно понизить уровень шума. В основном на пути от космического аппарата до наземной антенны сигналу необходимо пройти через земные ионосферу², атмосферу и непосредственно саму приемную аппаратуру. Ионосфера и атмосфера, с одной стороны, надежно защищают обитателей Земли от космического излучения, но с другой стороны, являются источником помех на пути сигнала. И хотя мы ничего не можем поделать с целым рядом эффектов, таких как поглощение, мерцание, изменение направления, задержка распространения, дисперсия, изменение частоты и поляризация, – но мы можем постараться их компенсировать. С одной стороны, за счет выбора частотного диапазона, где эти эффекты минимальны, а с другой – за счет использования различных методов модулирования и кодирования передаваемого сигнала³.

Другим источником помех является сама приемная аппаратура, и здесь возникает естественное техническое противоречие – чем выше чувствительность приемной аппаратуры, тем выше и ее собственные шумы (по отношению к уровню чувствительности). Но здесь

² Строгости ради, следует еще упомянуть магнитосферу, межпланетную плазму и ряд других источников помех, но их влияние существенно меньше ионосферы и атмосферы, поэтому в рамках настоящей статьи они не рассматриваются.

³ Обсуждение различных методов кодирования информации, которые «виртуально» повышают SNR, выходит за рамки настоящей статьи.

на помощь приходят специальные криогенные комплексы, когда для снижения уровня собственных шумов входные усилители сигнала охлаждаются до сверхнизких температур.

КОГДА РАЗМЕР ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ

Наконец, третий способ повысить уровень принимаемого сигнала – сделать более чувствительную антенну. В общем случае это означает использовать антенну большего размера. Самые крупные антенны дальней космической связи имеются у России и США. У НАСА есть три антенны диаметром по 70 м, расположенные в Австралии (Канберра), США (Голдстоун, Калифорния) и в Европе (Мадрид). У России – две антенны диаметром 70 м, расположенные в Уссурийске (Приморский край) и Евпатории (республика Крым), а также две антенны диаметром 64 м, расположенные в Медвежьих Озерах (Московская область) и Калязине (Тверская область).

Собственно говоря, размер антенны является одним из решающих факторов в вопросе возможной скорости передачи информации на Землю (при условии надлежащего качества зеркала антенны, конечно).

Так, например, сейчас в рамках российско-европейского научного космического проекта «ЭкзоМарс» прием информации осуществляется как с помощью антенн Европейского космического агентства (ЕКА), которые имеют диаметр 35 м, так и помощью Российского комплекса приема научной информации (РКПНИ), который был создан по заданию Госкорпорации «Роскосмос» совместно специалистами ИКИ РАН, АО «ОКБ МЭИ» и АО «ЦНИИмаш» на базе 64-метровых антенн в Калязине и Медвежьих Озерах.

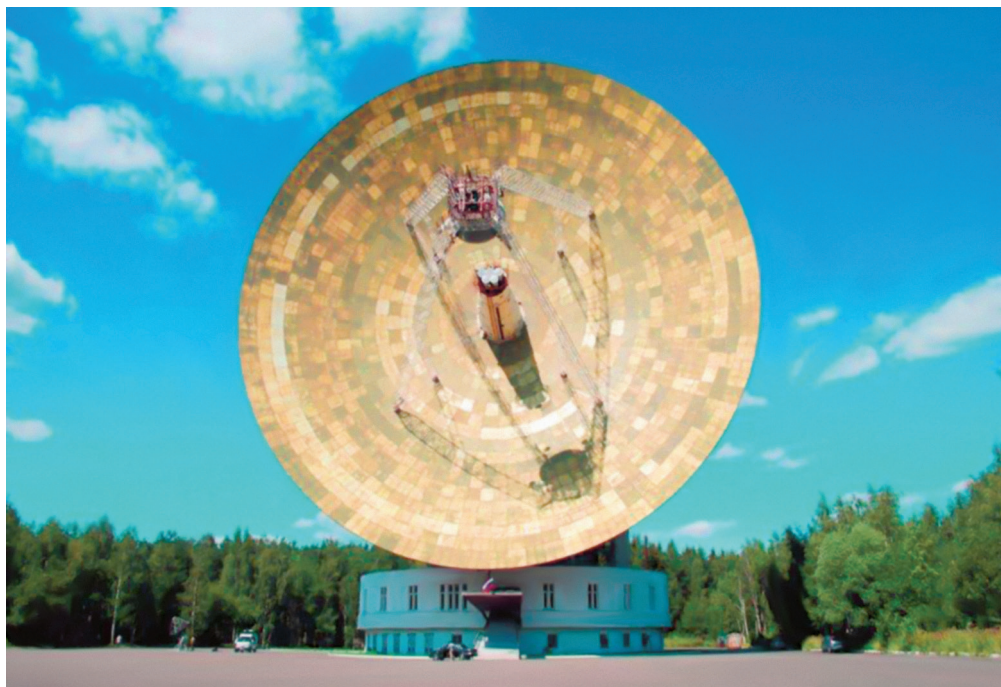


Рис. 6. 64-метровая антенна АО «ОКБ МЭИ» в Медвежьих Озерах

Когда космический аппарат TGO проекта «ЭкзоМарс» находится на максимальном удалении от Земли (а это более 400 млн км), использование РКПНИ позволяет передавать информацию на куда более высокой скорости (от двух до четырех раз), нежели в случае с использованием антенн ЕКА, что, естественно, существенно увеличивает научную отдачу проекта в целом.

За это надо сказать «спасибо» советским ученым и инженерам, которые сумели построить такие замечательные антенные комплексы, которые и до сих пор являются одними из лучших в мире.

Эти гигантские антенны как у нас, так и в США были построены во времена так называемой «лунной гонки», и на тот момент не существовало других технических решений, чтобы обеспечить достаточный уровень SNR для связи с аппаратами на орбите или по-

верхности Луны. Выдержать качество поверхности зеркала (а оно должно быть строго параболическим) для столь больших размеров, при разных углах наклона антенны, в разных температурных режимах – сверхсложная задача, но она была решена.

Однако современное развитие технологий позволяет реализовать другой подход. Как у нас в стране, так и в зарубежных космических агентствах принято решение о создании так называемых антенных массивов для перспективных проектов по исследованию дальнего космоса. При таком подходе вместо одной гигантской антенны строятся несколько антенн меньшего диаметра, которые одновременно принимают сигнал с одного и того же космического аппарата и суммируют принимаемые сигналы. Несмотря на кажущуюся простоту, это довольно-таки сложная техническая задача (иначе ни СССР, ни

США не пришлось бы строить гигантские антенны), но весьма перспективное направление как с экономической так и технической точек зрения. Работы по развертыванию таких антенных полей проводятся во всем мире, и Россия здесь не исключение, а первые полученные результаты [7] весьма обнадеживают.

ВСЕ ДЕЛО В ЧАСТОТЕ

Перейдем теперь к другому элементу формулы (1) – к ширине полосы пропускания (B). Очевидно, что чем больше полоса пропускания, т. е. диапазон частот, в котором передается сигнал, тем выше пропускная способность канала связи. Строго говоря, исходя из формулы (1) скорость передачи прямо пропорциональна ширине полосы. Но здесь есть два типа проблем: организационные и технические.

С одной стороны, для того чтобы космический аппарат не мешал работе других радиотехнических систем, причем не только космических, но и наземных, например операторам мобильной связи или спецсвязи, а с другой стороны, чтобы эти «другие» радиотехнические системы не мешали работе систем связи космического аппарата, космический аппарат должен использовать выделенный только ему согласованный диапазон частот.

Основной организацией, отвечающей за распределение частот, является Международный союз электросвязи (ITU – International Telecommunication Union). ITU – это специализированное учреждение Организации объединенных наций, отвечающее за распределение и глобальное использование диапазона радиочастот. На практике координацию распределения диапазонов радиочастот обеспечивают национальные органы (для России это ФГУП «ГРЧЦ»),

которые работают в координации с ИТУ в соответствии с Международной конвенцией электросвязи.

Вопрос о выделении соответствующих диапазонов радиочастот встал сразу после запуска Первого спутника в 1957 г. (как отмечалось в самом начале, Первый спутник использовал диапазон, выделенный для наземной радиолюбительской связи). И уже в 1959 г. в Регламент радиосвязи было включено понятие «космических служб радиосвязи», а таблица распределения радиочастот (ТРЧ) была расширена до 40 ГГц. С тех пор ТРЧ несколько раз корректировалась и дополнялась. Текущие основные диапазоны и примерные их частоты представлены в таблице.

Таблица

Основные радиодиапазоны для космической связи

Примерная частота (ГГц)	Диапазон
0.1–0.3	VHF-диапазон
0.3–1.0	UHF-диапазон
1.0–2.0	L-диапазон
2.0–4.0	S-диапазон
4.0–8.0	C-диапазон
8.0–12.0	X-диапазон
12.0–18.0	Ku-диапазон
18.0–27.0	K-диапазон
27.0–40.0	Ka-диапазон
40.0–75	V-диапазон
75–110	W-диапазон
110–300	mm-диапазон
300–3000	µm-диапазон

Необходимо отметить, что более низкочастотные диапазоны исторически уже очень сильно загружены (поскольку аппаратура для них проще) и выделить в них даже небольшую новую полосу довольно проблематично, но чем выше частотный диапазон, тем он свободнее и тем проще найти свободную полосу.

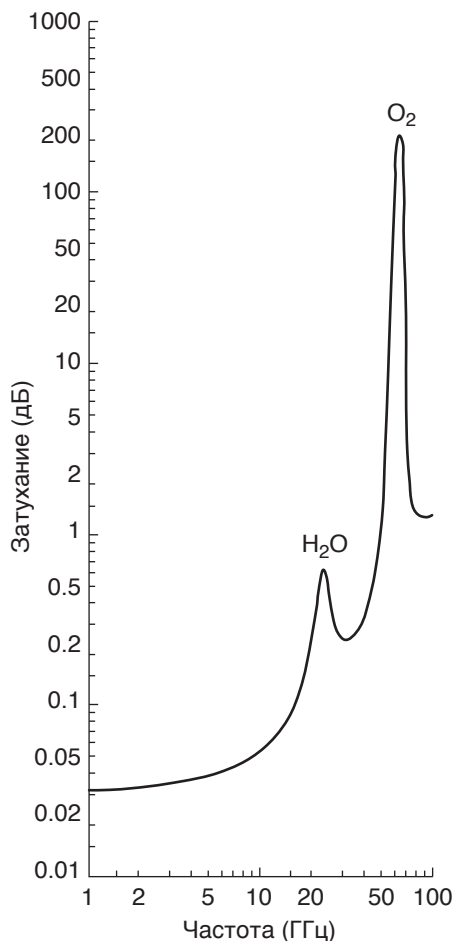


Рис. 7. Затухание радиоволн для разных частот

Опять же не стоит забывать, что в формуле (1) B (ширина полосы) – это абсолютная разность двух частот. Поэтому в более высокочастотных диапазонах относительная ширина полосы (отношение ширины полосы к центральной частоте) может быть меньше, а в абсолютном выражении больше.

Но при этом необходимо учитывать и различную степень поглощения сигнала в атмосфере Земли для различных частот (см. рис. 7 ниже).

На рис. 7 представлено затухание радиосигнала для различных час-

тот [6]. При этом не учитывались такие явления как дождь или снегопад, повышенная запыленность и др. То есть представленные значения соответствуют наблюдениям, которые бы проводились, когда антенна направлена в зенит, при тихой, ясной и безветренной погоде, давлении в одну атмосферу, температуре 20 °С и умеренной влажности (7.5 г/м³). Как жаль, что реальные сеансы связи, как правило, приходится проводить в совсем других условиях! Тем не менее результаты этой работы несут очень важную информацию о так называемых «окнах прозрачности» для распространения радиосигналов.

Как видно из рис. 7, достаточно эффективно можно работать начиная от низких частот и до Ки-диапазона (12–18 ГГц), затем идет пик поглощения, затем есть окно в области Ка-диапазона (27–40 ГГц), а затем можно вообще забыть про передачу данных вплоть до W-диапазона (75–110 ГГц).

Поэтому не удивительно, что наиболее распространенным диапазоном на сегодняшний день является X-диапазон (8–12 ГГц). При этом существует достаточно много проектов, в которых задействуются два диапазона. Например, более низкочастотный С-диапазон (4–8 ГГц) используется для двунаправленного канала связи, который обеспечивает передачу телекоманд на борт КА и передачу на Землю так называемой служебной телеметрической информации, т. е. данных о состоянии бортовых систем. А научная информация передается по более скоростному каналу, работающему в X-диапазоне.

Такие «гибридные» решения оправданы, если вспомнить, что исторически использование всего спектра радиочастот для космической связи началось с более низких частот (20 и 40 МГц на Первом искусственном спутнике Земли), поскольку техническая реализация

для них проще. Поэтому использование более низкочастотного диапазона для канала связи, отвечающего за «жизнеобеспечение спутника», техническая реализация которого достаточно хорошо отработана, и более высокочастотного диапазона для передачи научной информации достаточно распространена, несмотря на то, что в этом случае необходимо поддерживать два типа радиоконфлюксов. Но следует также отметить, что в перспективных научных космических проектах в случае такой двухдиапазонной «гибридной» схемы уже используется связка X-диапазон для управления КА и Ku- (для ближнего космоса) либо Ka-диапазон (для дальнего космоса) для передачи научной информации на Землю.

Что же касается более высокочастотных диапазонов (>70 ГГц), то такие работы ведутся пока в виде исследований и пока далеки от практического применения. Хотя есть зарубежные примеры, когда новые антенны строятся с учетом возможности работы и в W-диапазоне, как бы «с запасом», в надежде на то, что соответствующие технологические решения в бортовом исполнении скоро появятся.

И конечно, говоря о средствах космической связи, нельзя обойти вниманием оптические средства. В отличие от традиционных радиотехнических средств, использование лазеров для передачи информации позволяет принципиально увеличить скорость передачи информации (в десятки и даже в сотни раз) на фоне существенного снижения энергопотребления аппаратуры (что особенно важно для бортового сегмента), а также высокого уровня защиты передаваемой информации от «несанкционированного доступа» (или, говоря простым языком, кражи).

Как обычно, объяснение таких удивительных возможностей содержится в формуле (1). Поскольку сама частота,

на которой происходит излучение, составляет терагерцы, то полоса пропускания измеряется уже гигагерцами. А если учесть узкую направленность лазерного луча, то понятно, что требуется куда меньшая мощность для того, чтобы получить приемлемое соотношение «сигнал/шум».

Кажется, что в этом решение всех проблем со связью? К сожалению, и в этой «бочке меда» есть своя «ложка дегтя», и даже не одна. Самая большая из них – это проблема наведения лазера. Действительно очень трудно попасть лазером, например, с Луны в наземный терминал оптической связи (см. рис. 8).

Пожалуй, наиболее ярким прорывом в области оптической связи для космических исследований следует считать эксперимент LLCD [8], который проводился в рамках миссии Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE, НАСА). В октябре 2013 г., вскоре после вывода космического аппарата НАСА LADEE на окололунную орбиту, впервые была установлена двусторонняя высокоскоростная оптическая линия связи между Луной и наземной станцией на Земле в рамках демонстрации лунной лазерной связи НАСА (LLCD). В рамках эксперимента была успешно продемонстрирована передача данных по оптическим каналам связи на скоростях до 20 Мбит/с по восходящей линии связи («Земля–Луна») и 622 Мбит/с (!) по нисходящей («Луна–Земля»). Прибор весил ~30 кг и потреблял около 90 Вт, при этом номинальная излучаемая мощность была всего 0.5 Вт для передачи по оптической нисходящей линии связи, а не десятки ватт, как в случае с радиосвязью для подобных космических аппаратов.

В настоящее время в рамках миссии НАСА «Артемида-2» (Artemis-II, планируемая дата запуска – апрель 2026 г.)



Рис. 8. Наземный терминал оптической космической связи проекта LLCD, НАСА

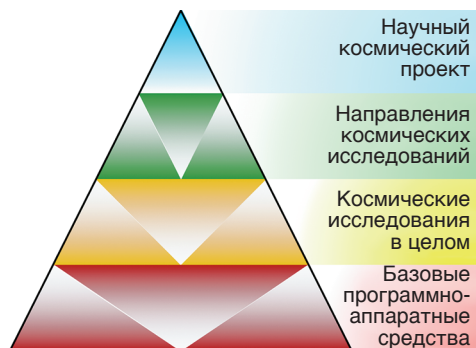


Рис. 9. Иерархия технических и программных средств

планируется отработать оптическую систему связи O2O [10], позволяющую передавать на Землю информацию со скоростью до 260 Мбит/с. Выбор такой сравнительно небольшой (на фоне рекордов 2013 г.) скорости обусловлен достаточно высокими требованиями по надежности, с одной стороны, а также достаточностью такой скорости для передачи изображений и потокового

видео с высоким разрешением, что в первую очередь и необходимо для пилотируемого полета.

Говоря о рекордах, нельзя обойти молчанием проект TBIRD (TeraByte Infrared Delivery) [9] когда в 2022–2023 гг. была успешно продемонстрирована лазерная связь с максимальной на момент подготовки настоящей статьи скоростью – 200 Гбит/с из космоса (с околоземной орбиты) на Землю, что уже сравнимо со скоростью передачи данных по наземным магистральным каналам связи.

И такое бурное развитие возможностей по передаче данных с одной стороны открывает совершенно новые горизонты для исследований, а с другой стороны создает и новую проблему: а что с таким количеством данных делать? Ведь даже их передать с антенных комплексов в центры обработки по Земле – уже непростая задача.

И здесь мы переходим к теме оборудования и программного обеспечения.

КАК ЭТО ВСЕ ОБРАБОТАТЬ

Собственно говоря, задача организации эффективных вычислительных процессов не уникальна для космических исследований, сегодня она актуальна практически для всех видов человеческой деятельности. Поэтому набор аппаратных и программных средств для любого научного космического проекта представляет собой своеобразную пирамиду (см. рис. 9).

Так, любая наземная информационная система для космических исследований базируется на универсальных вычислительных программных и аппаратных средствах. Конечно, они должны быть современными и производительными, но при этом достаточно широко используемыми, поскольку это является залогом надежности фундамента, на котором строится вся система.

На базовых технических средствах разворачивается уже специализированное программное обеспечение, тоже в определенной иерархии. Так, для того чтобы для нового космического проекта не разрабатывать каждый раз все с нуля, целесообразно использовать ранее созданные продукты. И это не только экономит время и деньги, но и повышает надежность за счет использования отработанных и проверенных решений. При этом программы, специфичные для конкретного проекта, разумно разместить на самом вершине пирамиды, а общие программы, начиная с программ, реализующих задачи, характерные для определенного направления космических исследований (так, например, есть существенные отличия в системах планировании астрономических миссий и экспедиций по изучению планет), и программ, используемых для всех космических проектов в целом (например, программное обеспечение для ряда задач баллистики и навигации космических аппаратов может использоваться всеми космическими проектами), задействовать в качестве базиса.

Но, несмотря на такую устойчивую модель, разработчики сталкиваются с выбором в поисках компромисса между надежностью, эффективностью работы, да еще и стоимостью как создания, так и эксплуатации наземных сегментов.

Вот уже более шестидесяти лет наземные сегменты почти всегда (и причем весьма успешно) строятся на базе классической архитектуры, когда все средства жестко закреплены за теми или иными задачами. Но в последнее время и в области космических операций все-таки наметился определенный тренд в сторону облачных вычислений. В этом случае вместо того, чтобы приобретать, устанавливать и обслуживать компьютерное оборудование, используются вычислительные средства, раз-

мещенные удаленно, и доступ к ним осуществляется по сети как к сервису. Такой подход стал широко использоваться в различных областях человеческой деятельности начиная с 2010-х гг.

ГДЕ ЛУЧШЕ: ДОМА ИЛИ НА ОБЛАКЕ?

К очевидным достоинствам классического «монументального» подхода, безусловно, следует отнести его предсказуемость и надежность. Поэтому такие положительные моменты, как более высокая эффективность и масштабируемость, характерные для облачной архитектуры, часто приносились в жертву. Истина, как это часто бывает, располагается посередине, и в большинстве отечественных перспективных научных космических проектов планируется использовать гибридный подход.

Как видно из рис. 10, критически важные операции, в основном те, которые обеспечивают жизнедеятельность космического аппарата, выполняются на жесткой архитектуре. Та часть научных операций, которая не влияет на безопасность космического полета, реализуется на корпоративном облаке в Центре данных. При этом для неких разовых ресурсоемких вычислений⁴ с использованием стандартных облачных технологий возможно привлечение внешних, в том числе и коммерческих, центров данных, чтобы не нарушать параметры вычислительной среды для номинальных процессов.

⁴ В качестве примера можно привести проект DEMETER, который осуществлялся французским космическим агентством (CNES) с привлечением международной кооперации, в том числе и российских специалистов. В этом проекте на третьем году полета была уточнена временная поправка и, как следствие, пришлось заново переработать все полученные к этому моменту данные.

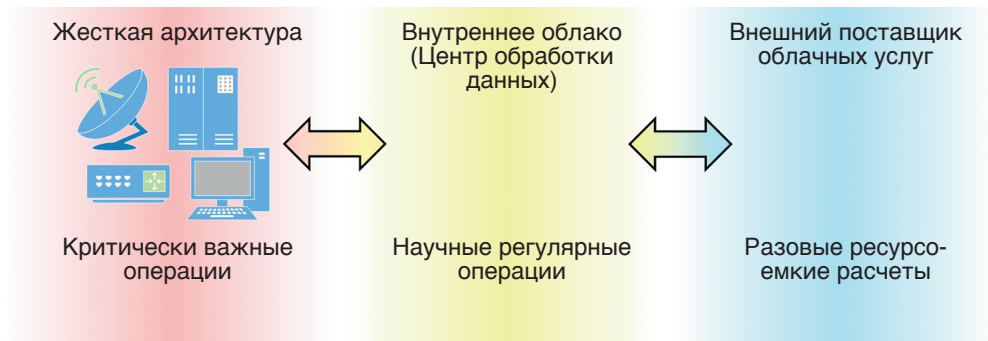


Рис. 10. Гибридная архитектура базовых технических средств

При этом, в дополнение к эффективному использованию ресурсов, такой подход позволяет и более качественно организовать киберзащиту всей системы в целом, поскольку к разным сегментам здесь можно применить различные средства.

К сожалению, вандалы все чаще пытаются нарушить работу наземных сегментов и, как следствие, космических проектов в целом. Один из наиболее известных печальных примеров – случай с германским рентгеновским телескопом ROSAT (Röntgensatellit), когда вследствие кибератаки он был наведен чувствительными элементами на Солнце и фактически выведен из строя [11]. А из-за кибератаки на наземный сегмент Viasat из 100 000 абонентов в 13 странах Восточной Европы и Африки примерно 45 000 лишились связи. Инцидент не только затронул интернет-пользователей, но и привел к сбою в работе около 6000 ветряных турбин в Германии (они управлялись через спутники) [12].

В случае гибридной архитектуры к элементам системы, отвечающим за критически важные операции, можно применить наиболее жесткие средства информационной безопасности, а к Центру данных, который среди прочего должен еще и обеспечивать доступ к результатам исследований

для отечественной и международной научной общественности, могут применяться более щадящие ограничения и средства. Тогда с одной стороны будет обеспечена достаточная кибербезопасность без угрозы срыва реализации миссии, а с другой стороны будет обеспечена определенная информационная свобода, необходимая для проведения научных исследований.

И теперь, рассмотрев основные элементы наземного сегмента, мы приходим к следующему вопросу...

И КАК ЖЕ ЭТО ВСЕ РАБОТАЕТ?

То есть к описанию процедур работы «Земли». Если обратиться к рис. 2 в начале настоящей статьи, то можно сделать вывод, что основной рабочий цикл состоит из двух взаимосвязанных процедур – обработки и планирования. Для простоты изложения мы оставим за скобками процедуры измерений параметров орбиты космического аппарата, а также особые случаи, в которых, например, проводятся активные эксперименты по зондированию ионосферы и магнитосферы Земли, когда космический аппарат излучает сигнал, а специальные наземные приемники его регистрируют, или наоборот (например, при изучении гравитационных аномалий

Луны), когда с Земли излучается высокостабильный сигнал, а космический аппарат его регистрирует и измеряет доплеровское смещение.

В общем случае – приборы, установленные на космическом аппарате, проводят измерения и передают результат на Землю, а с Земли на космический аппарат передаются телекоманды для того, чтобы они эти измерения проводили правильно. В данном случае мы говорим про нисходящие потоки (*downlink*) и про восходящие (*uplink*) потоки и соответствующие им процедуры.

На первый взгляд (см. рис. 11), нисходящий поток устроен достаточно просто и последовательно и состоит из нескольких основных этапов.

Вначале информацию надо принять, и о том, как это сделать, мы говорили, когда рассматривали средства связи. Но здесь стоит оговориться – в некоторых случаях это не совсем *downlink*, точнее, не только *downlink*. Во многих современных проектах, для того чтобы не потерять результаты измерений, используют процедуры повышения качества приема информации. Они предусматривают, что, когда информация по тем или иным причинам была принята со сбоями, то она повторно сбрасывается непосредственно во время сеанса. И конечно, для этого на борт надо передавать информацию о том, что именно надо пересбрасывать. Как правило, такие процедуры используются для межпланетных миссий, когда сигнал от Земли до космического аппарата и обратно идет десятки минут. Или, наоборот, на борт передаются подтверждения о корректно принятых данных. Такие процедуры в основном используются для астрономических миссий, расположенных по космическим меркам сравнительно близко, например в точке либрации L2 в полутора миллионах километров от Земли.

На следующем этапе полученный телеметрический транспортный поток необходимо декоммутировать, т. е. разобрать по источникам информации. Дело в том, что измерения проводятся разными приборами в разное время. Затем данные, как правило, сохраняются на борту в специальном бортовом запоминающем устройстве, а на Землю передаются в те моменты, когда космический аппарат находится в зоне видимости наземной антенны в объединенном телеметрическом потоке, в котором запакованы данные со всех приборов. Поэтому на данном этапе необходимо выделить информацию по каждому из приборов из общего телеметрического потока.

И задача эта не всегда тривиальна. Особенно для посадочных аппаратов. В этом случае прибор записывает результаты измерений на бортовое запоминающее устройство посадочного аппарата. Затем информация передается в объединенном телеметрическом потоке посадочного аппарата (вместе с данными других приборов на нем) на космический аппарат, находящийся на орбите исследуемой планеты, в те моменты, когда орбитальный аппарат пролетает над посадочным. Затем уже орбитальный аппарат в объединенном телеметрическом потоке, в который добавлены измерения, проводимые орбитальным аппаратом, передает информацию на Землю, естественно, когда уже он находится в зоне видимости наземной антенны.

При этом в некоторых случаях декоммутировать общий телеметрический поток, т. е. выделить информацию по конкретному прибору, возможно на основе информации, полученной в результате обработки не одного, а нескольких сеансов связи. Хотя, конечно, в тех случаях, когда это возможно, данный этап декоммутиации осуществляется одновременно

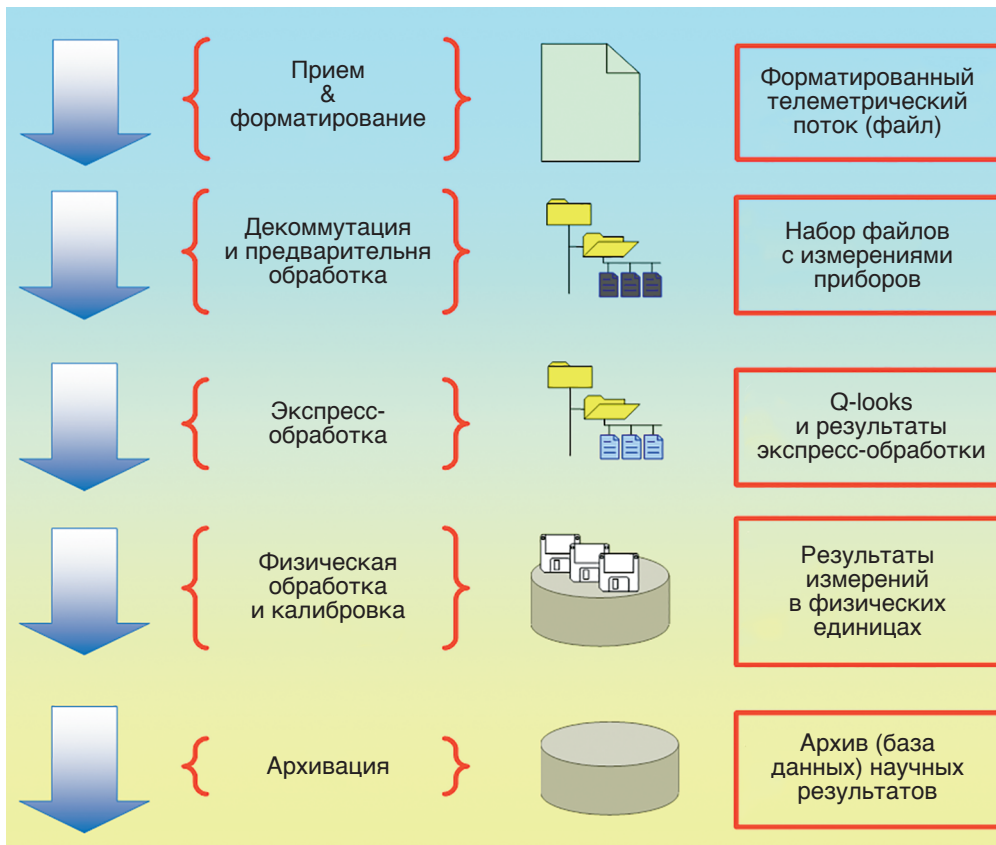


Рис. 11. Основные этапы получения и обработки информации

с предыдущим этапом – приемом информации.

Фактически же это подготовка данных к обработке или, другими словами, – предварительная обработка.

Следующим этапом является так называемая экспресс-обработка. Суть ее сводится к получению в максимально короткие сроки обзорной информации о состоянии бортовых систем и приборов. Дело в том, что полноценная обработка информации может занимать достаточно много времени, и обусловлено это не нехваткой вычислительных мощностей, а тем что практически всегда она требует участия специалистов или, в некоторых случаях, результат получа-

ется на основе обработки большого количества измерений, проводимых длительное время. А контролировать ход космического эксперимента и управлять им надо достаточно оперативно. Следует отметить, что полученные на данном этапе результаты используются не только непосредственно для оперативного планирования и управления космическими экспериментами, но и в качестве своеобразного каталога к получаемым данным и результатам полноценной обработки.

И собственно финальная обработка, обычно мы ее называем лабораторной обработкой, как правило, также состоит из нескольких уровней и достаточно

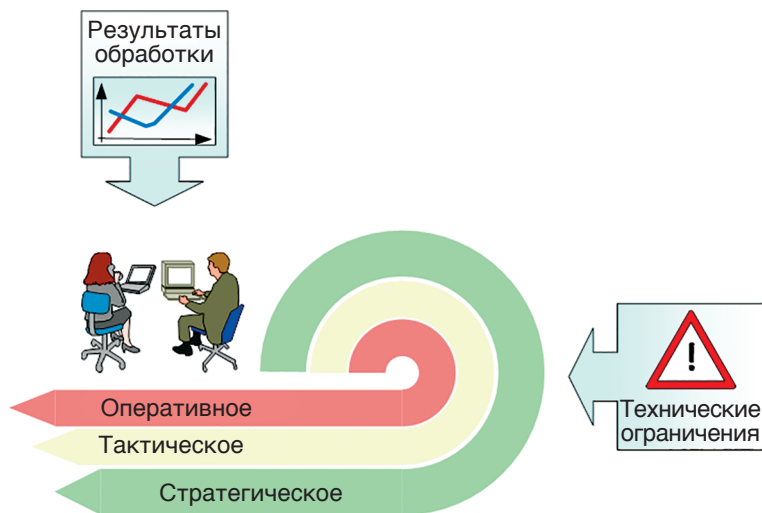


Рис. 12. Планирование и управление космическими экспериментами

сильно зависит от области исследований⁵. Фактически результат этой обработки и является тем, ради чего и запустили космический проект.

И безусловно, эти результаты, т. е. новые знания о Вселенной, должны быть надежно сохранены для будущих поколений исследователей. И здесь остро встает проблема документирования результатов для их долговременного хранения в архивах данных. Зачастую участники космического эксперимента при описании полученных результатов и тех процедур, с помощью которых они были получены, упускают очевидные для них вещи, без которых полноценное использование полученных данных другими исследователями весьма проблематично.

Эта проблема характерна и для отечественных, и для зарубежных проектов. Чтобы ее решить, в последнее время в зарубежных космических проектах проводятся независимые экспертизы

(reviews) таких описаний, как, впрочем, и другой критически важной документации, а в некоторых проектах – даже получаемых результатов. Проведение таких reviews является обязательной процедурой по подготовке и реализации проекта. Подобная тенденция наметилась и у нас в стране, что нельзя не приветствовать, учитывая уникальность получаемых в ходе космических проектов результатов.

И если процедуры в части нисходящего потока выглядят достаточно линейно (не рассматривая лабораторную обработку, которая сильно зависит от области исследований), то в части восходящего потока это цикл, точнее, даже набор вложенных циклов на основе поступающих результатов обработки и с учетом имеющихся технических ограничений (см. рис. 12).

Как правило, эти циклы состоят из стратегического (или долгосрочного) планирования, тактического (или краткосрочного) планирования и оперативного планирования (или управления).

⁵ Более подробную информацию об обработке информации в различных областях исследований можно найти в других статьях журнала.

Длительность этих циклов различна для различных проектов, но в общем – цикл стратегического планирования обычно соответствует одной исследовательской кампании. Это может быть, например, период, необходимый для построения обзора всего неба для астрономических миссий, или цикл сезонных вариаций для миссий по исследованию магнитосферы Земли, или этапы перелета и работы на поверхности астероида.

Тактический план строится на его основе и уже более точно привязывается к используемым ресурсам, как наземным, так и бортовым. На этом этапе уже определено, какие конкретно приборы в каких режимах будут работать, с какими конкретно станциями и когда будут проводиться сеансы связи и т. д.

В рамках оперативного планирования или управления телекоманды уже отправляются на борт или (для некоторых миссий) подготавливается финальная последовательность телекоманд, которые отправляются на борт позже. Здесь уместно вспомнить пример с *downlink*-процедурами для посадочных миссий, только в данном случае все происходит в обратном порядке. Вначале набор телекоманд (циклограмма) отправляется на орбитальный аппарат в тот момент, когда он будет в зоне видимости наземной антенны, там сохраняется в бортовом запоминающем устройстве, и только когда орбитальный аппарат будет пролетать над посадочным, эта циклограмма будет передана на него. Представьте, насколько качественно должны быть разработаны и выверены все *downlink*- и *uplink*-процедуры, чтобы управлять, например, марсоходом в такой схеме.

Вот мы и завершили кругосветное путешествие по «Земле» космических проектов. К сожалению, «за бортом»

нашего обсуждения пришлось оставить такие интересные вопросы, как использование квантовых вычислений и методов искусственного интеллекта, но данные темы, как и ряд других, столь глубоки, что заслуживают отдельных публикаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ИЛИ ГДЕ КОНЧАЕТСЯ ЗЕМЛЯ

Тем не менее в завершение статьи хотелось бы обсудить еще одну тему.

При описании различных аспектов функционирования наземных сегментов мы довольно часто сталкивались с ограничениями, обусловленными зонами видимости антенных систем. Чтобы избежать таких ограничений, на орбите теперь устанавливают специальные антенны, точнее говоря, спутники-ретрансляторы. В качестве примера можно привести отечественную многофункциональную космическую систему ретрансляции «Луч» и целый ряд аналогичных зарубежных систем TDRSS, SDS, EDRS, DRTS, CTRSS [13]. Таким образом, некоторые задачи, традиционно решаемые наземным сегментом, с Земли уходят в космос.

А одна из основных проблем при развертывании центров обработки данных (ЦОДов), про которые мы говорили выше, – это отвод тепла, генерируемого ЦОДами при работе. Поэтому некоторые современные ЦОДы строят высоко в горах, как, например, китайский ЦОД «Нинсуань» (Ningsuan), который расположен в Тибете на высоте 4200 м.

А если разместить ЦОД, например, на Луне? Некоторые из кратеров там постоянно находятся в тени, и внутри них экстремально низкая температура. Если такие центры обеспечить достаточной энергией, например ядерной установкой и современными

средствами связи, то многие задачи «Земли» можно будет решать непосредственно там, а на Землю передавать уже результаты обработки, объем которых может быть существенно ниже, чем исходные данные – в некоторых случаях на порядки.

Возможно, тот сегмент космических проектов, который мы в рамках данной статьи называли «Землей», расширяется и охватывает космическое пространство? Здесь будет уместно упомянуть идеи академика В.И. Вернадского о ноосфере [14, 15], которая «...вследствие развития науки и технологий должна постепенно расширяться за геологические границы Земли и охватывать космическое пространство». Возможно, мы являемся свидетелями этого процесса на примере развития традиционных сервисов наземных сегментов.

Предлагаем читателям самим попытаться найти ответ на данный вопрос.

Литература

1. *Nazirov R., Nazarov V. et al.* Best practice patterns in design of the information systems for Russian scientific space missions. AIAA-2010-2073; SpaceOps 2010.
2. *Laudon K. C., Laudon J.P.* Management information systems. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall. 2011.
3. *Nazarov V. et al.* Joint Luna Data Center (JLDC) Project, 15MS3-MN-PS-14, 15M-S3, 21–24 October 2024, IKI RAN, Moscow.
4. *Nazarov V., Abbakumov A., Arefiev V., Batanov O., Konoplev V., Mischenko A. et al.* Knowledge driven operations for science space missions. 18th International Conference on Space Operations, Montreal, Quebec, Canada; 26–30 May 2025. / Принято к публикации/
5. *Shannon C.E.* 1948. A Mathematical Theory of Communications. BSTJ, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October.
6. *Roddy D.* Satellite Communications. Fourth Edition. McGraw-Hill. 2006.
7. *Бондарева М.К., Горовой Д.С., Демичев А.А., Жуков А.О., Зиньковский Б.М., Иванов К.А.*

Сеть наземных комплексов управления дальними космическими аппаратами – глобальная радиоинтерферометрическая сеть управления, навигации и связи с космическими аппаратами дальнего космоса. Теоретические и прикладные вопросы распространения радиоволн. Радиолокационные исследования. С. 458–465.

8. *Robinson B.S., Boroson D.M., Burianek D.A., Murphy D.V., Khatri F.I., Burnside J.W., Kinsky J.E., Biswas A., Sodnik Z., Cornwell D.M.* The NASA Lunar Laser Communication Demonstration – Successful High-Rate Laser Communications To and From the Moon // SpaceOps 2014 Conference.
9. *Riesing K., Schieler C., Bilyeu B., Chang J., Garg A., Gilbert N., Horvath A., Reeve R., Robinson B., Wang J., Piazzolla S., Tarif A., Keer B.* Operations and Results from the 200 Gbps TBIRD Laser Communication Mission // 37th Annual Small Satellite Conference. SSC23-I-03. August 5–10, 2023 in Logan, Utah.
10. *Desch N., Caroglian A., George R., Lafon R., Rykowski T., Dr. Safavi H., Finegan C., Hall S., Mahaffey J., Miller R.* Ground Segment Operations Concept for the Orion Artemis-2 Optical Communications System // SpaceOps-2021, 8, x1366. Virtual – 3–5 May 2021.
11. *Ear E., Remy J.L.C., Feffer A., Xu S.* Characterizing Cyber Attacks against Space Systems with Missing Data: Framework and Case Study // 2023 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS), Orlando, FL, USA, 2023, pp. 1–9.
12. *Boschetti N., Gordon N., Falco G.* (2022). Space Cybersecurity Lessons Learned from the ViaSat Cyberattack. 10.2514/6.2022-4380.
13. *Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В., Ломакин А.А.* Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования Земли и космических ретрансляторов. Обзорная станция // Изв. вузов. Электроника. 2022. Т. 27, № 1. С. 120–149.
14. *Вернадский В.И.* Несколько слов о ноосфере // Успехи современной биологии. 1944. № 18. Вып. 2. С. 113–120 (переиздано в *Вернадский В.И.* Научная мысль как планетное явление / Отв. ред. А.Л. Яншин. М.: Наука, 1991.)
15. *Вернадский В.И.* Собрание сочинений, Т. 10. Научная мысль как планетное явление / Науч. ред. и сост. академик Э.М. Галимов. М.: Наука, 2013.