



Приоритеты пилотируемой космонавтики России

Методология системных исследований

ЦНИИмаш, к.т.н. Олег Алексеевич Сапрыкин

Методология системных исследований по освоению космического пространства

Обеспечения доступности космоса для человека: расширение освоения околоземного космического пространства и переход к его практическому использованию

Присутствие человека во внеземном пространстве (Марс, астероиды)

Анализ эксплуатации существующих пилотируемых средств и эффективности соответствующих космических программ

Изучение возможностей решения исследовательских и прикладных задач на Луне, в окололунном пространстве, а также перспектив её промышленного использования

Изучение возможностей решения исследовательских и прикладных задач на внеземных объектах (Марс, астероиды) с участием человека

Создание новых пилотируемых космических средств для околоземного пространства

Создание пилотируемых космических средств для освоения Луны

Создание межпланетных пилотируемых космических средств и внеземных баз

Исследования возможностей (полноты) решения стратегических задач перспективной космической инфраструктурой (ПКИ) и эффективности вариантов её реализации

Исследования перспектив создания и технического облика перспективных космических средств

Методология системных исследований по освоению космического пространства

Исследования возможностей (полноты) решения стратегических задач перспективной космической инфраструктурой (ПКИ) и эффективности вариантов её реализации

Исследования перспектив создания и технического облика перспективных космических средств

Совершенствование программ эксплуатации существующих пилотируемых средств

Создание моделей перспективной космической инфраструктуры. Моделирование возможных программ её использования

Системные исследования ключевых технологий в обеспечение освоения космического пространства (РТО НП, ДУ НП, ДКС, КВНО НП)

Исследования в обеспечение существования человека в космическом пространстве (СОЖ НП, СРЗ, подготовка, реабилитация, космическая медицина)

Создание новых пилотируемых космических средств для околоземного пространства

Исследования перспектив создания околоземных орбитальных станций (ОСНП)

Исследования перспектив создания пилотируемых транспортных кораблей для околоземного пространства (ППТК-З, ППТК-С)

Создание пилотируемых космических средств для освоения Луны

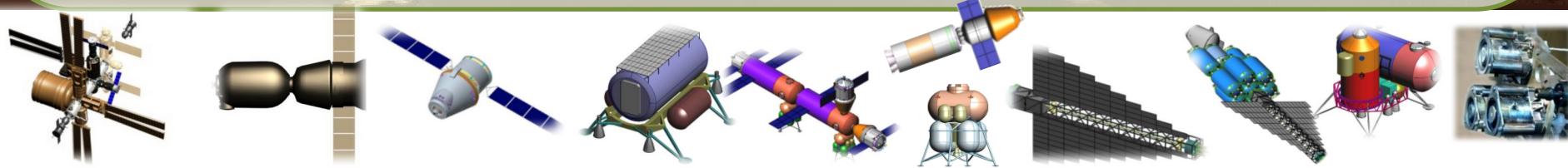
Исследования перспектив создания лунных орбитальных станций (ЛОС) и лунных баз (ЛБ)

Исследования перспектив создания пилотируемых транспортных кораблей и буксиров для задач освоения Луны (ППТК-Л, ЛВПК, МОБ)

Создание межпланетных пилотируемых космических средств и внеземных баз

Исследования перспектив создания марсианских орбитальных станций (МОС) и марсианских баз (МБ)

Исследования перспектив создания межпланетных транспортных средств (ППТК-М, МПБ, ДУ НП)



Методический аппарат в системных исследованиях пилотируемой тематики

Направления исследований:

Исследования вариантов развития перспективной космической инфраструктуры (ПКИ)

Исследования кластеров элементов ПКИ

Исследования оптимального построения систем ПКИ

Исследования проектного облика пилотируемых космических средств

Операционный анализ эффективности и безопасности пилотируемых миссий

Моделирование развития пилотируемых программ с учётом различных внешних факторов

Используемые сегодня методы исследований:

Модифицированный метод Лапласа, рубежно-целевой метод

Вероятностное планирование (стохастическое программирование), математическая статистика

Стochasticное программирование, проектно-аналитические методы

Проектно-аналитические методы, математическая статистика, метод ПРИНН (для сравнительных оценок) и др.

Методы теории графов, математическое программирование, методы теории вероятности, математическая статистика

Программно-целевой метод, имитационное моделирование методом Монте-Карло, метод «бутстрэпа», методы теории игр

Разрабатываемые методы:

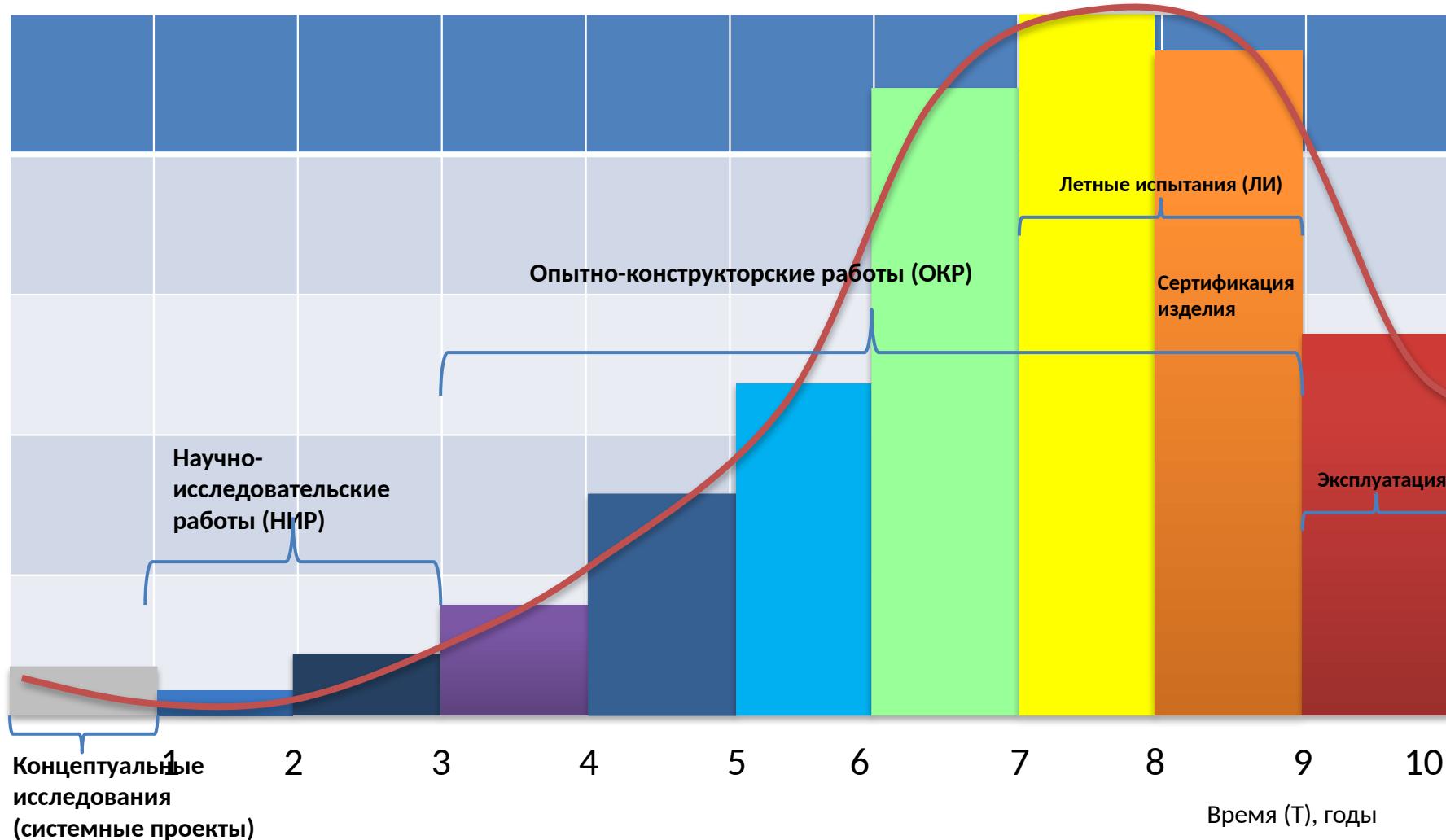
Метод вариационного прогноза развития ПКИ

Метод проектной оптимизации элементов ПКИ

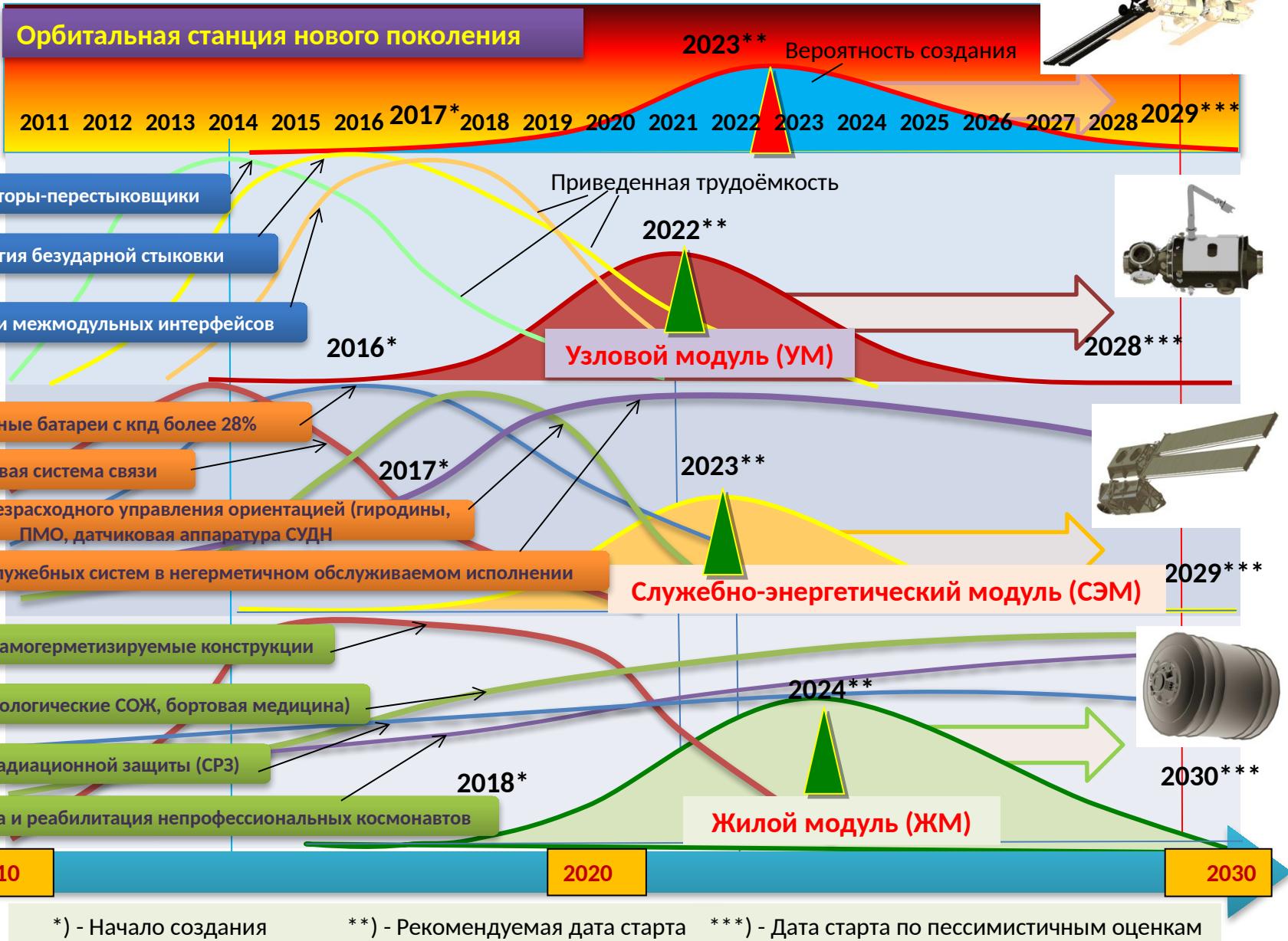
Метод операционного моделирования перспективных космических программ

Трудозатраты (С),
млн. н-часов

Этапы создания элементов ПКИ



Декомпозиция исследований по созданию орбитальной станции нового поколения (ОС НП)



Декомпозиция исследований по созданию перспективной пилотируемой транспортной системы (ППТС)



Перспективная пилотируемая транспортная система

Вероятность создания

2009*

2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017* 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029

2018**

Спутниковая система связи

Аэротермобаллистика спуска

Многоразовость ВА

Унификация и минимизация
массы стыковочных узлов

Системы сближения
нового поколения

Эргономика среды
обитания

Приведенная трудоёмкость

Робототехника и
оборудование для НПИ

Обеспечение точной посадки



ППТК-З

2015*

2022**

ППТК-С

Аэротермобаллистика входа в
атмосферу для КВЗ

Межпланетная баллистика

Средства радиационной защиты (СРЗ)

Подготовка космонавтов
для полётов к Луне

2010

2020

2030

2027**

ППТК-Л



*) - Начало создания

**) - Рекомендуемая дата старта

***) - Дата старта по пессимистичным оценкам

Операционный анализ. Категории отказов

Категория А – отказы, напрямую связанные с опасностью жизни человека (любого члена экипажа). Вероятность их возникновения обозначается как Q^a . Соответственно, вероятность их не возникновения (отсутствия) обозначается как $P^a=1-Q^a$.

Категория В – отказы, связанные с опасностью здоровья человека (любого члена экипажа), вне зависимости от сроков проявления болезней (в процессе миссии, либо после её окончания). Вероятность их возникновения обозначается как Q^b . Вероятность их отсутствия обозначается как $P^b=1-Q^b$.

Категория С – отказы, связанные с опасностью невыполнения основных задач миссии. Вероятность их возникновения обозначается как Q^c . Вероятность их отсутствия обозначается как $P^c=1-Q^c$.

Операционный анализ. Типовые полётные операции

- Состав задействованных в процессе выполнения данной операции бортовых систем (БС),
- Режимы работы задействованных в процессе выполнения данной операции БС,
- Место проведения операции (околоземное, межпланетное, околомарсианскоe пространство, поверхность Марса),
- Время полётной миссии, предшествующее выполнению данной операции (t , от момента создания на околоземной орбите МЭК),
- Время (продолжительность) проведения данной полётной операции (T_i),
- Время (продолжительность) работы конкретной (j -ой) бортовой системы при выполнении данной (i -той) полётной операции (t_i^j),
- Степень участия в данной операции человека (управляющий либо контролирующий объект),
- Законы распределения отказов (включая «отказы» здоровья человека).

Операционный анализ. Распределения отказов

$$P_i^a = 1 - Q_i^a, \quad P_i^b = 1 - Q_i^b, \\ P_i^c = 1 - Q_i^c,$$

$$P_i^a = f(t + T_i) = \int_{t=0}^{t+T_i} \int_{j=1}^{N=Var} p^a_j(t + T_i) dj dt$$

где $p^a_j(t)$ – плотность распределения вероятностей j -ой бортовой системы, влияющей на опасность жизни человека (опасность категории А);

N – номера бортовых систем, задействованных в процессе выполнения i -ой операции, влияющие на опасность жизни человека (для каждой операции количество и состав таких систем специфичны, т.е. варьируются, $N=Var(i)$).

Базовые законы распределения отказов:

- Экспоненциальное (частота отказов практически одинакова по времени, $\lambda=Const$),
- Вейбулла-Гнеденко (частота отказов увеличивается со временем),
- Нормальное (отказы концентрируются в определённом интервале времени вокруг некоторого временного значения по гауссовскому распределению).

Операционный анализ. Распределения отказов

Экспоненциальное распределение:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

где $\lambda = \text{Const.}$

$$\lambda = 1/T_o$$

T_o – математическое ожидание отказа системы (средний срок наработки на отказ).

Распределение Вейбулла-Гнеденко:

$$P(t) = e^{-\beta t^\alpha}$$

где α - параметр формы распределения, зависит от типа элементной базы системы, определяется на основе статистических данных;

Операционный анализ. Распределения отказов

$$\beta_j = \left[\frac{G(1/\alpha + 1)}{To^j} \right]^\alpha$$

β – параметр масштаба, зависит от математического ожидания наработки до отказа, от опорных (апостериорных) значений вероятности безотказной работы. Для j -ой системы: $G(1/\alpha + 1)$ – гамма-функция Эйлера;

To^j – математическое ожидание отказа j -ой системы;

$$To^j = \frac{G(\frac{1}{\alpha} + 1)}{\left[-\ln(P_{vbr}^j) / (t_{vbr}^j)^\alpha \right]^{\frac{1}{\alpha}}}$$

P_{vbr}^j – опорные значения вероятности безотказной работы j -ой системы для времени функционирования t_{vbr}^j ;

t_{vbr}^j – гарантированное время функционирования j -ой системы с вероятностью не ниже P_{vbr}^j .

Операционный анализ. Распределения отказов

Нормальное распределение отказов:

$$P(t) = c \cdot \left[0.5 - \Phi\left(\frac{t - T_0}{\sigma_t} \right) \right]$$

где Φ – функция Лапласа,

$$c \approx \frac{1}{0.5 + \Phi\left(\frac{T_0}{\sigma_t} \right)}$$

T_0 – средний срок наработки на отказ системы (математическое ожидание отказа),

σ_t – среднее квадратическое отклонение распределения.

Расчёт отказов категории А, В, С

$$P_{\Sigma}^A = 1 - \prod_{i=1}^I \left\{ 1 - (1 - P_i^A(t_i)) \cdot \prod_{k_i=0}^{K_i} \left[1 - \prod_{l(k_i)=1}^{L(k_i)} P_{l(k_i)}^A \right] \right\}$$

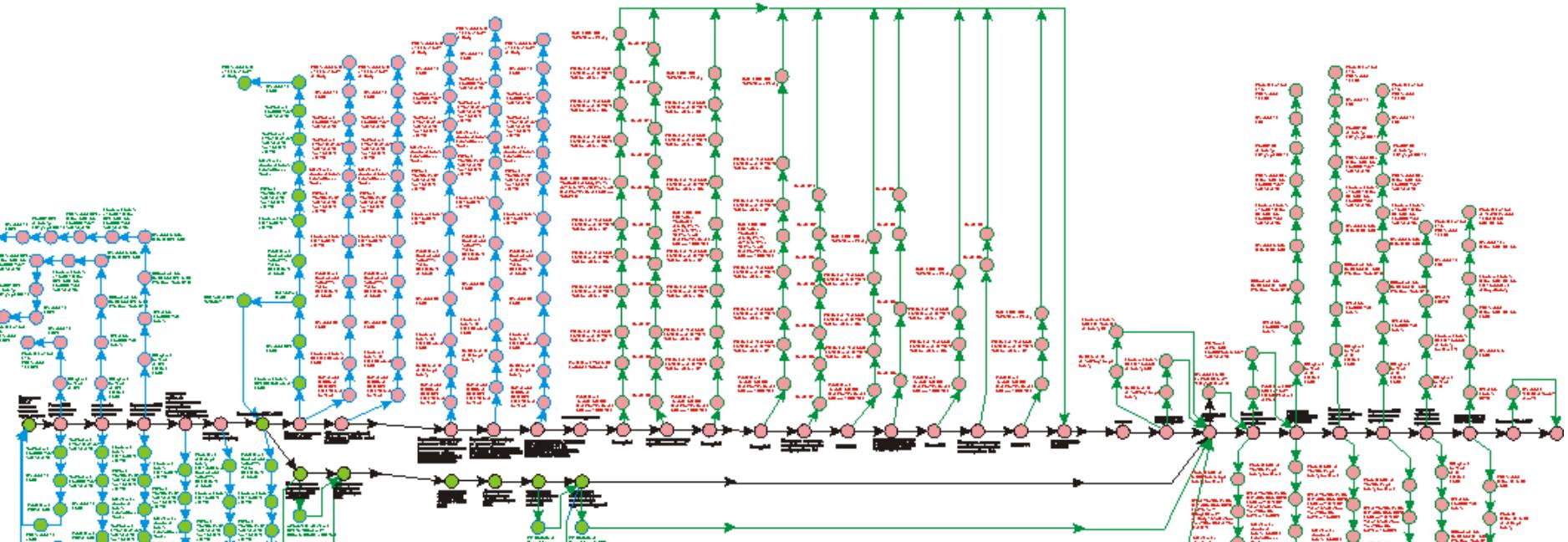
$$P_{\Sigma}^B = 1 - \prod_{i=1}^I \left\{ 1 - (1 - P_i^B(t_i)) \cdot \prod_{k_i=0}^{K_i} \left[1 - \prod_{l(k_i)=1}^{L(k_i)} P_{l(k_i)}^B \right] \right\}$$

$$P_{\Sigma}^C = 1 - \prod_{i=1}^I \left\{ 1 - (1 - P_i^C(t_i)) \cdot \prod_{k_i=0}^{K_i} \left[1 - \prod_{l(k_i)=1}^{L(k_i)} P_{l(k_i)}^C \right] \right\}$$

Операционный анализ эффективности и безопасности пилотируемых миссий (метод графов)

Операции марсианской экспедиции,
связанные с опасностью жизни членов экипажа.
Выполнимость программы при наличии отказов

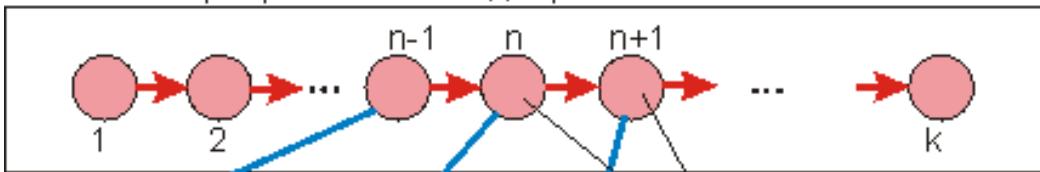
(однокорабельная схема, один ВПК массой 70 т, единый МОК массой 70 т)



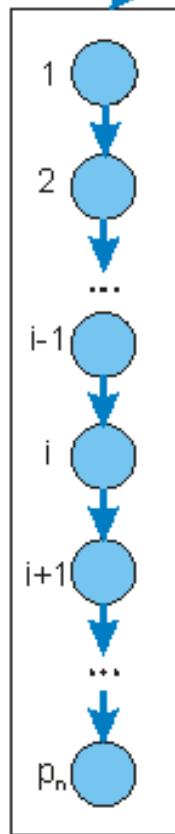
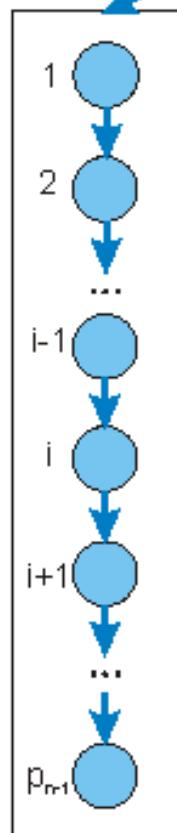
- - Операции, при невыполнении которых существует прямая опасность для жизни экипажа
- - Операции, при невыполнении которых существует опасность невыполнения основных задач полёта
- - Последовательность операций штатной программы
- - Последовательность операций, приводящая к невыполнению основных задач экспедиции
- - Последовательность операций, приводящая к выполнению основных задач экспедиции

Графы штатной и нештатных программ экспедиции

Штатная программа экспедиции

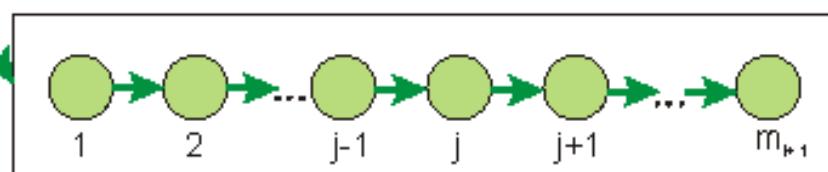
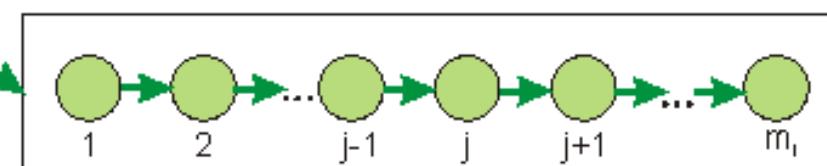
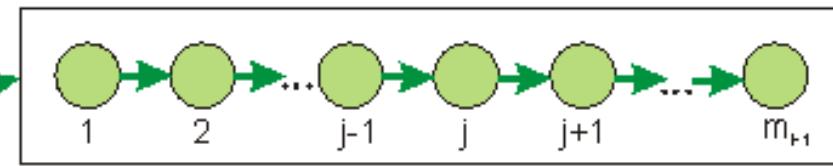


Типовые полётные операции



Нештатная программа первого уровня

Нештатная программа второго уровня

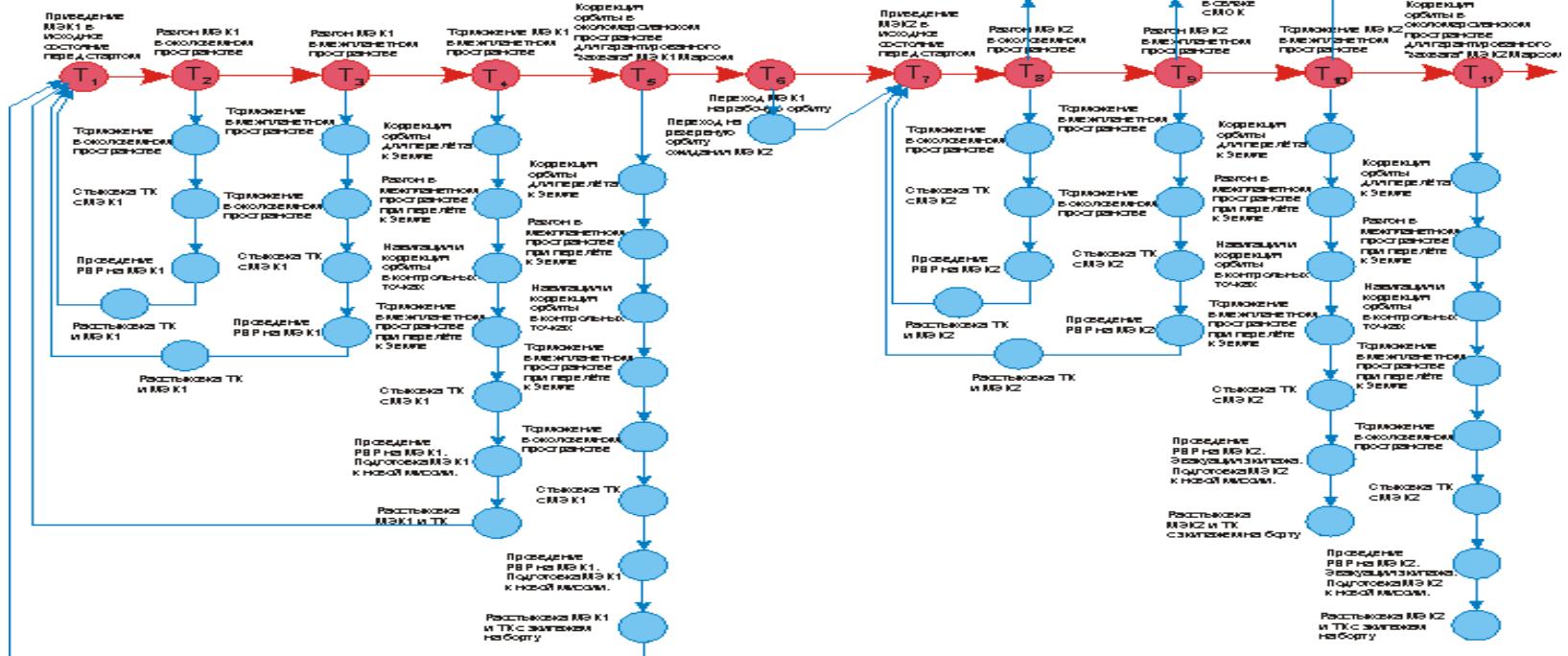


Операционный анализ эффективности и безопасности пилотируемых миссий

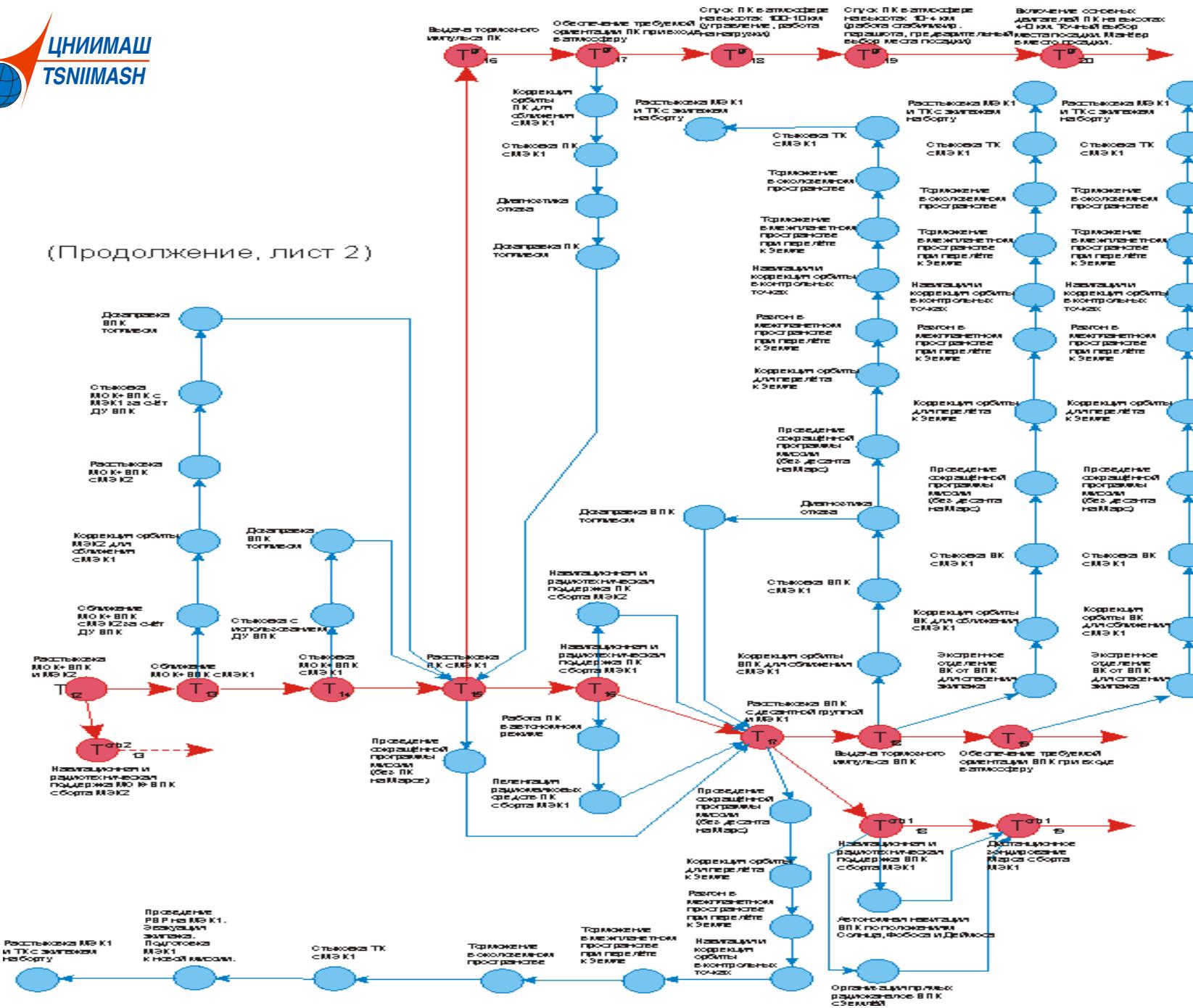
Граф операций первой марсианской экспедиции

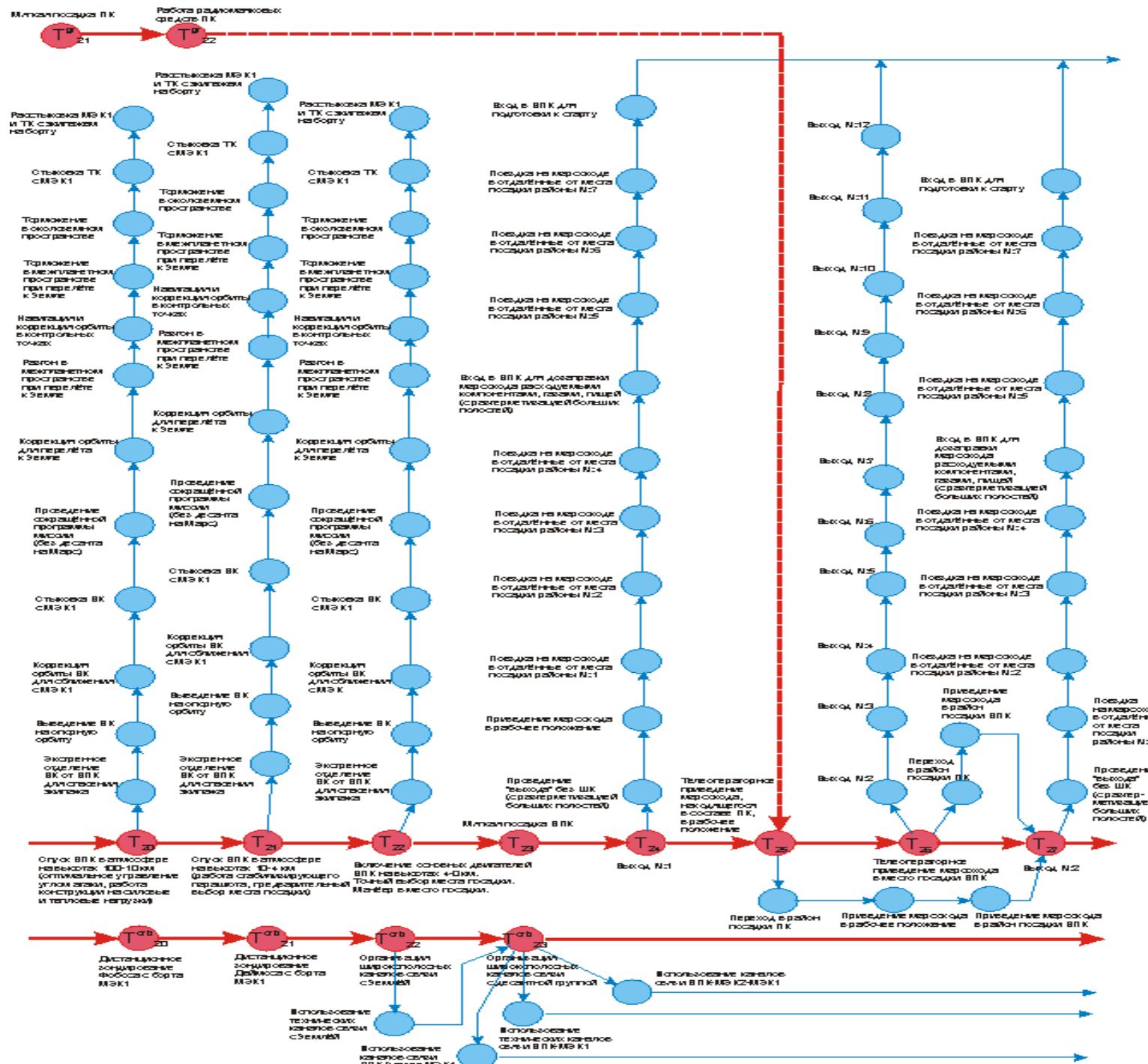
(двухкорабельная схема, два ВПК массой 35 т, двухмодульный МОК с массой каждого модуля 35 т)
Штатная программа, нештатные ситуации первого уровня

МЭК1 - грузовой марсианский комплекс
МЭК2 - пилотируемый марсианский комплекс
ПК - грузовой посадочный комплекс
(входит в состав МЭК1)
ВПК - взлетно-посадочный комплекс
(пилотируемый, входит в состав МЭК2)



(Продолжение, лист 2)



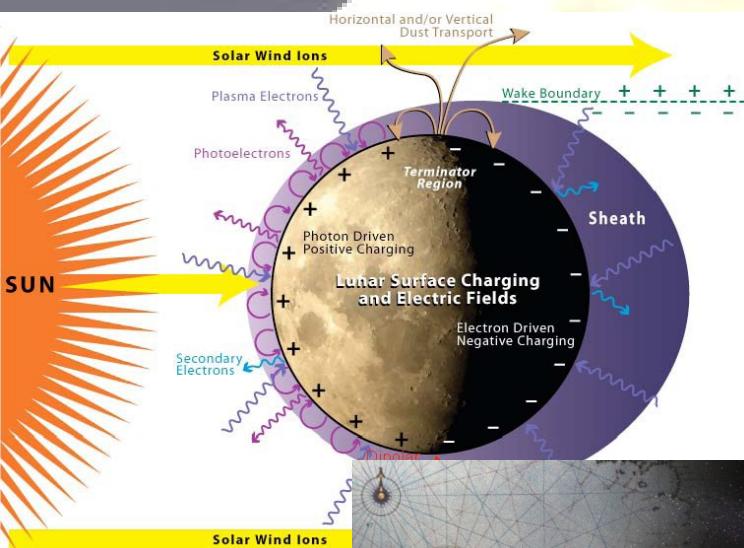


Апостериорные оценки вероятностных характеристик по бортовым системам МЭК, ВПК

Бортовая система	Гарантийный срок функционирования Тф, сутки (годы)	Опорное значение ВБР для Тф	Распределение отказов	Дополнительные параметры распределения	Категория отказов
1	2	3	4	5	6
МПБ:					
СЭС МПБ	1825 (5)	0.98	Экспоненциальное		A
ЭРДУ МПБ	1095 (3)	0.98	Экспоненциальное		A
ДО МПБ	1825 (5)	0.98	Нормальное		A
БВС МПБ	1825 (5)	0.97	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
СУБА МПБ	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СБИ МПБ	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
СОТР МПБ	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
РТС МПБ (АФУ)	1825 (5)	0.97	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
Конструкция МПБ	3650 (10)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.5$	A
МОК:					
СОЖ МОК	1095 (3)	0.99	Экспоненциальное		A
СУДН МОК	1825 (5)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
БВС МОК	1825 (5)	0.97	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
СУБА МОК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
СБИ (+СХОИ) МОК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
СОТР МОК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
ССВП МОК	1825 (5)	0.99	Нормальное		C
СЭС МОК	1825 (5)	0.97	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
ДО (ДУ) МОК	1825 (5)	0.99	Нормальное		C
РТС МОК (ПРМ, ПРД, др. аппаратура)	1825 (5)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	C
СМО МОК	1825 (5)	0.99	Экспоненциальное		B
ВПК:					
ССВП ВПК	1825 (5)	0.99	Нормальное		A
СУДН ВПК	1825 (5)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A

Бортовая система	Гарантийный срок функция Тф, сутки (годы)	Опорное значение ВБР для Тф	Распред-е отказов	Доп. пар-ры распред-я	Категория отказов
БВС ВПК	1825 (5)	0.97	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СУБА ВПК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СБИ ВПК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СОТР ВПК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СЭС ВПК	60 (0.16)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СОЖ ВПК	60 (0.16)	0.99	Экспоненциальное		A
СМО ВПК	1825 (5)	0.99	Экспоненциальное		B
ДПО (ДУ) ВПК	1825 (5)	0.99	Нормальное		A
РТС ВПК	1825 (5)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
Марсоход	730 (2)	0.95	Экспоненциальное		C
Скафандры	1825 (5)	0.99	Экспоненциальное		A
ПУ ВПК	1825 (5)	0.99	Нормальное		A
ШК ВПК	730 (2)	0.98	Экспоненциальное		C
ДУ ВК	1825 (5)	0.99	Нормальное		A
ДПО ВК	1825 (5)	0.99	Нормальное		A
СУДН ВК	1825 (5)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
БВС ВК	1825 (5)	0.97	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СОЖ ВК	60 (0.16)	0.99	Экспоненциальное		A
СЭС ВК	10 (0.027)	0.99	Нормальное		A
СОТР ВК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СУБА ВК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
СБИ ВК	1825 (5)	0.99	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
РТС ВК	1825 (5)	0.98	Вейбулла	$\alpha=1.7$	A
ССВП ВК	1825 (5)	0.99	Нормальное		A

Основные задачи полётов на Луну



Исследование природы Луны

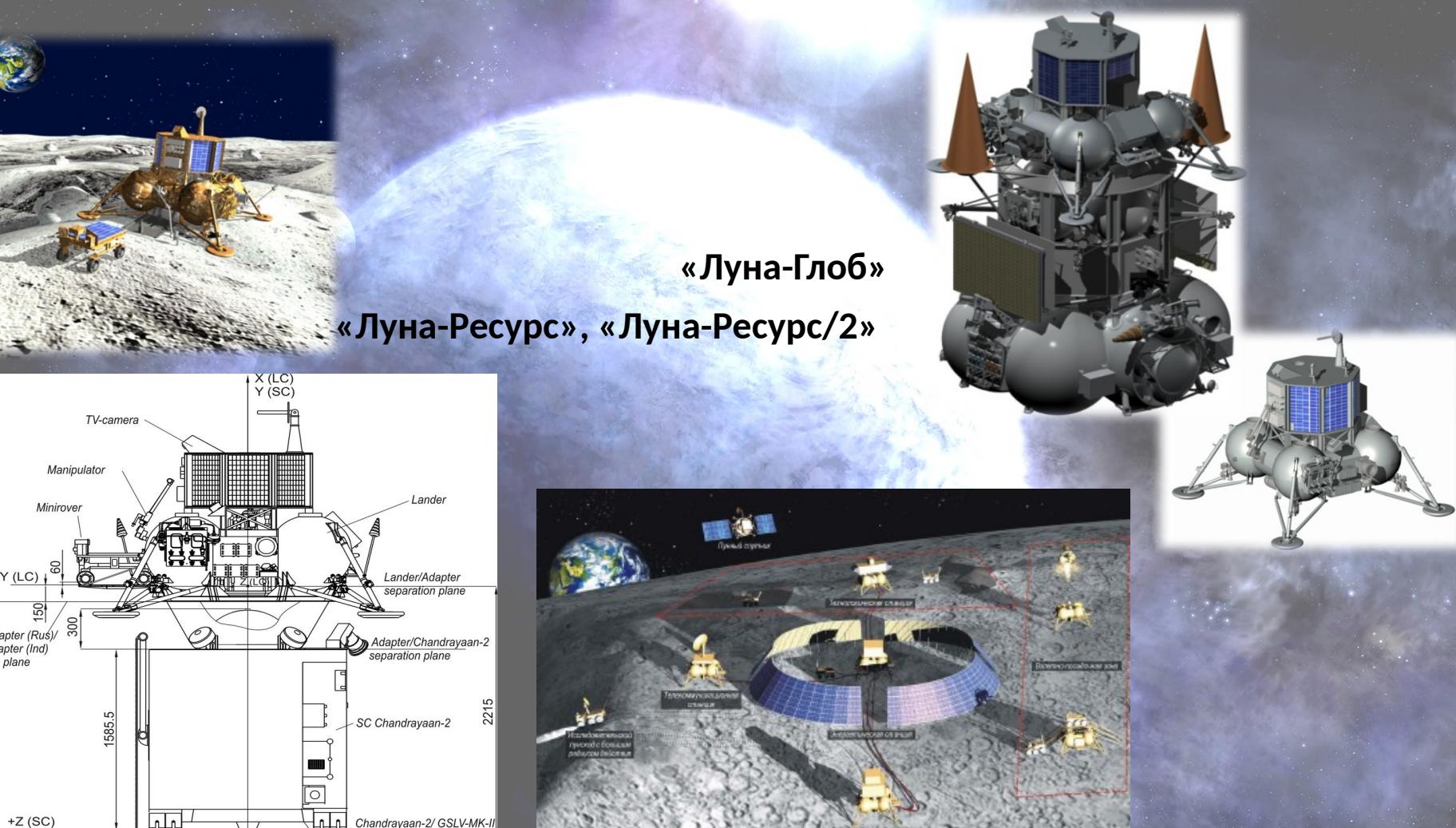
Изучение лунных ресурсов и лунных возможностей (задачи освоения Луны)



Использование Луны и лунных ресурсов

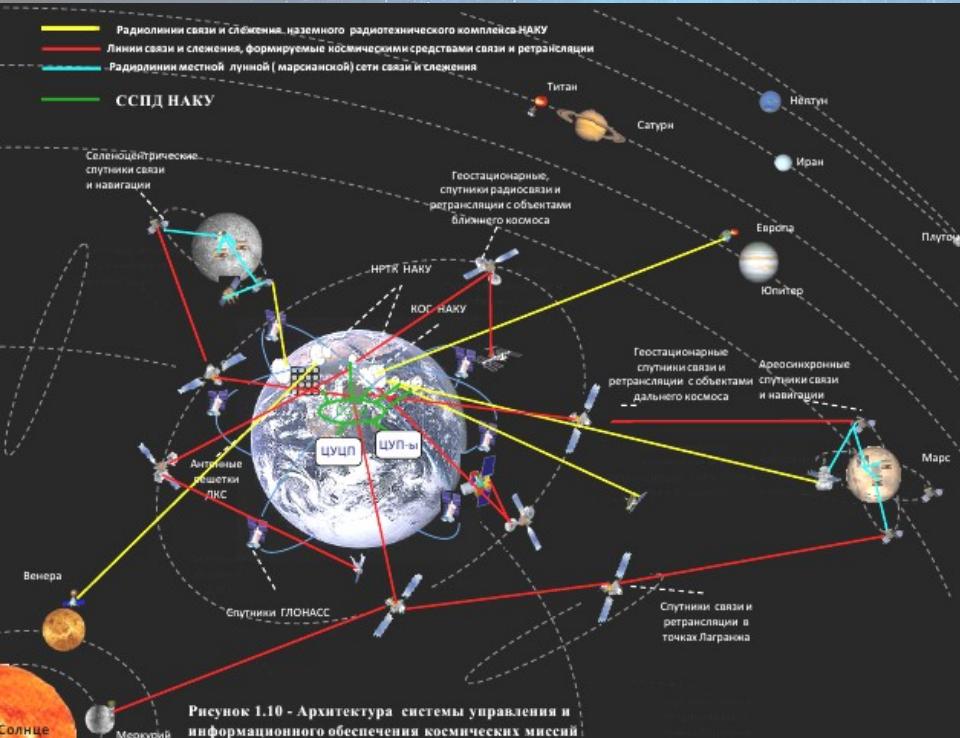


Российские проекты исследований Луны с использованием посадочных модулей



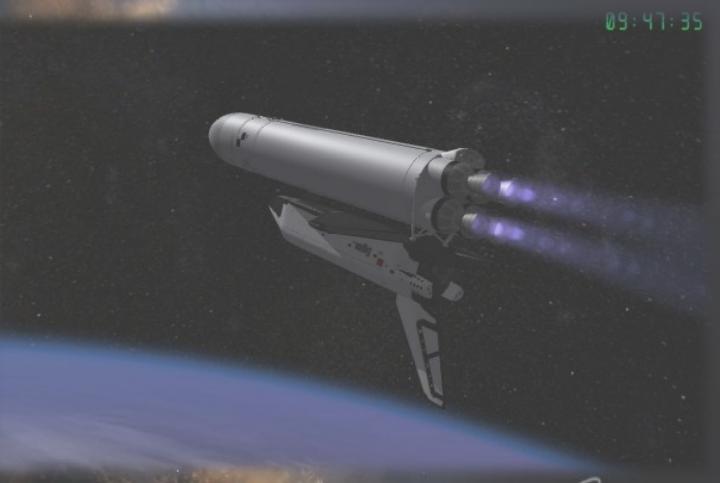
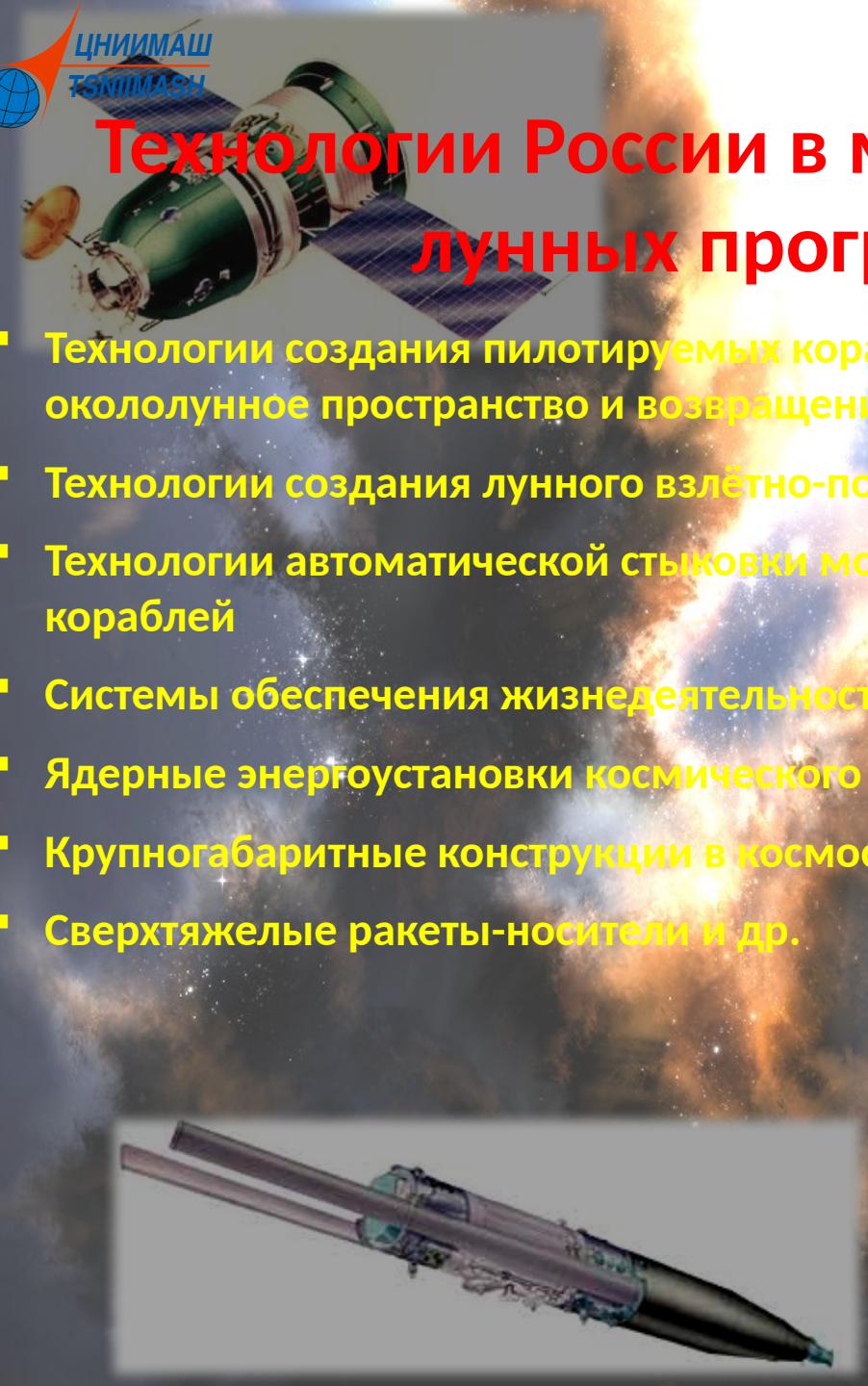
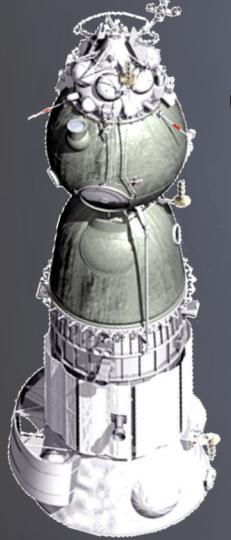
Международные программы исследования Луны автоматическими космическими аппаратами - практический начатый этап

Дальняя космическая связь (ДКС), системы координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) – это безопасность и эффективность эксплуатации Лунной инфраструктуры



Технологии России в международных лунных программах

- Технологии создания пилотируемых кораблей для полётов в окололунное пространство и возвращения на Землю
- Технологии создания лунного взлётно-посадочного корабля
- Технологии автоматической стыковки модулей орбитальных станций и кораблей
- Системы обеспечения жизнедеятельности космонавтов
- Ядерные энергоустановки космического назначения
- Крупногабаритные конструкции в космосе
- Сверхтяжёлые ракеты-носители и др.



МКС как возможность практической подготовки лунных программ

- Отработка средств радиационной защиты (СРЗ)
- Отработка энергодвигательного комплекса межпланетных (лунных) миссий
- Технологии автоматической стыковки с некооперируемыми объектами
- Отработка новых конструкционных материалов
- Новые системы обеспечения жизнедеятельности космонавтов
- Новые технологии создания крупногабаритных (в том числе обитаемых) конструкций
- Создание (сборка) на борту МКС космического экспериментального комплекса и запуск его в удалённое от Земли космическое пространство (окололунная орбита, точки либрации системы «Земля-Луна», внеземное пространство)