

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫМИ ЭКСПЕРИМЕНТАМИ НА АВТОНОМНЫХ МИКРОГРАВИТАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМАХ

© 2004 И. В. Белоконов, И. В. Козлов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Предложена математическая модель, позволяющая провести анализ и оценку эффективности нового вида космических услуг - контроля и управления ходом проведения научных экспериментов на автономных микрогравитационных космических платформах (АМКП). Эффективность проведения научного эксперимента характеризуется мерой степени его неопределенности – энтропией. Записаны критерии, позволяющие сравнивать различные варианты организации контроля и управления ходом проведения экспериментов, отличающиеся привлечением существующих в настоящее время наземных центров, способных получать и передавать информацию на АМКП типа «Фотон»/«Бион». Сформулированы выводы об эффективности типовых вариантов организации экспериментов на АМКП, даны рекомендации по использованию и дальнейшему развитию Самарского наземного центра приема информации из космоса.

Большинство научных экспериментов в космосе посвящено развитию науки о поведении вещества в космических условиях с целью создания теоретических основ космического производства. Рынок космических услуг по обеспечению проведения таких исследований разделяется на услуги, предоставляемые автоматическими микрогравитационными космическими платформами (АМКП), пилотируемыми космическими аппаратами (КА) и международной космической станцией (МКС).

Особое место в перечисленном ряду космических средств принадлежит АМКП «Фотон» и «Бион». С 1985 года на двенадцати АМКП «Фотон» и десяти АМКП «Бион» было проведено множество уникальных экспериментов, в результате которых получены полупроводниковые материалы с новыми свойствами и биологически чистые лекарственные препараты, исследовано протекание физико-химических процессов в условиях микрогравитации, проведена отработка бортовых технических средств для создания основ будущего космического производства [1]. С конца 80-х годов АМКП «Фотон» и «Бион» начали использоваться в коммерческих целях в международных космических программах.

В настоящее время возможности АМКП «Фотон» и «Бион» позволяют решать практически все принципиальные вопросы

перспективных космических технологий в космосе. Однако требуется увеличение располагаемой мощности энергопитания и увеличение срока существования АМКП на орбите, что и осуществляется сейчас в рамках программы модернизации и создания АМКП «Фотон-М» [2].

Сравнительный анализ возможностей космических средств можно выполнить, используя набор следующих показателей:

- уровень микрогравитации, который является основным показателем качества проведения экспериментов в условиях космического пространства;
 - коммерческая стоимость размещения 1 кг полезной нагрузки на борту;
 - возможность оперативной доставки результатов экспериментов сразу после их завершения;
 - сервис проведения экспериментов, под которым подразумевается возможность контроля и управления их ходом;
 - продолжительность проведения экспериментов;
 - ограничения на вид проводимых экспериментов (например, биологические эксперименты на млекопитающих невозможно проводить на пилотируемых космических объектах ввиду трудности поддержания комфортного для человека состава атмосферы).
- На рис. 1 показан многоугольник конкурентоспособности космических средств.

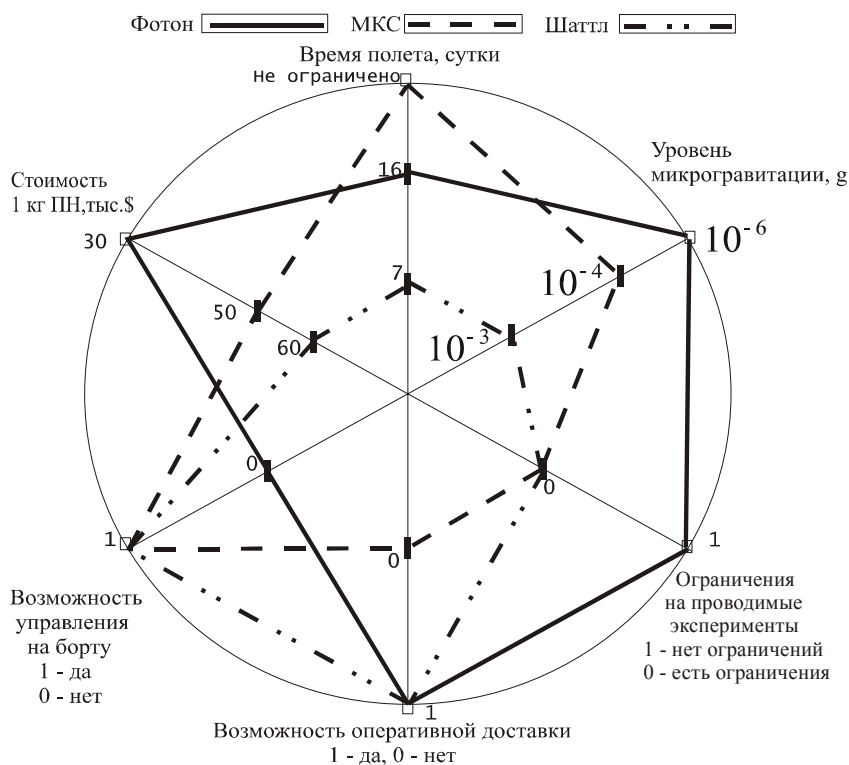


Рис. 1

Его анализ позволяет сделать вывод, что АМКП «Фотон»/«Бион» по большинству показателей опережают конкурирующие с ними космические средства, но проигрывают в возможности контроля и управления экспериментами. Последнее является весьма важным, так как позволяет снизить вероятность появления неплановых режимов проведения экспериментов, что в свою очередь имеет опосредствованный экономический эффект.

Инновационные проекты и направления работ, связанные с улучшением характеристик и повышением конкурентоспособности АМКП на мировом рынке космических услуг, являются весьма перспективными. Целью данной работы является разработка модели, проведение анализа и оценка эффективности нового вида космических услуг, а также формирование предложений по их реализации.

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция усложнения экспериментов на АМКП «Фотон», сопровождаемая потребностью доступа к научной информации для постановщиков экспериментов во время их проведения.

В таблице 1 отражена динамика изменения количества и видов проводимых кос-

мических экспериментов на АМКП «Фотон» (неконтролируемых, контролируемых, управляемых во время полета). Как видно, начиная с «Фотон» №12, появляются эксперименты, информация о ходе которых доставляется оперативно на Землю по радиоканалу, а на модернизированном АМКП «Фотон-М» уже предоставляются услуги и по частичному управлению ходом отдельных экспериментов.

Примером реализации такой услуги является установка системы «Телесайенс» на последних двух АМКП «Фотон», которая расширяет сервисные возможности по работе с научной аппаратурой во время орбитального полета, обеспечивая передачу информации о ее функционировании и ходе экспериментов непосредственно на Европейские региональные пункты приема информации. Первые летные испытания системы «Телесайенс» были успешно проведены на «Фотон-12» в сентябре 1999 г. [3]. Аппаратура «Телесайенс» использовалась совместно с аппаратурой «Флюидпак», предназначенной для проведения исследований в области физики жидкостей в условиях микрогравитации. Она обеспечивала не только передачу на Землю науч-

Таблица 1
Динамика изменения количества и видов проводимых экспериментов
на АМКП «Фотон»

АМКП	Год запуска	Число экспериментов каждого вида в %		
		Пассивные	Активные	Управляемые
Фотон 11	1997	70	30	–
Фотон 12	1999	55	18	27
Фотон-М №1	2001	47	41	12
Фотон-М №2	2005	40	45	15
Фотон-М №3	2006	37	46	17

ной информации (включая видеоизображения), но и передачу новых параметров по управлению экспериментами на борту АМКП. После получения на наземной станции Европейского космического агентства в г. Кируна (Швеция) научная информация оперативно анализировалась представителями заказчиков экспериментов, а затем передавалась по сети Интернет в основные европейские центры и университеты, являющиеся непосредственными постановщиками экспериментов. Это позволило вмешиваться в ход проведения экспериментов в нестандартных ситуациях.

Процесс проведения экспериментов, проводящихся в условиях воздействия большого числа случайных факторов и возмущений, сопровождается большим объемом информации о его состоянии. Поэтому он может быть охарактеризован такой универсальной информационной характеристикой, как энтропия результатов процесса проведения эксперимента, которая является мерой степени неопределенности его состояний:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

где p_i - вероятность того, что в момент T случайная величина X принимает значение X_i ; $i = 1, \dots, n$; n - число возможных значений.

Доказано, что энтропия непрерывного процесса X с заданным среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_x его случайной координаты максимальна при нормальном законе распределения [4]. Примем допущение, что результаты контролируемого эксперимента в текущий момент времени имеют случай-

ный характер и описываются нормальным законом распределения. Тогда энтропию, исчисляемую в битах, можно оценить по соотношению

$$H(X) = \log_2 \sigma_x \sqrt{2\pi e}. \quad (2)$$

Суммируя энтропию по всем экспериментам, можно найти общую энтропию, характеризующую в целом эффективность организации экспериментов.

Примем допущение, что энтропия возрастает пропорционально времени.

За время своего функционирования АМКП «Фотон» неоднократно пролетает над наземными пунктами приема-передачи информации. Во время каждого сеанса связи может осуществляться передача на Землю информации о ходе эксперимента. В результате этого происходит снижение общего объема энтропии (степени неопределенности) о ходе проведения экспериментов. Возрастание энтропии определяется условиями проведения эксперимента, объемом накапливаемой информации, а также вероятностными характеристиками процесса эксперимента (например, дисперсией), на которые можно влиять за счет управленческих решений, принимаемых на основании наземного анализа хода эксперимента. Можно принять, что значение дисперсии результатов эксперимента зависит от эффективности организации процедуры контроля за его ходом, которая в свою очередь определяется квалификацией научного персонала, привлекаемого к оперативному управлению. На рис. 2 показана предлагаемая структурная схема изменения энтропии результатов экспериментов при привлечении

наземного центра контроля и управления ходом экспериментов (НЦКУ), где i и $i-1$ - признаки текущего и предыдущего циклов изменения энтропии, индексы «-» и «+» определяют параметры, соответственно до и после изменения σ_x в результате управленческого решения.

На основании принятых гипотез и предложенной структурной схемы (рис. 2) модель процесса изменения энтропии результатов научных экспериментов на борту АМКП «Фотон» может быть представлена в виде совокупности следующих моделей.

1. За время полета между соседними сеансами связи энтропия эксперимента изменяется пропорционально времени и рассчитывается по соотношению

$$\Delta H_i^+ = \Delta t \omega \log_2 (\sigma_{x_{i-1}}^+ \sqrt{2\pi e}). \quad (3)$$

При этом величина энтропии принимает значение, равное

$$H_i^- = H_{i-1}^+ + \Delta H_i^+, \quad (4)$$

где ΔH_i^+ - приращение энтропии за время Δt между двумя последовательными $(i-1)$ -ым и

i -ым прохождением АМКП над НЦКУ; H_i^- - накопленная величина энтропии к моменту предстоящего i -го прохождения над НЦКУ; H_{i-1}^+ - остаточная величина энтропии после передачи информации во время $(i-1)$ -ого прохождения над НЦКУ (в случае, если передается не вся бортовая информация); ω - частота запоминания информации об эксперименте (принимается для простоты 1 Гц); $\sigma_{x_{i-1}}^+$ - величина СКО результатов

эксперимента после анализа хода их проведения и выработки управленческого решения, направленного на снижение СКО σ_x , во время $(i-1)$ -ого прохождения над НЦКУ.

2. Оценка снижения объема накопленной энтропии в результате передачи информации на Землю во время прохождения над НЦКУ описывается соотношением [5]

$$\Delta H_i^- = \Omega \log_2 (1 + W) \cdot \Delta t_{mn}, \quad (5)$$

и при этом величина энтропии, которая остается после сеанса связи, определяется как

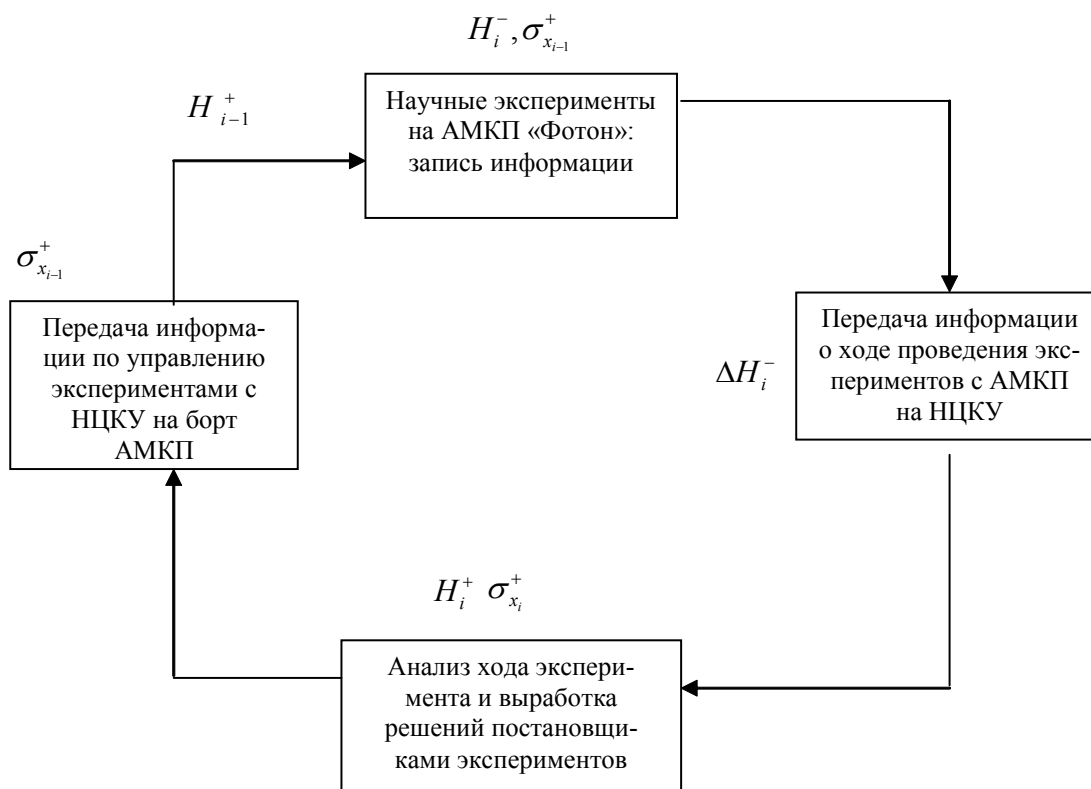


Рис. 2. Структурная схема процесса изменения энтропии результатов экспериментов

$$H_i^+ = H_i^- - \Delta H_i^-, \quad (6)$$

где H_i^+ - величина остаточной энтропии после передачи информации; Ω - полоса частот приемного оборудования НЦКУ; W - отношение мощности полезного сигнала к шуму, $\Delta t_{ин}$ - время нахождения АМКП в зоне видимости НЦКУ.

На этом этапе величина СКО разброса результатов экспериментов переобозначается

$$\sigma_{x_i}^- = \sigma_{x_{i-1}}^+.$$

3. Процедура анализа информации и принятия решения на Земле о коррекции хода проведения эксперимента влияет на дисперсию контролируемого процесса, причем для простоты принимается линейный закон ее изменения в зависимости от объема поступившей информации (эквивалентной величине уменьшения энтропии) в ходе i -ого прохождения НЦКУ

$$\sigma_{x_i}^+ = \sigma_{x_i}^- - K \Delta H_i^-, \quad (7)$$

где $\sigma_{x_i}^-$ - величина СКО результатов экспериментов на этапе от $(i-1)$ -ого до i -ого прохождения над НЦКУ до очередного анализа хода проведения эксперимента и выработки управленческого решения; K - эмпирический коэффициент, учитывающий объем информации и квалификацию специалистов НЦКУ;

$\sigma_{x_i}^+$ - величина СКО результатов экспериментов после выработки управленческих решений.

4. Передача информации на АМКП с целью коррекции хода экспериментов осуществляется с запаздыванием во время последующего прохождения НЦКУ (при этом в зависимости от возможностей НЦКУ она может быть совмещена с процессом передачи на Землю нового объема информации для анализа).

На этом цикл изменения и управления энтропией завершается. Для следующего

цикла (который становится текущим) начальными значениями энтропии H_{i-1}^+ и СКО

$\sigma_{x_{i-1}}^+$ будут являться результаты предыдущего цикла H_i^+ и $\sigma_{x_i}^+$.

Для сравнительного анализа эффективности возможных схем организации контроля и управления экспериментами предлагается использовать следующий критериальный базис:

- максимальный достигнутый уровень энтропии к текущему моменту времени I_{\max} (этот показатель важен для оперативного контроля за ходом проведения эксперимента в реальном масштабе времени и характеризует текущее качество процесса оперативного управления научными экспериментами);

- интегральная величина накопленной энтропии на всем интервале полета I_{Σ} (этот критерий позволяет оценить качество информации об эксперименте, полученной за все время полета КА, что важно при послеполетной обработке информации).

Чтобы оценить эффективность процесса контроля и управления экспериментами и сформировать рекомендации по его организации при использовании НЦКУ, рассмотрены различные схемы привлечения действующих в настоящее время наземных станций контроля и управления полетом КА. При этом моделировалась траектория полета АМКП «Фотон-М» (наклонение орбиты КА 62,8 град.; высоты апогея и перигея, соответственно, 304 км и 262 км), рассчитывались трассы орбиты, анализировались условия видимости и определялись моменты входа и выхода из зон видимости НЦКУ с заданными географическими координатами и углами наблюдения.

В качестве организационных схем контроля и управления полетом рассматривались следующие варианты привлечения НЦКУ:

- 1 вариант – НЦКУ в г. Кируна (Швеция)-прием и передача научной информации;
- 2 вариант – НЦКУ в г. Кируна (Швеция) – прием и передача научной информации;

Таблица 2
Максимальные значения энтропии на всем интервале полета

Номер варианта	Схема управления	Максимальные значения энтропии, бит сек	Процентное соотношение
1 вариант	Москва + Кируна	$1,98 \cdot 10^5$	100
2 вариант	Москва + Кируна + Перт	$1,08 \cdot 10^5$	54
3 вариант	Москва + Кируна + Самара	$1,67 \cdot 10^5$	84
4 вариант	Москва + Кируна + Перт + Самара	$0,74 \cdot 10^5$	37
Без контроля	—————	$2,3 \cdot 10^5$	—

г. Перт (Австралия) - прием и передача научной информации;

3 вариант – НЦКУ в г. Кируна (Швеция) – прием и передача научной информации;

г. Самара – прием научной информации;

4 вариант – НЦКУ в г. Кируна (Швеция) – прием и передача научной информации;

г. Перт (Австралия) - прием и передача научной информации;

г. Самара – прием научной информации.

Во всех вариантах считалось, что НЦКУ в г. Москве используется только для приема и передачи служебной информации.

В случае отсутствия возможности контроля за ходом проведения экспериментов (как это было до запуска АМКП «Фотон» № 12) оценка величины накопленной энтропии составляет ориентировочно $2,3 \cdot 10^5$ бит.

Результаты моделирования процесса полета АМКП «Фотон-М» и изменения энтропии процесса проведения экспериментов для различных вариантов приведены в таблицах 2 и 3 и показаны на диаграммах (рис. 3, 4). На рис. 5 изображены циклограммы

прохождения АМКП над НЦКУ в первые сутки полета.

Сравнивая циклограммы для первого и второго вариантов схемы контроля и управления экспериментами, можно сделать вывод о более частом и равномерном распределении сеансов связи на траектории полета при привлечении НЦКУ г. Перт, что является предпочтительным.

В случае использования НЦКУ в г. Самаре (третий и четвертый варианты) наблюдается перекрытие зон видимости АМКП с НЦКУ г. Кируна и г. Самары, что не позволяет получить эффект, аналогичный тому, что достигается при использовании НЦКУ г. Перт.

Первый вариант схемы контроля и управления экспериментами, который был реализован во время полета АМКП «Фотон» № 12 и который предполагалось осуществить на «Фотон-М» № 1, принят за базовый для выполнения сравнительного анализа эффективности, и поэтому соответствующие значения оцениваемых характеристик принимались за 100 %.

Из сравнения вариантов 1 и 2 можно сделать вывод, что включение в организаци-

Таблица 3
Интегральные значения энтропии на всем интервале полета

Вариант	Схема управления	Интегральные значения энтропии, бит -сек	Процентное соотношение
1 вариант	Москва + Кируна	$12,8 \cdot 10^9$	100
2 вариант	Москва + Кируна + Перт	$2,6 \cdot 10^9$	20
3 вариант	Москва + Кируна + Самара	$4,6 \cdot 10^9$	35
4 вариант	Москва + Кируна + Перт + Самара	$1,7 \cdot 10^9$	13
Без контроля	—————	$15 \cdot 10^{13}$	—

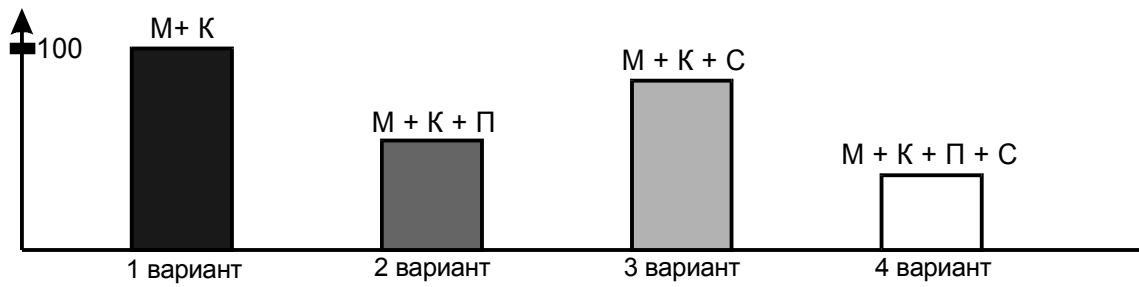


Рис. 3. Сравнительный анализ достигаемых максимальных уровней энтропии на всем интервале полета

онную схему обеспечения полета НЦКУ в г. Перт является весьма эффективным решением с точки зрения понижения энтропии: максимальное значение энтропии снижается на 46 %, а интегральное значение энтропии – на 80 %. Организационная схема является весьма привлекательной с точки зрения снижения информационной неопределенности и может значительно повысить уровень качества контроля за проведением экспериментов в течение полета АМКП и уровень сервиса, предоставляемый заказчикам научных экспериментов. Однако стоимость включения в организационную структуру НЦКУ в г. Перт весьма велика и требует значительных финансовых вложений со стороны Европейского космического агентства.

В случае модернизации Самарского наземного центра приема служебной информации из космоса, дооснащения его оборудованием для приема научной информации (без функции передачи информации в целях сокращения стоимостных издержек) и придания ему функции НЦКУ с включением в штатную схему обеспечения научных экспериментов в космосе появляется дополнительная возможность использовать его в орга-

низационной структуре информационного обмена при проведении научных экспериментов. За счет совершенствования специализированной телекоммуникационной поддержки, базирующейся как на наземных, так и на спутниковых информационных сетях и современном программном обеспечении, эти преимущества могут быть существенно увеличены.

В случае использования НЦКУ в г. Кирюна и г. Самаре уровень максимального значения энтропии снижается на 16 %, а интегрального значения энтропии – на 65 %. Эффективность использования НЦКУ в г. Самаре значительно ниже, чем в г. Перт из-за географической близости городов Самара и Кирюна и частичного перекрытия зон видимости на орбите. Однако необходимо учитывать, что может быть достигнуто повышение надежности получения информации в результате интегрированной работы двух центров.

В случае использования всех рассматриваемых НЦКУ (четвертый вариант) степень информационной неопределенности снижается существенно: уровень максимального значения энтропии снизится на 63 %, а интегральное значение энтропии - на 87 %.

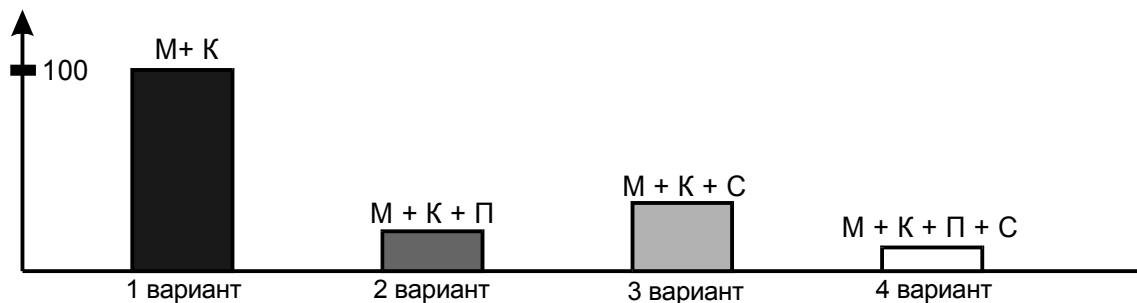
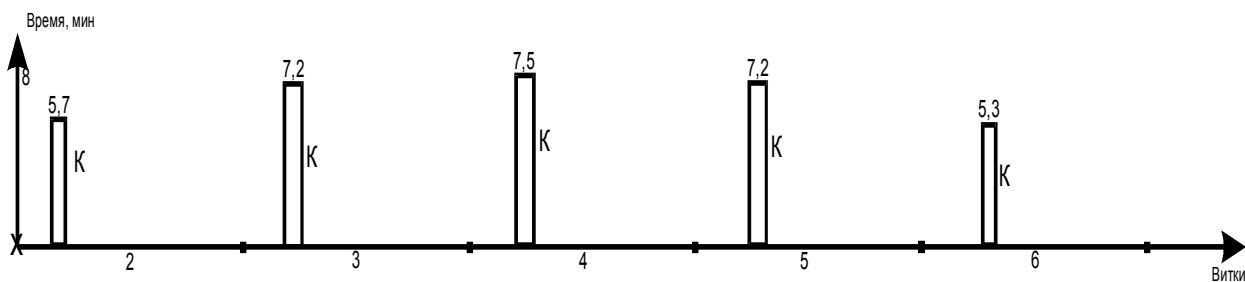
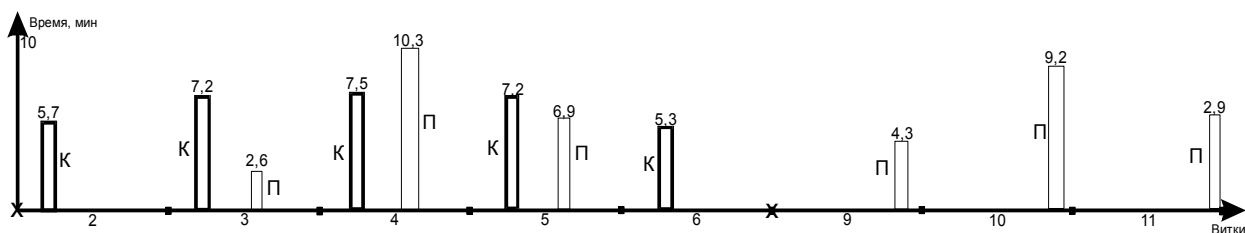


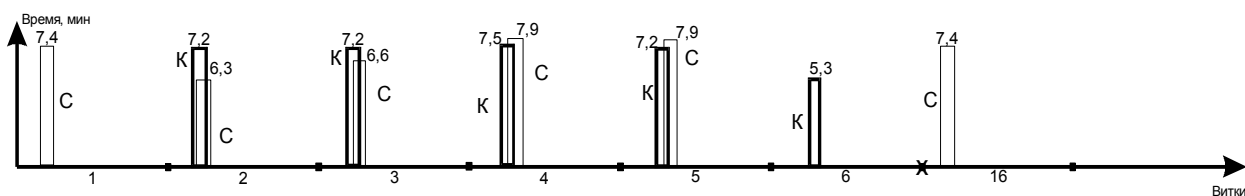
Рис. 4. Сравнительный анализ достигаемых интегральных значений энтропии на всем интервале полета



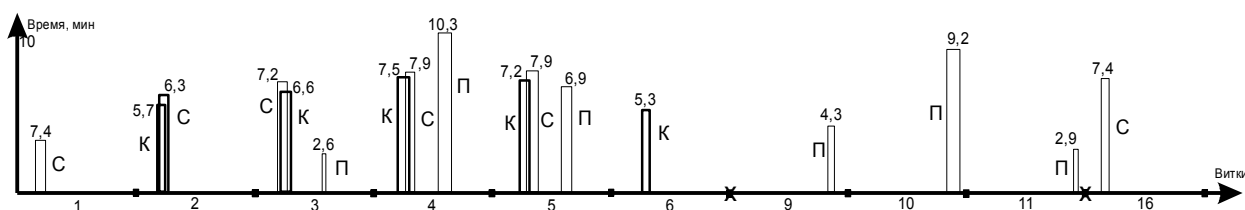
а) для первого варианта



б) для второго варианта



в) для третьего варианта



г) для четвертого варианта

Рис. 5. Циклограммы пролета НЦКУ

Таким образом, привлечение дополнительных НЦКУ для контроля и управления ходом проведения экспериментов существенно снижает степень информационной неопределенности и повышает их качество. Особенно эффективным для понижения энтропии является дополнительное включение в организационную схему обеспечения полета НЦКУ г. Перта. При этом в сравнении с базовым, используемым в настоящее время

вариантом, обеспечивается снижение почти вдвое максимального значения энтропии (что крайне важно для оперативного управления ходом проведения экспериментами), а интегральное значение энтропии снижается в пять раз (что характеризует высокий уровень достоверности получаемых результатов).

Инновационное организационно-техническое решение, заключающееся в модернизации Самарского наземного центра при-

ема служебной информации из космоса (дооснащение аппаратурой, совместимой с бортовой научной аппаратурой заказчика экспериментов), и придании ему функции НЦКУ (без функции передачи на борт АМКП управляющих команд), оказывает заметное влияние на качество предоставляемых услуг при проведении экспериментов в космосе по сравнению с базовым вариантом. По сравнению с базовым вариантом максимальное значение энтропии снижается на 16 %, а интегральное значение энтропии – на 65 %.

Полученные результаты, дополненные финансовой оценкой величины требующихся капитальных вложений на модернизацию Самарского центра, могут составить основу бизнес-плана для Европейского космического агентства по финансированию практической реализации предлагаемого организационно-технического решения. На основании разработанных универсальных методики и моделей могут быть проанализированы и другие варианты и схемы контроля и управ-

ления экспериментами на космических аппаратах.

Список литературы

1. Авдеевский В. С., Успенский Г. Р. Народнохозяйственные и научные комплексы. М: Машиностроение, 1985. - 416 с.
2. G. E. Fomin. Modified Foton SC: outlooks of its application. Proceedings of the International Conference “Scientific and Technological Experiments on Russian Foton/Bion Recoverable Satellites: Results? Problems and Outlooks” (25-30 June 2000, Samara, Russia), Samara, 2001-409 pp.
3. Питер Э., Бо Е. Логика управления аппаратурой «Телесайенс». //Шведская космическая корпорация, 2001. - 31 с.
4. Росин М. Ф., Булыгин В. С. Статистическая динамика и теория эффективности систем управления. М.: Машиностроение, 1981. – 312 с.
5. Смирнов Г. Д. Управление космическими аппаратами. М.: Наука, 2001. – 192 с.

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF CONTROLLING SCIENTIFIC EXPERIMENTS AT AUTONOMOUS MICROGRAVITATIONAL SPACE PLATFORMS

© 2004 I. V. Belokonov, I. V. Kozlov

Samara State Aerospace University

A mathematical model is proposed making it possible to analyse and estimate the efficiency of a new kind of space services – control and supervision over scientific experiments at autonomous microgravitational space platforms (AMSP). The efficiency of carrying out a scientific experiment is characterized by the degree of its uncertainty, i. e. entropy. Criteria are recorded making it possible to compare different versions of organizing control and supervision over experiments. They are distinguished by attracting the currently available ground-based centres of the “Photon” / “Bion” which can receive and transmit information to AMSP. Conclusions are made concerning the efficiency of standart version of organizing experiments at AMSP, recommendations on the use and further development of Samara information receiving ground-based centre are given.