

**Разработка методов конструирования  
и математического обеспечения технической бортовой  
системы для поддержания работоспособности  
космонавтов в условиях обитаемой лунной базы**

© М.С. Баранов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет), Москва, 125993, Российская Федерация

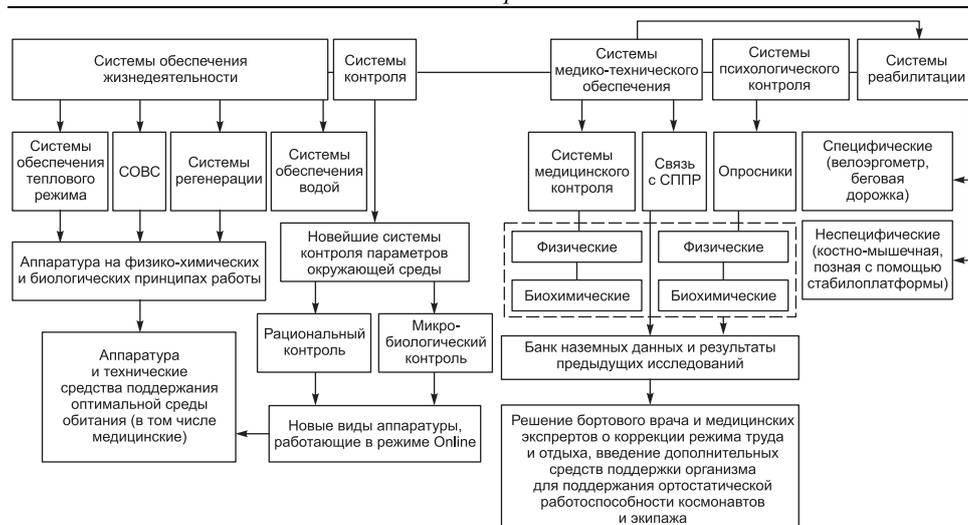
*Рассмотрена актуальность применения бортовой технической системы для поддержания ориентации в пространстве в условиях измененной гравитации и для реабилитации космонавтов при возвращении на Землю. Система медико-технического обеспечения космических полетов является частью комплекса систем жизнеобеспечения и служит для нормальной жизнедеятельности членов экипажа. Поскольку с изменением силы тяжести нарушается согласованное взаимодействие сенсорных систем, обеспечивающих процесс двигательного управления, возникают значительные сдвиги в состоянии исполнительного мышечного аппарата человека. Возникает задача проведения реабилитационных мероприятий. Разработка нетвердой опоры, благодаря новой конструкции и материалам, позволит повысить эффективность восстановления работоспособности членов экипажа.*

**Ключевые слова:** *пилотируемые полеты, лунная база, работоспособность, конструкция, математическое обеспечение*

**Введение.** Измененная гравитация в условиях обитаемой лунной базы приводит к потере активной работоспособности человека, что особенно опасно при выполнении задач в условиях неопределенности и в экстремальных ситуациях [1–3]. Средств для адаптации и реабилитации в условиях обитаемой лунной базы не существует на сегодняшний день. В данной работе предлагается новый комплекс для поддержания ориентации в неблагоприятных условиях космического полета и для режима реабилитации при возвращении на Землю [4–6].

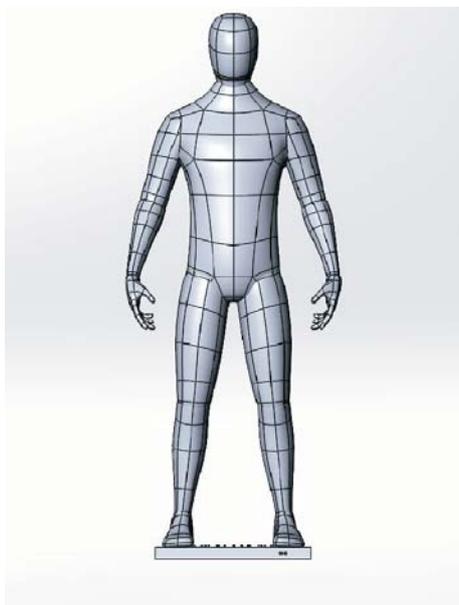
Без систем реабилитации, являющихся частью системы медико-технического обеспечения, которая входит в состав проектирования и конструкции летательных аппаратов, программа освоения Луны и межпланетных пилотируемых полетов невозможна (рис. 1).

Цель работы — разработка методов конструирования и математического обеспечения технической бортовой системы для поддержания работоспособности космонавтов в условиях измененной гравитации.



**Рис. 1.** Система медико-технического обеспечения как часть аванпроекта лунной базы

**Конструкция технической бортовой системы.** На основании исследований, посвященных выявлению двигательных нарушений в условиях микрогравитации, для которых доказана важная роль опорной афферентации в механизмах управления позной активностью, требуется разработать конструкцию методом стандартизации и математическое обеспечение технической бортовой системы, применимой для экипажа в условиях обитаемой лунной базы (рис. 2).



**Рис. 2.** Испытуемый на технической бортовой системе

Мягкая опора помогает создать новый принцип эффекта памяти стопы (рис. 3) с учетом так называемого треугольника опоры. Правило треугольника опоры стопы гласит, что при оптимальной нагрузке на стопу масса тела распределяется между тремя точками, расположенными в треугольнике стопы (рис. 4).

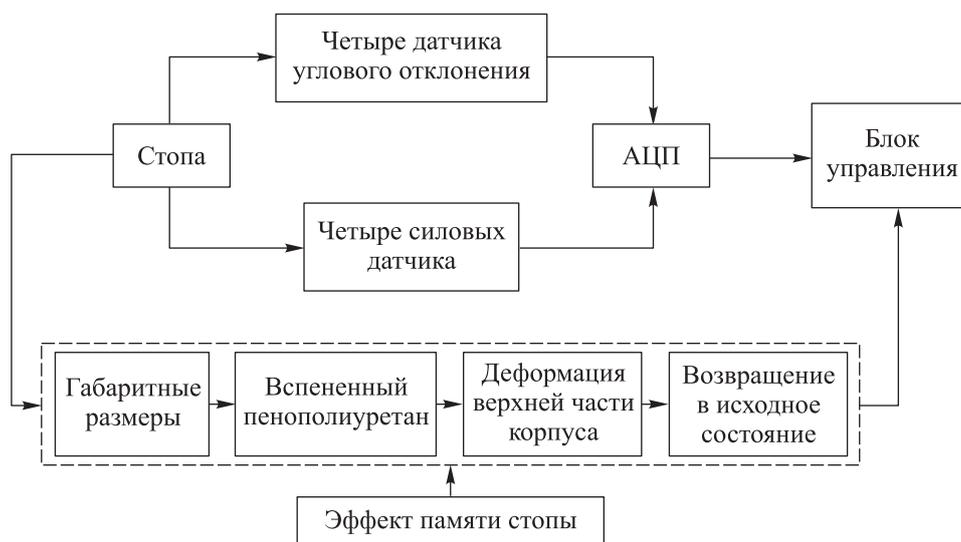


Рис. 3. Блок-схема обработки данных и эффекта памяти со стопы испытуемого

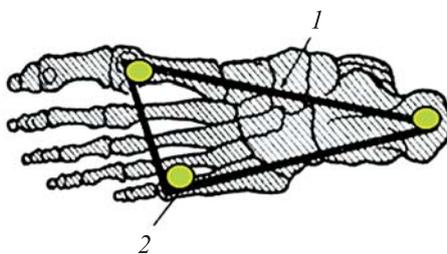
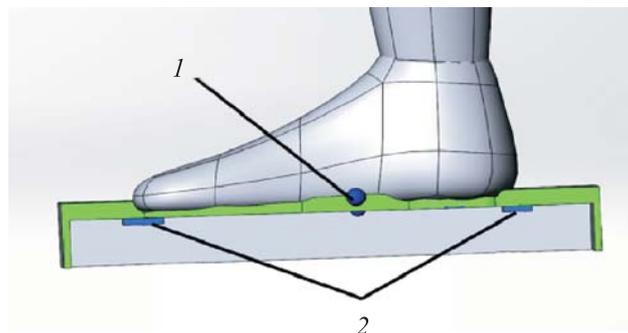


Рис. 4. Треугольник стопы:

1 — опорный треугольник; 2 — сенсоры, считывающие габаритные размеры стопы

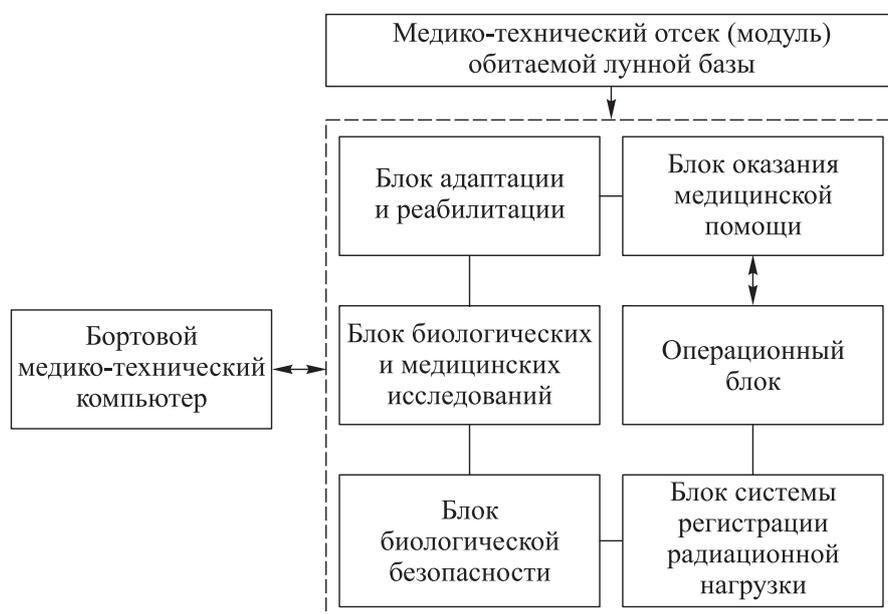
Стопа выполняет несколько функций. Для космонавтов в условиях измененной гравитационной нагрузки самая значимая функция — опорная, позволяющая стопе формировать опору для тела человека, противодействуя вертикальной нагрузке массы тела. Это самая сложная функция стопы, так как используется способность к балансировке на технической бортовой системе (рис. 5). Угловые датчики регистрируют отклонения центра тяжести космонавта, силовые — центр давления стоп.



**Рис. 5.** Расположение стопы на внешнем корпусе технической бортовой системы:

1 — датчики угловых отклонений; 2 — силовые датчики

В медико-техническом отсеке обитаемой лунной базы (рис. 6) будет расположена бортовая техническая система (рис. 7) для поддержания работоспособности космонавтов. В процессе адаптации к программным тренировкам на обитаемой лунной базе с измененной гравитацией информация о работоспособности космонавтов будет храниться в бортовом медико-техническом компьютере. Данная аппаратура может применяться для реабилитации космонавтов при возвращении на Землю.



**Рис. 6.** Медико-технический отсек в условиях обитаемой лунной базы



Рис. 7. Техническая бортовая система

Массогабаритные характеристики бортовой технической системы приведены ниже:

Ширина, мм .....	300
Высота, мм .....	40
Длина, мм .....	300
Частота дискретизации, Гц .....	1024

**Алгоритм обеспечения биологической обратной связи технической бортовой системы с эффектом памяти стопы.** Узел биологической обратной связи бортовой технической системы с эффектом памяти стопы (рис. 8) посредством сенсомоторной деятельности заставляет космонавта корректировать положение центра тяжести. Только после получения эпюры правильного положения центра тяжести космонавт может перейти к выполнению теста на работоспособность.

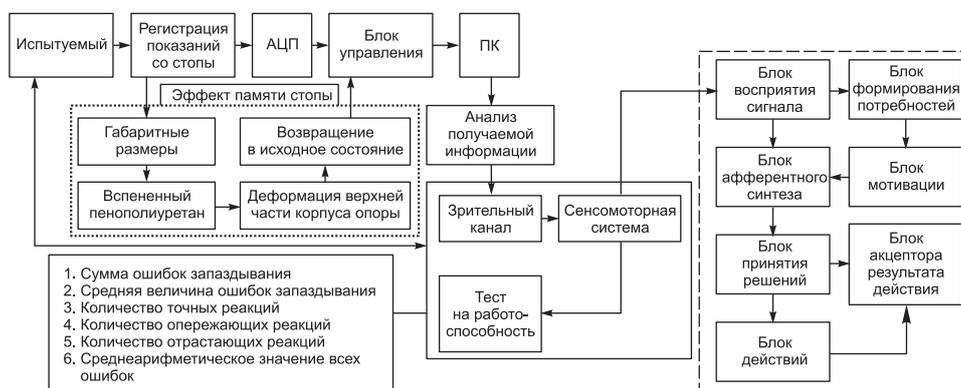


Рис. 8. Алгоритм обеспечения биологической обратной связи технической бортовой системы с эффектом памяти стопы

Регистрация показания со стопы поступает на блок компьютера через блок управления, после чего испытуемому предоставляется информация о положении его центра тяжести для дальнейшей корректировки с помощью технической бортовой системы. После отображения на экране монитора информации, получаемой через зрительный канал, начинает работать сенсомоторная система человека. Сенсорный сигнал поступает через анализатор в блок восприятия сигналов и там трансформируется, кодируясь в сигнал нервного импульса, поступающий в блок афферентного синтеза, где создается цель будущей сенсомоторной деятельности. Поступление сигнала в этот блок идет по двум путям. После поступления сигнала из блока восприятия сигналов в блок формирования потребностей формируются информационные сигналы, имитирующие возникновение потребностей при работе мозга. Значения отклонений переменных от нормального уровня передаются в блок мотиваций. Элементы блока мотиваций взаимодействуют таким образом, что возбуждение одного элемента (определенного сенсорного сигнала) ослабляет возбуждение других, с которыми он соединен. Данный элемент становится доминирующим и генерирует возрастающий по амплитуде сигнал, поступающий в блок афферентного синтеза. Затем начинается информационный процесс, имитирующий проигрывание возможных вариантов будущих двигательных действий и их результатов, в блоке принятия решений, где происходит выбор траектории достижения результата, т. е. соответствующего заданному сигналу двигательного действия. Модель этого будущего действия отражается в элементах памяти блока акцептора результатов действия. После совершения двигательных действий сигналы об их параметрах передаются из блока действий в блок акцептора результатов действия, в результате чего происходит оценка соответствия выполненного действия заданному сенсорному сигналу [7–10].

**Математическое обеспечение, позволяющее проводить новые реабилитационные мероприятия.** В разработанном математическом обеспечении используются три математических метода в определенном алгоритме для адапционно-реабилитационного процесса (рис. 9). Метод Гильберта — Хуанга и метод ковариации запускаются одновременно, в результате чего строится эпюра правильного положения центра тяжести (ЦТ) космонавта и определяется угол отклонения. Если этот угол превышает максимальное значение, процесс запускается заново, так как есть риск получения травмы стопы. В противном случае начинается идентификация математической модели методом Прони.

Для того чтобы провести частотно-временной анализ стабิโลграммы, строится спектр Гильберта (рис. 10), с помощью которого функции дают мгновенные частоты как функции времени. Обоснованность применения данного метода заключается в обработке всех типов данных.

Мгновенная частота определяется как отношение

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt}, \quad (1)$$

где  $\theta_i(t)$  — фаза сигнала;  $t$  — время.

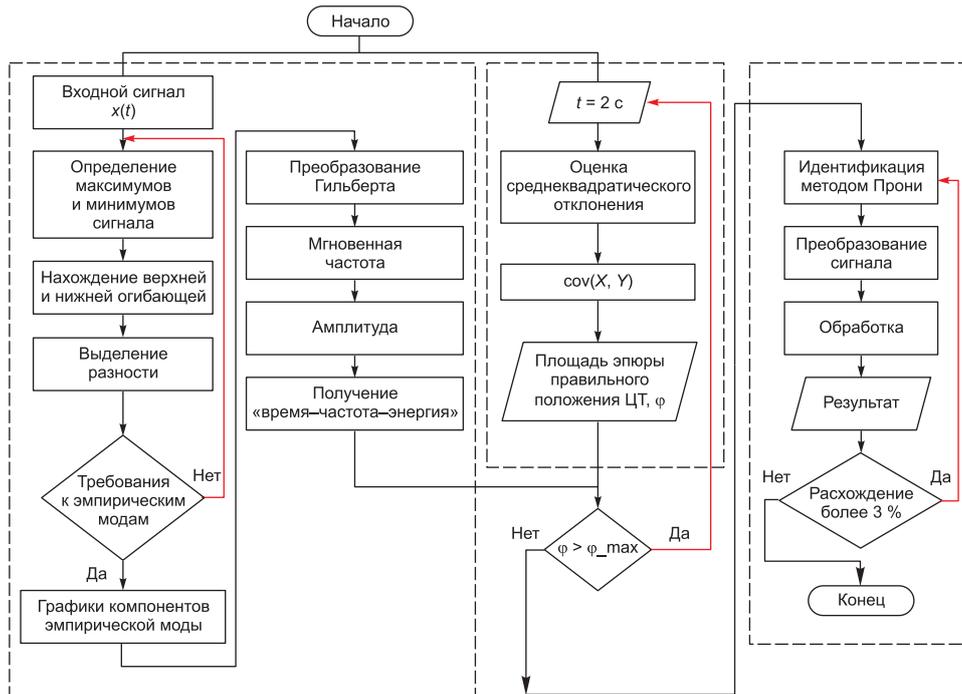


Рис. 9. Математическое обеспечение технической бортовой системы

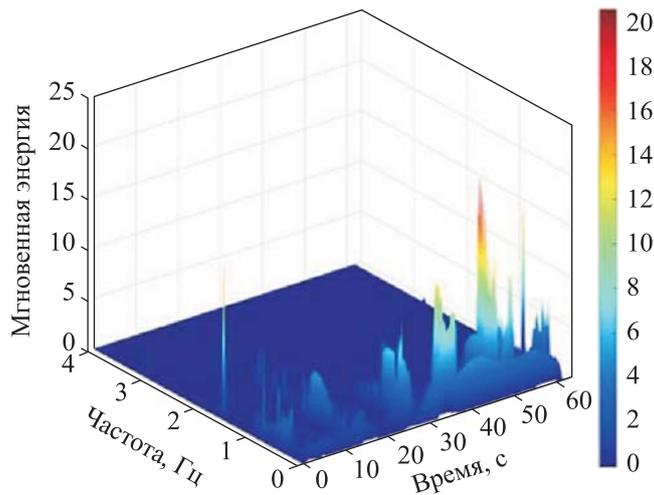


Рис. 10. Спектр Гильберта «Энергия—частота—время»

Координаты центра давления в момент времени  $t_i$  обозначаются через  $X_i$  и  $Y_i$ . Программное обеспечение вычисляет следующие параметры, которые будут применены при анализе движений. Оценка смещения центра давления  $(M(X), M(Y))$  — среднее значение положения центра давления по фронтали и сагиттали соответственно. Смещения определяют центр облака отсчетов кривой стабиллограммы и характеризуют изменения координат центра давления в процессе проведения обследования после предварительной центровки. Центрирование — совмещение положения центра давления человека с началом координат или вычитание из координат центра давления некоторых констант. Эти константы определяются как усредненные значения координаты центра давления на интервале времени 2 с, заданном экспериментально в программе. Разброс  $\sigma$  — оценка среднеквадратического отклонения центра давления по соответствующему направлению относительно смещения:

$$\sigma_x = \sqrt{D(X)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M(X))^2}, \quad (2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{D(Y)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - M(Y))^2}, \quad (3)$$

где  $D(X)$ ,  $D(Y)$  — дисперсия соответствующей компоненты;  $N$  — число отсчетов в эксперименте;  $M(X)$ ,  $M(Y)$  — среднее значение положения центра давления по фронтали и сагиттали соответственно.

Затем вычисляется оценка ковариации:

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - M(X))(Y_i - M(Y)), \quad (4)$$

площадь эпюры правильного положения центра тяжести:

$$S = 2 \ln \frac{1}{1-\beta} \sqrt{D(X)D(Y) - \text{cov}(X, Y)^2}, \quad (5)$$

где  $\beta$  — вероятность попадания точки статокинезиограммы в эпюры правильного положения центра тяжести ( $\beta = 0,9$ ).

Иными словами,  $S$  — это основная часть площади, занимаемой статокинезиограммой без случайных выбросов. Эта величина характеризует рабочую площадь опоры человека, после которой испытуемый выполняет тест на работоспособность — «реакция на движущийся объект». При расчете площади эпюры правильного положения

центра тяжести предполагается, что координаты центра давления распределены по нормальному случайному закону (рис. 11).

На графике, представленном на рис. 12, показаны две кривые: желтым цветом обозначено предполагаемое отклонение центра тяжести космонавта, синим — экспериментальная кривая отклонения центра тяжести космонавта:

$$y(t) = Ae^{-\lambda t} \cos(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

где  $y(t)$  — мгновенная амплитуда в момент времени  $t$ ;  $A$  — начальная амплитуда огибающей;  $\lambda$  — скорость затухания;  $\varphi$  — фазовый угол при  $t = 0$ ;  $\omega$  — угловая частота.

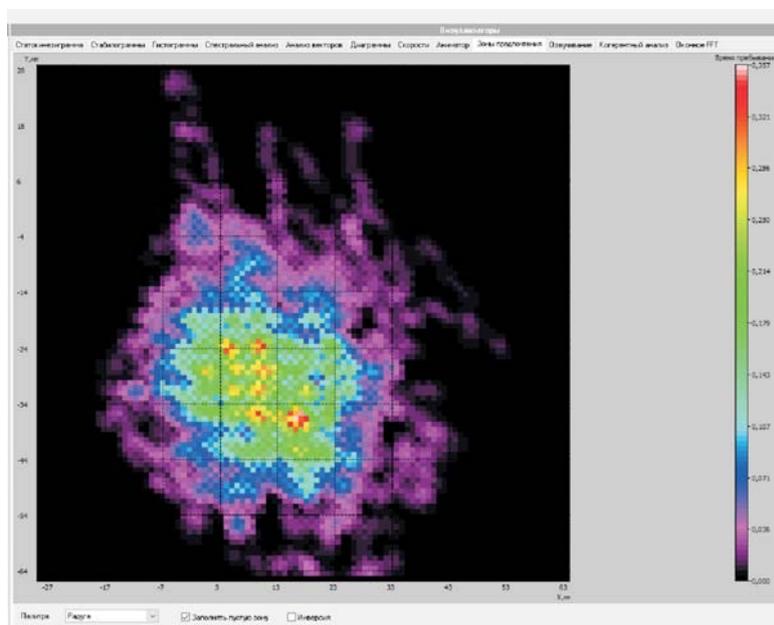


Рис. 11. Эпюра правильного положения центра тяжести (результаты статокинезиограммы на лабораторном образце)

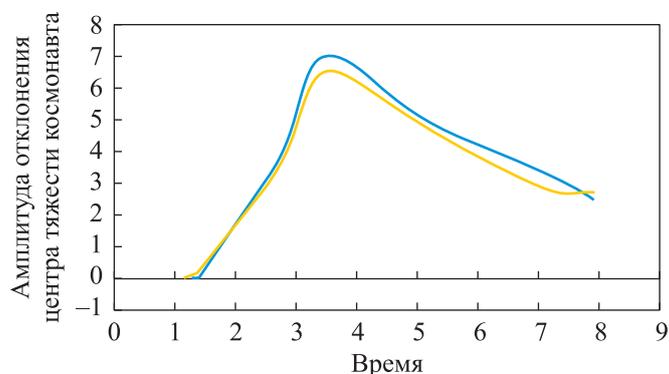


Рис. 12. Идентификация математической модели

Расхождение теоретической и экспериментальной кривой не более 3 %, что является допустимой погрешностью.

**Заключение.** Проведен эксперимент по контрольной оценке восстановления работоспособности на лабораторном образце технической бортовой системы с биологической обратной связью. Получено правильное положение центра тяжести человека внутри эпюры, что можно квалифицировать как теоретическое обобщение и решение научной задачи разработки конструкции и математического обеспечения. Впереди большая совместная работа с физиологами, врачами и специалистами в области космической и адаптационной реабилитационной деятельности. Данное направление в настоящее время востребовано и в пилотируемой космонавтике, и в наземных исследованиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баранов М.С., Строгонова Л.Б. Методы математического моделирования при определении положения центра тяжести с учетом перераспределения крови в нижних конечностях у космонавтов в эксперименте «СТАБИЛЮ». *Научно-технический вестник Поволжья*, 2022, № 6, с. 9–12.
- [2] Строгонова Л.Б., Васин Ю.А., Баранов М.С., Сафронова К.П. Структура системы поддержки принятия решений (СППР) для медико-технического обеспечения обитаемой лунной базы. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2023, № 6, с. 114–117.
- [3] Афоничев Н.К., Баранов М.С., Васин Ю.А.. Применение методов математического моделирования при определении методов положения трехглавой мышцы голени космонавтов в условиях измененной гравитации. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2023, № 6, с. 34–37
- [4] Строгонова Л.Б., Баранов М.С., Васин Ю.А. К вопросу выбора методов математической обработки сигналов, применяемых в системе реабилитации с биологической обратной связью в условиях измененной гравитации. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2024, № 3, с. 59–61.
- [5] Норов Р.З., Строгонова Л.Б., Баранов М.С. Математическое моделирование кровоснабжения космонавта в реабилитационном периоде. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2025, № 4, с. 80–84.
- [6] Строгонова Л.Б., Васин Ю.А., Гардуньо Р.А., Князев А.Н. Стандартизация аппаратуры и методик медицинского контроля в пилотируемых космических полетах и вопросы телемедицины. *Качество и жизнь*, 2020, № 1 (25), с. 45–53. DOI: 10.34214/2312-5209-2020-25-1-45-53
- [7] Князев А.Н., Строгонова Л.Б., Литвина Д.В. Система поддержки принятия решений для повышения качества медицинского контроля в межпланетных пилотируемых космических полетах. *Качество и жизнь*, 2017, № 3 (15), с. 33–40.
- [8] Литвина Д.В., Строгонова Л.Б., Гуцин В.И. Вопросы качества обработки и анализа психофизических исследований для предупреждения чрезвычайных ситуаций в условиях моделирования длительного космического полета. *Качество и жизнь*, 2016, № 3, с. 36–38.
- [9] Строгонова Л.Б., Колотева М.И. Проблемы создания искусственной силы тяжести для пилотируемых космических объектов. *Качество и жизнь*, 2016, № 4 (12), с. 401–407 (Научные труды академии проблем качества).

- [10] Shevchenko I.V., Rogalev A.N., Shevchenko M.I., Strogonova L.B., Yaropolov V.I. Application of additive laser technologies for full-scale modeling in the design of cooled gas turbine blades. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, no. 11, vol. 9, pp. 2097–2105.

Статья поступила в редакцию 21.07.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Баранов М.С. Разработка методов конструирования и математического обеспечения технической бортовой системы для поддержания работоспособности космонавтов в условиях обитаемой лунной базы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 9. EDN TMLOCJ

**Баранов Максим Сергеевич** — аспирант, старший преподаватель кафедры «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности», Московский авиационный институт. e-mail: maxibar@list.ru

## **Development of methods for the design and mathematical support of an on-board technical system to maintain the efficiency of astronauts in the conditions of a habitable lunar base**

© M.S. Baranov

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, 125993, Russian Federation

*The paper discusses the relevance of using an onboard technical system for maintaining spatial orientation in altered gravity conditions and for rehabilitation upon return to Earth. The spaceflight medical and technical support system is part of the life support system complex and serves to ensure the normal functioning of crew members. In connection with the change of gravity, the coordinated interaction of sensory systems providing motor control process is disrupted, significant shifts occur in the state of the executive muscular apparatus. The task of conducting rehabilitation activities arises. The design of the support, thanks to the new design and materials, will improve the efficiency of recovery.*

**Keywords:** *manned flights, lunar base, workability, design, mathematical support*

### REFERENCES

- [1] Baranov M.S., Strogonova L.B. Methods of mathematical modeling in determining the position of the center of gravity with considering blood redistribution in the lower limb of cosmonauts in the “STABILO” experiment. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2022, no. 6, pp. 9–12.
- [2] Strogonova L.B., Vasin Yu.A., Baranov M.S., Safronova K.P. The structure of the decision support system (DSS) for medical and technical support of the inhabited lunar base. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2023, no. 6, pp. 114–117.
- [3] Afonichev N.K., Baranov M.S., Vasin Yu.A. Application of methods of mathematical modeling in determining the methods of positioning the triceps muscle of the leg of astronauts in conditions of altered gravity. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2023, no. 6, pp. 34–37.
- [4] Strogonova L.B., Baranov M.S., Vasin Yu.A. Review of methods of mathematical signal processing applied in a non-solid support with biological feedback in conditions of an inhabited lunar base. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, 2024, no. 3, pp. 59–61.
- [5] Norov R.Z., Strogonova L.B., Baranov M.S. Mathematical modeling of blood supply to the astronaut in the rehabilitation period. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2025, no. 4, pp. 80–84.
- [6] Strogonova L.B., Vasin Yu.A., Garduño R.A., Knyazev A.N. Standardization of equipment and methods of medical control in manned space flights and issues of telemedicine. *Quality and Life*, 2020, no. 1 (25), pp. 45–53. DOI: 10.34214/2312-5209-2020-25-1-45-53
- [7] Knyazev A.N., Strogonova L.B., Litvina D.V. Decision support system for improving the quality of medical control in interplanetary manned space missions. *Quality and Life*, 2017, no. 3(15), pp. 33–40.

- [8] Litvina D.V., Strogonova L.B., Gushchin V.I. Quality issues of processing and analysis of psychophysical studies for emergency prevention in long-duration spaceflight simulation. *Quality and Life*, 2016, no. 3, pp. 36–38.
- [9] Strogonova L.B., Koloteva M.I. Problems of creation of artificial gravity for the piloted space objects. *Quality and life*, 2016, no. 4 (12), pp. 401–407 (Scientific Papers of Academy of Quality Problems).
- [10] Shevchenko I.V., Rogalev A.N., Shevchenko M.I., Strogonova L.B., Yaropolov V.I. Application of additive laser technologies for full-scale modeling in the design of cooled gas turbine blades. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, no. 11, vol. 9, pp. 2097–2105.

**Baranov M.S.**, postgraduate student, senior lecturer of the Department “Ecology, Life Support Systems and Life Safety”, MAI. e-mail: maxibar@list.ru