



Система поддержки принятия решений для повышения качества медицинского контроля в межпланетных пилотируемых космических полетах



А.Н. Князев

заведующий
терапевтическим
отделением
Клинико-
диагностического
центра ФГБУ ФКЦ
ВМТ ФМБА России;
Москва



Л.Б. Строгонова

профессор
Московского
авиационного
института (НИУ);
Москва

e-mail:
buksan@list.ru

Д.В. Литвина

соискатель кафедры 614 МАИ НИУ; Москва

Аннотация. В пилотируемом космическом полете на космонавтов действует множество негативных факторов: невесомость, радиация, психологические компоненты и др. За долгую практику орбитальных полетов была разработана система медицинского контроля космонавтов, которая включает в себя совокупность методов и методик оценки текущего состояния здоровья космонавта и предотвращения развития опасных состояний и заболеваний. Для обеспечения безопасности длительных космических полетов к другим планетам и предотвращения чрезвычайных ситуаций на борту космических аппаратов необходимо пересмотреть и усовершенствовать существующую систему медицинского обеспечения космонавтов, разработанную для орбитальных полетов. Автономный характер межпланетной экспедиции потребует иного подхода в медицинском обеспечении полетов, в том числе из-за задержки связи с ЦУПом. Экипаж будет вынужден взять на себя принятие решений в чрезвычайных ситуациях, требующих этого в данный момент времени. Система поддержки принятия медицинского решения для ранней диагностики опасных состояний и заболеваний позволит увеличить безопасность полета к планетам.

Для разработки медицинской бортовой системы поддержки принятия решения (СППР) необходимо учесть ряд особенностей, присущих характеру медицинских данных, которые усложняют задачу. При этом медицинские параметры становятся начальными и граничными условиями для создания и адаптации алгоритмов функционирования системы. Особый интерес представляет СППР для сердечно-сосудистых заболеваний, система испытана в клинических условиях.

Ключевые слова: теория принятия решения; чрезвычайная ситуация; наивный байесовский классификатор; длительный космический полет.

Введение

В комплексе мероприятий, обеспечивающих безопасность экипажа в длительных космических полетах (ДКП), медицинский контроль состояния космонавтов является одной из основных систем. Космические полеты сопровождаются рядом закономерно возникающих изменений в организме человека, также может иметь место развитие неблагоприятных состояний, связанных с работой космонавтов и нарушением функционирования систем жизнеобеспечения или с другими аварийными и нештатными ситуациями. Кроме этого в условиях космических полетов (КП) возможно развитие ряда заболеваний, что имело место в кратковременных и длительных полетах. Основной целью медицинского контроля является оценка здоровья космонавтов на всех этапах ДКП, выявление изменений функционального состояния организма космонавта, а также диагностика неблагоприятных состояний. Методики, используемые для МК на борту космического аппарата (КА) или космической станции, обусловлены не только потребностями в контроле физического состояния членов экипажа, а также ранней диагностики опасных состояний, но и техническим обеспечением и возможностями диагностических средств в условиях ДКП. Оптимальный баланс между диагностическими потребностями и медико-техническими возможностями достигается при помощи компромисса (рис. 1).



Рис. 1. Схема особенностей технических средств медицинского контроля

В ходе ДКП к другим планетам (например, к Марсу) возможно заболевание одного или нескольких членов экипажа, состояние может быть серьезным и лечение на борту будет осложнено ограниченными ресурсами. Как результат, заболевший космонавт не сможет выполнять свои профессиональные обязанности в рамках программы полета. Подобная ситуация серьезно подорвет шансы на успешное завершение программы полета, так как заболевание одного из космонавтов может привести к аварийной ситуации, которая несет угрозу здоровью или даже жизни членов экипажа, что является чрезвычайной ситуацией для полета в целом. На рис. 2 представлена схема развития чрезвычайной ситуации (ЧС).

В ходе космического полета особое внимание уделяется состоянию и функционированию сердечно-сосудистой системы; это выделено в отдельное направление – космическую кардио-

логию. Данный интерес обусловлен следующими факторами:

1. Система кровообращения настолько тесно связана с другими системами организма, что может рассматриваться в качестве универсального индикатора различных нарушений.

2. С точки зрения прогноза гемодинамические нарушения представляют наибольшую опасность в длительном космическом полете. Даже при наличии удовлетворительной компенсации переносимость различного рода нагрузок снижена. Особенную опасность представляют перегрузки во время возвращения на Землю после длительного пребывания в космосе в состоянии невесомости.

С учетом вышеизложенного для большей эффективности работы СППР следует учитывать параметры, отражающие работу сердечно-сосудистой системы, как наиболее страдающей в условиях невесомости. Возможно, этого будет достаточно для представления о состоянии здоровья космонавтов.

Особенности ранней диагностики нарушений работы сердечно-сосудистой системы

Переход от здоровья к болезни не является внезапным. Между этими двумя состояниями организма имеется ряд переходных состояний, кото-

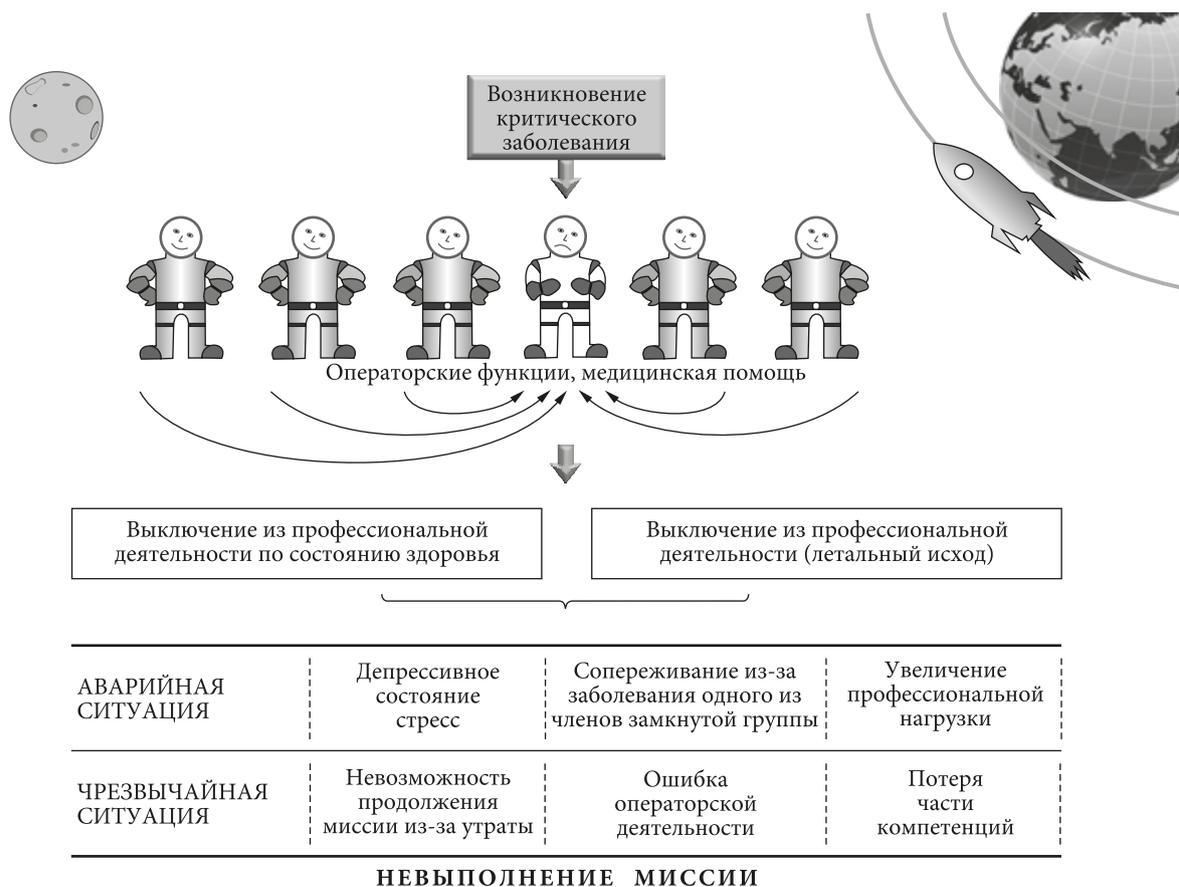


Рис. 2. Схема развития чрезвычайной ситуации в ходе длительного космического полета



рые в настоящее время получили название донозологических.

Особенно большой вклад в развитие современных представлений о донозологических состояниях внесла космическая медицина. Это обусловлено тем, что для характеристики функциональных состояний космонавта, возникающих в условиях космического полета, явно недостаточны только две оценочные категории «здоровье» и «болезнь». Современная медицина занимается в основном состояниями болезни, разрабатывая все более совершенные методы их диагностики и лечения. Здоровье, как объект исследований, является преимущественно прерогативой физиологов, поскольку врач, к сожалению, признает лишь наличие или отсутствие болезни.

Переход от здоровья к болезни является самой сложной теоретической и практической проблемой медицинской науки. От ее решения зависит вся организация здравоохранения и оказания медицинской помощи населению. До сих пор она решалась в рамках нозологического подхода: рассматривался один класс здоровых людей и множество классов заболеваний. Космическая медицина дала стимул развитию донозологического подхода, при котором рассматривается множество классов (уровней) здоровья и один класс – болезнь (как результат нарушения, срыва механизмов адаптации).

Однако необходимо модернизировать диагностические мероприятия МК, связанные с выявлением преинфарктных состояний. Масштабные перспективные исследования показали: даже небольшое повышение уровня кардиальных тропонинов у пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) связано с повышенным риском неблагоприятных событий со стороны сердечно-сосудистой системы. Это и привело к пересмотру диагностических критериев заболевания Всемирной организацией здравоохранения еще в 80-х годах 20 века. Новые критерии ИМ, наряду с другими диагностическими признаками, устанавливали, что «любая степень миокардиального некроза, вызванного ишемией, должна обозначаться как ИМ».

Поскольку одной из главных особенностей полета к другим планетам будет полная автономность корабля, невозможность незапланированного возвращения и ограниченность запасов пищи, воды, кислорода, оборудования и снаряжения, то весьма жесткие требования предъявляются и к системе медицинского контроля и прогнозирования состояния здоровья членов экипажа. Поэтому вычислительный комплекс марсианского корабля должен быть оснащен мощной медицинской информационной системой с блоками автоматизированной экспертной оценки данных и с подсистемой телемедицинской связи с наземными консультативными группами.

В межпланетной экспедиции кроме медицинской аппаратуры, способной давать точные результаты исследований в специфических условиях космического полета, на первый план выходит обеспечение полета СППР медицинского характера, так как задержка связи с ЦУПом может достигать значительного времени. В случае постановки диагноза объем медицинской информации может быть значителен, а время принятия решения мало. Для установки баланса между этими факторами требуются дополнительные мероприятия по разработке и внедрению специализированных средств поддержки бортового врача. Необходимо создать и исследовать автоматизированную систему прогнозирования медико-психологических экстремальных состояний человека для обеспечения безопасности профессиональной деятельности в экстремальных условиях ДКП.

Основываясь на обобщении предшествующего опыта, полученного в длительных космических полетах, проведенных исследованиях по проблеме медицинского обеспечения марсианской экспедиции и устоявшихся представлениях об автономности медицинского обеспечения, разработаны основные предварительные медицинские требования к диагностической экспертной системе для марсианской экспедиции (табл. 1)

В рамках медицинского обеспечения ДКП обрывается медицинская информация в виде диагностических изображений, результатов исследований

Таблица 1.

Основные медицинские требования к диагностической системе для межпланетных экспедиций

Ориентация всех методов на автономную диагностику непосредственно врачом экипажа на борту, с привлечением в случае необходимости высококвалифицированных специалистов соответствующего профиля для телемедицинских консультаций
Ориентация системы на выявление и диагностику наиболее вероятных прогнозируемых состояний и заболеваний, причин их возникновения и механизмов развития (патогенетический подход)
Выбор комплекса адекватных диагностических неинвазивных методов, широко апробированных в клинической и экспериментальной практике или специально разработанных для мониторинга состояния основных систем организма
Широкое использование методов визуализации функционирования сердечно-сосудистой системы, внутренних органов, костной системы и других систем организма
Создание бесконтактных систем диагностических обследований
Применение достижений телемедицины для диагностики и лечения

и опросов, основной особенностью которой является многообразие разнородных данных и их значительное количество.

Всю совокупность данных медико-биологических исследований можно разделить на детерминированные и статистические. В абсолютном большинстве случаев оказывается, что анализируемые показатели являются недетерминированными, статистическими.

На этапе верификации диагноза в условиях ДКП требуется поддержка принятия решения для врача экипажа. Исходными данными будут результаты медицинских обследований, которые можно представить в виде вектора случайных признаков $S_{(s_i, i=1, \dots, N)}^T$, характеризующих состояние обследуемого космонавта, а $Y_j, j=1, \dots, m$ является искомым диагнозом. В таком случае автоматизация диагностического процесса – это не что иное, как классическая задача классификации, которая является одним из разделов теории машинного обучения. Задача заключается в том, чтобы построить такую программу, которая, используя обучающую последовательность (выборку), вырабатывала бы правило, качество которого с заданной надежностью было бы не ниже требуемого.

В медико-биологических исследованиях, равно как и в практической медицине, спектр решаемых задач настолько широк, что возможно использование любых методологий интеллектуального анализа (ИА). Правила позволяют выбирать средства медикаментозного воздействия, определять показания/противопоказания, ориентироваться в лечебных процедурах, создавать условия наиболее эффективного лечения, предсказывать исходы назначенного курса лечения и т.п. Технологии (ИА) позволяют обнаруживать в медицинских данных шаблоны, составляющие основу указанных правил. В условиях межпланетной пилотируемой экспедиции при дифференциальной диагностике возникает неопределенность при принятии решения из-за ряда причин, таких как ограниченный перечень медицинского оборудования на борту, отсутствие

необходимого количества медицинского персонала и компетенций, задержка связи с ЦУПом и т.д.

Неопределенность становится проблемой, поскольку может помешать выработке наилучшего решения и даже стать причиной принятия некачественного решения.

Выделение основных диагностических признаков и создание обучающей выборки

Как сказано выше, одним из опаснейших состояний человека, совершающего операторскую деятельность в условиях ДКП, является острый коронарный синдром (ОКС) и инфаркт миокарда (ИМ). С точки зрения обеспечения безопасности необходимо предусмотреть систему мероприятий по ранней диагностике ИМ и предотвращению негативных последствий.

При разработке диагностической аппаратуры медико-технические требования касаются выбора наиболее информативных физиологических параметров организма и диагностических показателей, реализуемых с помощью доступных измерительных средств и отражающих патологические изменения в организме или предрасположенность к ним. Кроме того, необходимо учитывать требования, предъявляемые к качеству проведения исследования, так называемое качество пяти М. На основании клинических, морфологических и других признаков согласительный документ, принятый рядом международных кардиологических сообществ в 2007 г., предлагает разделить течение ИМ на несколько периодов. Нас наиболее интересует фаза развивающегося (от 0 до 6 часов) заболевания, позволяющая предотвратить развитие сердечно-сосудистой катастрофы при адекватно поставленном диагнозе и принятых лечебных воздействиях.

Диагностическая ценность биомаркеров ИМ определяется соотношением, главным образом, двух характеристик – чувствительности и специфичности. *M. Plebani* с соавторами в сравнительном аспекте исследовали чувствительность и специфичность миоглобина, СК, СК-МВ, TnT и TnI в диагностике ОИМ, спустя 3, 6 и 12 часов от развития заболевания. Показатели чувствительности у тропонинов через 3 часа были примерно одинаковыми (в среднем 51...54%) и выгодно отличались от данных по СК (31%), и в меньшей степени у СК-МВ mass (46%). Наиболее высокую чувствительность к 3-му часу имел миоглобин – 69%. Спустя 6 часов от начала ИМ чувствительность TnT составляла 78%, TnI – 81%, к 12 часам – 100% в обоих случаях. В то же время показатель чувствительности СК к 12 часам не превышал 88%. Специфичность среди исследованных биомаркеров была наиболее высокой у тропонинов и наиболее низкой у миоглобина. Соотношение чув-

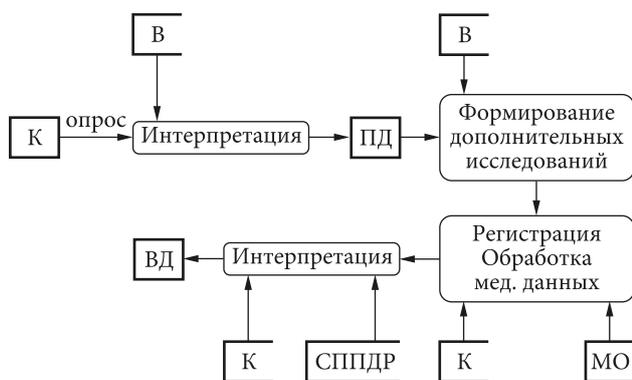


Рис. 3. Схема процесса медицинского контроля



ствительности и специфичности у тропонинов примерно соответствовало таковому СК-МВ.

При недоступности исследований сердечных тропонинов наилучшей альтернативой является количественное определение СК-МВ, считают эксперты Европейского общества кардиологов и Американской коллегии кардиологов. При этом диагноз правомочен при регистрации повышенного уровня изофермента, как минимум, в двух последовательных измерениях. Можно заключить, что современная диагностика должна обязательно включать определение специфических маркеров повреждения миокарда, а именно кардиотропонинов, СК-МВ и миоглобина. Исследования, проведенные в общей кардиологии, позволяют использовать описанные биомаркеры для построения алгоритма СППР, необходимой для обеспечения безопасности межпланетных пилотируемых космических полетов.

В работах Строгоновой Л.Б. (1990-2003) обоснована возможность применения метода «сухая химия» для биохимического анализа жидких сред организма в условиях невесомости на борту орбитальной станции МИР. В настоящее время метод применяется на борту международной космической станции (МКС). Важной особенностью фотометрических анализаторов является то, что химическая реакция смешивания исследуемой жидкости проходит в капиллярном слое. Точность воспроизведения, а также точность анализа, которая получена при сравнении с другими методами биохимических исследований, укладывается в нормы, предъявляемые Минздравом России к биохимической аппаратуре.

В условиях невесомости метод «сухая химия» является оптимальным для определения маркеров некроза миокарда, он уже применялся ранее для определения других биохимических параметров. Кардиопанель анализатора *Alere Triage® MeterPro* содержит все необходимые показатели, такие как миоглобин, креатинкиназу-МВ (КК-МВ), тропонин I. Пробы не требуют специальной подготовки, необ-

Таблица 2.

Чувствительность и специфичность маркеров

Биомаркер	Чувствительность			Специфичность
	3 часа	6 часов	12 часов	
Миоглобин	69 [48-86]	100 [87-100]	100 [87-100]	46 [33-60]
<i>Tnl</i>	54 [33-73]	81 [61-93]	100 [87-100]	90 [80-96]
<i>TnT</i>	51 [26-70]	78 [58-89]	100 [82-96]	89 [78-95]
СК МВ	46 [27-67]	88 [70-97]	100 [87-100]	78 [66-88]
СК	31 [14-52]	54 [33-73]	88 [70-97]	66 [52-78]

ходимо только смешать цельную кровь или плазму с антикоагулянтом *EDTA*. Ниже представлено изображение (рис. 4) кардиопанели *Alere Triage® Cardiac Panel* и анализатора *Alere Triage® MeterPro*.

Тест-полоска представляет собой мультимембранный композит, на определенные участки которого предварительно нанесены все необходимые для анализа иммунореагенты и их комплексы с маркером (рис. 5). Результатом анализа является формирование в определенных участках тест-полоски иммунных комплексов, содержащих маркер.



Рис. 4. Иллюстрация экспресс анализатора и кардиопанели:

а – кардиопанель *Alere Triage® Cardiac Panel*;
б – анализатор *Alere Triage® MeterPro*

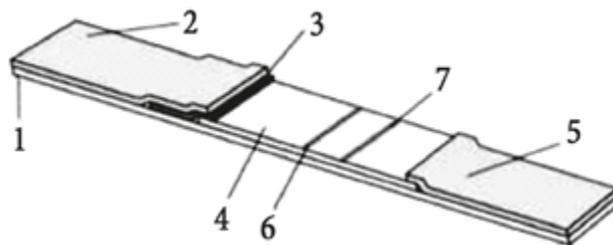


Рис. 5. Схема иммунохроматографической тест-полоски:

1 – пластиковая подложка; 2 – мембрана для пробы; 3 – мембрана для конъюгата маркера с антителами; 4 – рабочая мембрана; 5 – впитывающая мембрана; 6 – тестовая зона; 7 – контрольная зона с антивидовыми антителами

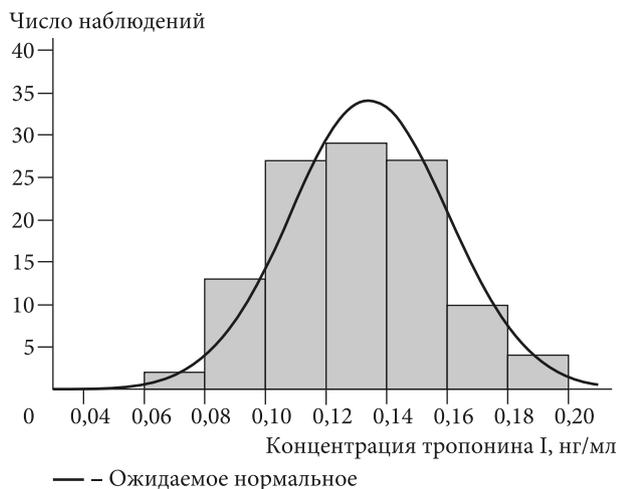
Алгоритм реализации СППР

Как показано выше, для ранней диагностики чрезвычайной ситуации кардиологического характера необходимо контролировать несколько биохимических маркеров некроза миокарда, таких как:

- миоглобин;
- креатинин фосфокиназа фракция МВ;
- тропонин I.

Из клинической практики Клинико-диагностического центра ФГБУ ФКЦ ВМТ ФМБА России (ГКБ № 84) был собран материал по 112 па-

циентам с подтвержденным диагнозом – инфаркт миокарда (ИМ) и 88 пациентам с подозрением на ИМ, однако подтвердившимся иным кардиологическим диагнозом. На основании клинических данных была сформирована обучающая выборка для настройки и проверки работоспособности классификатора. Предварительно был проведен анализ природы исходных данных, в ходе которого установлено, что результаты биохимических исследований, полученные с помощью лабораторных анализаторов, являются количественными данными, а также принадлежат двум независимым группам объектов (пациенты с подтвержденным диагнозом и пациенты с неподтвержденным диагнозом). Ниже приведены гистограммы плотностей распределения выборки биохимических данных по концентрациям тропонина I, миоглобина, КФК-МВ (рис. 6), а также основные статистические характеристики. При анализе представленной информации становится очевидным, что распределения плотностей вероятностей близки к нормальному, и это позволяет без дополнительных манипуляций воспользоваться НБК.



а

Мин. знач.	0,07
Макс. знач.	0,20
Ср. значение	0,13
Станд. откл.	0,03
Медиана	0,13

б

Рис. 6. Гистограмма распределения плотности вероятности для тропонина I:

а – гистограмма распределения плотности вероятности для тропонина I;

б – основные статистические данные

Оценка эффективности работы классификатора

Для оценки точности работы классификатора на вход подается тестовая выборка, которая пред-

ставляет собой заранее размеченные данные с соответствием между наблюдениями и их классами. Тестовая выборка подается на вход в режиме классификации новых данных, после чего необходимо соотнести решение программы с заведомо известными правильными решениями. Однако необходима конкретная численная метрика качества работы классификатора для оценки на качественном и количественном уровне новых реализаций.

Для оценки точности классификатора используют ряд характеристик, в том числе такие как точность (*precision*) и полнота (*recall*). Точность (*precision*) программы – это доля наблюдений, действительно принадлежащих данному классу, в отношении ко всем наблюдениям, которым программа присвоила тот же класс.

Моделирование СППР на базе гибридного алгоритма

Для решения задачи предотвращения чрезвычайной ситуации на борту космического аппарата при ДКП к другим планетам необходимо создание системы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. При рассмотрении безопасности полетов с точки зрения медицинского контроля необходима разработка системы ранней диагностики опасных состояний здоровья членов экипажа, так как если у одного из космонавтов разовьется критическое заболевание, это приведет к срыву программы полета и миссии в целом.

Критические заболевания – это в основном патологии сердечно-сосудистой и выделительной системы. Необходимо составить оптимальный перечень значимых показателей состояния организма, разумеется, учитывая диагностические возможности на борту космического аппарата. Очевидно, что обучение и тестирование системы будет проходить в земных условиях. В условиях космического полета медицинские данные в систему поддержки принятия решения будут поступать из многофункционального медицинского центра, который оснащен необходимым диагностическим оборудованием.

При применении модуля поддержки принятия решений для разнородных медицинских данных оправдано использование гибридного алгоритма, что способствует повышению точности классификации.

На рис. 7 показано, что особенностью гибридного алгоритма, является использование двух методов классификации, а именно метода байесовской классификации или дискриминантного анализа. Варьирование применения методов происходит в зависимости от типа распределения медицинских данных. Комбинация байесовской классификации и дискриминантного анализа позволит повысить эффективность и точности работы системы.

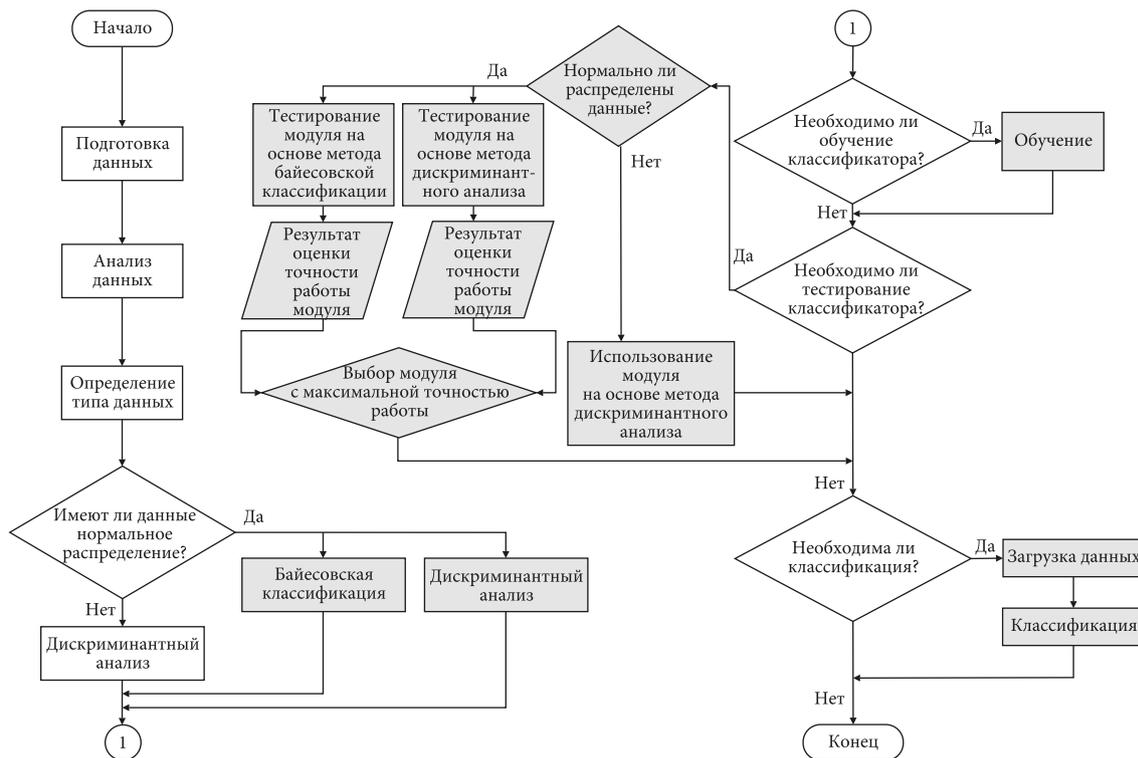


Рис. 7. Схема гибридного алгоритма модуля поддержки принятия решений

Заключение

Без разработки новых методов и средств медицинского контроля для межпланетных космических полетов обеспечение приемлемого уровня безопасности человека невозможно. Представленный и исследованный алгоритм апробирован для системы поддержки принятия решения в эксперименте МАРС-500 для поддержки принятия решения по исследованию речевых характеристик испытуемых с прогностической точностью не менее 95%, подробно результат представлен в литературе. Предложенные экспертные системы апробируются на Земле, имеют существенную перспективу для обеспечения безопасности межпланетных космических полетов, со временем будут являться неотъемлемой частью системы медицинского обеспечения космического полета.

Литература

1. Литвина Д.В., Строгонова Л.Б., Гущин В.И.//Вопросы качества обработки и анализа психофизиологических исследований для предупреждения чрезвычайных ситуаций в условиях моделирования длительного космического полета.// Качество жизни. – 2016. – № 3(11). – С. 37–39.
2. Литвина Д.В., Строгонова Л.Б.//Математические методы теории поддержки принятия решений в медицине.//Научно-технический вестник Поволжья-2015. – № 5 – С. 223–226.

The System of Support of Decision-Making for Improvement of Quality of Medical Control in the Interplanetary Piloted Space Flights

A.N. Knyazev, manager of therapeutic office of the Clinic diagnostic center of Federal state budgetary institution «Federal Clinical Center of High Medical Technologies» of Federal medico biological agency of Russia; Moscow

D.V. Litvina, applicant of Department 614 Moscow aviation institute (NRU); Moscow

L.B. Strogonova, professor of the Moscow aviation institute (NRU); Moscow

e-mail: buksan@list.ru

Summary. In the piloted space flight astronauts are affected by a set of negative factors such as, zero gravity, radiation, psychological components and others. For long practice of orbital flights the system of medical control of astronauts which includes set of methods and techniques of assessment of current state of health of the astronaut and prevention of development of dangerous states and diseases was developed. For safety of long space flights to other planets and prevention of emergency situations onboard spacecrafts it is necessary to reconsider and improve the existing system of medical support of astronauts developed, for orbital flights. The autonomous character of an interplanetary expedition will demand a different approach in medical support of flights, including because of a delay of communication with Control center of flights the crew will be forced to undertake decision-making in the emergency situations demanding it at present time. The system of support of adoption of the medical decision for early diagnostics of dangerous states and diseases will allow to enlarge safety of flight to planets.

For development of the medical onboard system of support of decision-making (SSDM) it is necessary to consider a series of features of medical data inherent in character which complicate a task. At the same time medical parameters become entry and boundary conditions for creation and adaptation of algorithms of functioning of system. SSDM is of special interest for cardiovascular diseases, the system is tested in clinical conditions.

Keywords: theory of decision support, emergency, naive Bayesian classifier, long-term space flight.

References:

1. Litvina D.V., Strogonova L.B., Gushchin V.I. Questions of quality of processing and the analysis of psychophysiological researches for prevention of emergency situations in the conditions of modeling of long space flight. *Quality of life*. 2016. No. 3(11). pp. 37–39.
2. Litvina D.V., Strogonova L.B. Mathematical methods of the theory of support of decision-making in medicine. *Scientific and technical bulletin of the Volga region*. 2015. No. 5. pp. 223–226.

Семейства кривошипно-коромысловых механизмов с функцией угла передачи, изменяющейся по комбинированному закону

Н.А. Середина

ведущий программист кафедры «Теория механизмов и машин и детали машин» Калининградского государственного технического университета; г. Калининград

e-mail: seredana27@yandex.ru

Аннотация. В работе проведен анализ методов метрического синтеза кривошипно-коромысловых механизмов. Предложены математические модели трех семейств кривошипно-коромысловых механизмов с максимумом функции угла передачи, равным 90° , при угле поворота кривошипа, равном соответственно 30° , 45° и 60° . Теоретически установлены области существования трех семейств механизмов, определяющие условия геометрической проворачиваемости таких механизмов. Предложена методика метрического синтеза трех семейств кривошипно-коромысловых механизмов, позволяющая повысить качество и снизить трудовые затраты при решении практических задач проектирования.

Ключевые слова: кривошипно-коромысловый механизм, метрический синтез, методы, математическая модель, геометрическая проворачиваемость, методика синтеза.

Введение

Кинематические схемы транспортно-технологических машин содержат кривошипно-коромысловые механизмы (ККМ). Применительно к линиям пищевых производств приведем примеры технологических машин, кинематические схемы которых включают названный механизм:

устройства для передачи изделий из позиции в позицию [1, 2], укладочные машины [3], тестомесильные машины [4, 5].

Графоаналитические методы метрического синтеза ККМ [6, 3]. Эти методы позволяют проектировать такой механизм по исходным данным: по заданному ходу и углу качания коромысла; по коэффициенту увеличения средней скорости коромысла при этом вводится дополнительное условие – угол передачи не опускается ниже минимально допустимых его значений; по заданным двум или трем положениям ведущего и ведомого звеньев. Графоаналитические методы синтеза ККМ не дают информации о характере изменения функции угла передачи таких механизмов в периоде кинематического цикла.

Метод синтеза рычажных механизмов [7] основан на теории приближения функций. Этот метод позволяет установить параметры кинематической схемы рычажного механизма, удовлетворяющие заданному закону движения ведомого звена. Такой метод синтеза рационален, поскольку позволяет спроектировать механизм, наиболее полно соответствующий своему функциональному назначению.

Метод метрического синтеза ККМ позволяет определять геометрические параметры, используя область существования этих механизмов и расчетные формулы. Область существования геометрически проворачивающихся ККМ предложена Н.И. Колчиным [8]. Математическая модель названной области описывается тремя равенствами:

$$1 - \lambda_1 = \lambda_2 - \lambda_3, \quad (1)$$