

Литвина Дарья Владимировна



**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМОНАВТОВ
В ДЛИТЕЛЬНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ**

**Специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации
(авиационная и ракетно-космическая техника),
05.26.02. Безопасность в чрезвычайных ситуациях
(авиационная и ракетно-космическая техника)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

МОСКВА, 2017

**Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московском авиационном институте
(национальном исследовательском университете)»**

Научный руководитель: **Строгонова Любовь Борисовна**
доктор технических наук, профессор

Научный консультант: **Евдокименков Вениамин Николаевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Успенский Георгий Романович**
заместитель начальника комплекса 13 ФГУП
«Центральный научно-исследовательский
институт машиностроения», доктор технических
наук, профессор, академик Российской академии
космонавтики К.Э. Циолковского

Векшина Анна Борисовна
кандидат технических наук, главный специалист
ПАО «Компания «Сухой»

Ведущая организация: ПАО «Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» имени С.П. Королёва»

Защита состоится «27» декабря 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)» и на сайте www.mai.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим высылать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4., Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.125.12



А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Успешное выполнение программы полёта зависит от физического состояния членов экипажа в экстремальных условиях длительного космического полёта (ДКП). Причинами возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) могут являться как технический, так и человеческий факторы. По данным из работ Овчарова В.Е. около 60-80% нештатных ситуаций - результат ошибки экипажа. Важнейшей задачей, в связи с увеличением продолжительности космического полета, стало обеспечение безопасности экипажа в условиях негативных факторов ДКП. К настоящему времени Григорьев А.И. и Егоров А.Д. (1999 г.) обобщили, накопленный опыт, который заложен в принципе телеметрических систем, основанных на сборе данных для получения поддержки принятия решения по предупреждению ЧС с Земли.

Существующая система медицинского обеспечения (СМО) и средства медицинского контроля (СМК) состояния космонавтов являются частью комплекса систем обеспечения жизнедеятельности космонавтов (КСОЖ). Негативные факторы космического полета к другим планетам оказывают отрицательное влияние на здоровье космонавтов, вследствие чего необходимо осуществлять контроль физиологических параметров, регистрируя малейшие изменения в состоянии с помощью совокупности медико-технических устройств для предупреждения нештатных ситуаций. При межпланетном полете связь со специалистами ЦУПа в режиме реального времени невозможна, поэтому требуется совершенствование существующей системы медицинского обеспечения и разработка системы поддержки принятия решения (СППР) бортового специалиста.

В диссертационном исследовании автоматизированная оценка физиологического состояния космонавта рассматривается, как специфическая задача классификации с комбинацией методов байесовской классификации и дискриминантного анализа. Подобное решение предлагается для повышения эффективности программного обеспечения и универсальности по отношению к типу исходных данных. Особенностью СППР является оценка состояния космонавтов с учетом двух значимых факторов: физического и психофизиологического. В работах академика Парина В.В. отмечается, что состояние сердечно сосудистой системы является универсальным индикатором физического состояния организма в целом, так как она взаимодействует со всеми органами и системами организма. В ходе эксперимента «Контент», проводившегося в рамках модельного эксперимента «Марс-500», сотрудниками ГНЦ РФ ИМБП РАН были выявлены значимые амплитудно-частотные характеристики речи человека, которые свидетельствуют о психофизиологическом статусе и качестве операторской деятельности человека.

Когда речь идёт о ДКП к другим планетам, вопросы безопасности встают особо остро. Существенную роль в системе обеспечения безопасности займет система поддержки принятия решения (СППР) для прогнозирования ЧС, которая является новым средством медицинского контроля в условиях полетов к другим планетам.

Степень разработанности темы исследования. В литературе рассмотрено множество СППР. Отдельно выделены алгоритмы, которые формализуют знания экспертов. Данные типы алгоритмов относят к экспертным, целью которых является решение сложных профессиональных задач в различных областях, на базе которых создаются проблемно-ориентированные СППР, в том числе и в области автоматизированной оценки состояния здоровья человека.

Проведенный анализ литературы показывает, что готовое решение для совершенствования системы медицинского обеспечения космонавтов в межпланетном полете отсутствует. Для обеспечения безопасности на борту космического аппарата необходима разработка новых средств медицинского контроля в целях сохранения здоровья людей, осуществляющих профессиональную деятельность в экстремальных условиях.

Целью работы является совершенствование системы медицинского обеспечения для предотвращения чрезвычайных ситуаций, сохранения работоспособности экипажа и обеспечения безопасности жизнедеятельности в экстремальных условиях ДКП.

Основные решенные задачи:

1. Анализ структуры и особенностей медицинского контроля для обеспечения орбитальных и межпланетных полетов;
2. Разработка алгоритма СППР для предупреждения чрезвычайных ситуаций на основе комбинации методов классификации;
3. Построение СППР для обеспечения профессиональной деятельности в целях сохранения здоровья космонавтов в экстремальных условиях и ЧС в ходе межпланетного полета;
4. Построение и апробация СППР для предупреждения ЧС на основе анализа амплитудно-частотных характеристик речи в рамках модельного эксперимента «Марс-500».

Научная новизна работы:

1. Разработана структура системы поддержки принятия решений для оценки состояния экипажа в длительном межпланетном полете. Особенность и новизна структуры состоит в том, что она позволяет оценивать состояние экипажа с учетом двух значимых патогенетических факторов:
 - сердечно-сосудистых нарушений, возникающих под действием неблагоприятных факторов длительного полета,

- стрессовых состояний у членов экипажа.

2. Разработан алгоритм, позволяющий оценивать опасность возникновения угрожающих сердечно-сосудистых расстройств на основе результатов биохимических тестов пригодных для проведения исследований в условиях длительного космического полета. Задача оценки риска возникновения угрожающего нарушения сердечной деятельности интерпретирована, как специфическая задача классификации.

3. Разработан алгоритм, позволяющий проводить оценку психо-эмоционального состояния членов экипажа на основе автоматизированного анализа речевых конструкций.

4. Проведены предварительные оценки эффективности разработанного программно-аппаратного комплекса. На основе анализа имеющихся статистических данных показано:

- достоверность оценки риска возникновения сердечно-сосудистых нарушений составляет не менее 75% (на основании данных полученных в наземных клинических и специальных экспериментальных условиях);
- достоверность оценки риска наличия психо-эмоционального стресса у членов экипажа, влияющего на профессиональную деятельность, составляет не менее 95%, что подтверждено в реальном модельном эксперименте «Марс-500».

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость заключается в том, что данная разработка дополняет существующую систему медицинского обеспечения безопасности длительного космического полета. Основные теоретические результаты могут стать основой для дальнейшего совершенствования системы мониторинга параметров состояния космонавта для межпланетных полетов.

Практическая значимость:

1. Разработана методика медико-технического обеспечения с СППР для оценки параметров состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) человека;

2. Разработана методика медико-технического обеспечения с СППР для анализа речевых характеристик человека;

3. На основе вышеперечисленных методик разработан вариант программно-аппаратного комплекса, объединяющий традиционные инструментальные средства проведения биохимических тестов на борту космического аппарата, средства получения амплитудно-частотных характеристик и разработанный программный комплекс, обеспечивающий автоматизированную обработку измеряемой информации и выработку решений относительно текущего состояния членов экипажа.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составили научные и практические труды отечественных и зарубежных ученых в области

применения СППР, методов классификации для прогнозирования и мониторинга параметров безопасности в ДКП.

При решении поставленных задач использовались:

- методы статистической обработки экспериментальных данных;
- методы машинного обучения и интеллектуального анализа данных;
- экспериментальные методы исследования анализа речевых характеристик для

модельного эксперимента «Марс-500».

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм для СППР, позволяющий осуществлять оценку состояния космонавта для предупреждения чрезвычайных ситуаций в экстремальных условиях межпланетного полета;

2. СППР для сохранения работоспособности космонавтов и предупреждения чрезвычайных ситуаций в экстремальных условиях межпланетного полета на базе экспериментальных данных «Марс-500» ГНЦ ИМБП РАН.

Достоверность и апробация результатов. Диссертационная работа включает в себя расчетно-экспериментальную часть, следовательно, достоверность полученных результатов и сделанных выводов подтверждается строгостью изложения основных положений, корректным использованием математического аппарата, методов математического моделирования, статистического анализа, а также проведения модельных экспериментов. Достоверность работы алгоритма СППР на имеющихся статистических данных составляет не менее 75%.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва, 2012, 2013, 2014), Молодежной конференции «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники» (Звездный городок, МО, 2013), Международной конференции по инновационным технологиям (Риека, Хорватия, 2012, Будапешт, Венгрия, 2013, Лейрия, Португалия, 2014).

Личный вклад автора. Диссертантом поставлена и решена актуальная задача совершенствования системы медицинского обеспечения (СМО) космонавтов на борту космического аппарата в экстремальных условиях пилотируемого межпланетного полета. Разработан программно-аппаратный комплекс поддержки принятия решений бортового специалиста относительно текущего физиологического состояния членов экипажа, негативные изменения которого могут препятствовать безопасному продолжению космического полета. В диссертационном исследовании выделены два наиболее существенных фактора, влияющих на работоспособность космонавтов в условиях ДКП: опасность развития сердечно-сосудистых нарушений и стрессовых состояний. Для оценки

опасности возникновения указанных физиологических нарушений предложен вариант двухканальной системы поддержки принятия решений, интеллектуальным ядром которой являются алгоритмы, обеспечивающие выработку решений на множестве двух альтернатив («норма – не норма») с использованием традиционных методов классификации, адаптированных для задачи оценки физиологического состояния космонавтов в условиях межпланетного полета. Предложенный вариант двухканальной системы поддержки принятия решений для оценки состояния членов экипажа опирается на возможность существующих средств, которые могут быть использованы на борту космического аппарата для оценки физиологического состояния экипажа.

Внедрение результатов исследования. Полученная в результате исследования автоматизированная СППР для оценки психо-физиологического состояния космонавта, внедренная в научно-практическую деятельность лаборатории О-042 ГНЦ ИМБП РАН, позволила эффективно проводить анализ амплитудно-частотных характеристик речи участников эксперимента «Марс-500», а также создала практический задел для решения аналогичных научных задач лаборатории. Основные результаты исследования внедрены в учебный процесс кафедры 614 «Экология, системы жизнеобеспечения и безопасность жизнедеятельности» «МАИ (НИУ)» и используются при преподавании ряда дисциплин, таких как «Аэрокосмическая медицина», «Введение в специальность», «Инженерная психология и эргономика».

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в журналах, входящих в рецензируемые ВАК Минобрнауки России перечень изданий [1-6], опубликованы в сборниках тезисов и докладов конференций [7-12], рецензируемом журнале РИНЦ [10]. Всего по теме опубликовано 13 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и литературы. Работа содержит 101 страницу, 9 таблиц, 47 рисунков. Список литературы включает 58 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и целесообразность данного исследования, а также изложено первоначальное представление о вопросе совершенствования СМО и СМК для пилотируемых полетов к другим планетам.

Первая глава посвящена анализу особенностей обеспечения безопасности длительных орбитальных и межпланетных космических полетов, освещены негативные факторы космического полета и их воздействия на организм человека, а так же рассмотрены мероприятия по проведению медицинского контроля на борту космического аппарата. На основе проведенного анализа выявлена потребность в совершенствовании существующей

СМО и создании СППР бортового специалиста для прогнозирования развития опасных состояний, которые могут стать препятствием для безопасного продолжения межпланетного полета и сохранения работоспособности членов экипажа. Глава оканчивается постановкой цели и задач.

Вторая глава посвящена рассмотрению и выбору методов классификации для автоматизации оценки состояния космонавтов в условиях ДКП. Кроме того описаны особенности статистических данных для тестирования разрабатываемой системы поддержки принятия решения.

Задача оценки состояния экипажа в ходе ДКП рассмотрена как математическая задача классификации. В общем виде при решении задачи классификации необходимо найти решающее правило, которое представлено в виде функции типа:

$$h: S \rightarrow D \quad (1)$$

где S – множество элементов s , соответственно $s \in S$, s – элемент представленный для классификации;

D – множество меток класса.

При бинарной классификации множество меток класса примет вид $D = \{-1, 1\}$

Предсказательная способность функции классификации h определяет по ошибке:

$$err_p(h) = P\{h(S) \neq Y\} = P\{(s, y): h(s) \neq y\} \quad (2)$$

где $P\{h(S) \neq Y\}$ - вероятность наступления события $\{h(S) \neq Y\}$.

При решении задачи классификации можно выделить три группы методов: группа методов сравнения с прототипом, статистические методы, группа методов дискриминантного анализа. В рамках диссертационной работы было проведено исследование по автоматизации оценки состояния космонавтов и из каждой группы выбрано по одному методу решения задачи классификации, кроме группы методов сравнения с прототипом по причине их простоты.

Ниже представлена классифицирующая функция для дискриминантного анализа (3) . При обучении бинарного классификатора вычисляются коэффициенты b_{ki} для каждого класса (исхода). При классификации определяются значения функции h_k для каждого класса (исхода), после чего происходит сравнение значений функции, случай относится к классу с наибольшим значением функции (наибольшим h_k).

$$h_k = b_{k0} + b_{k1}X_1 + b_{k2}X_2 + \dots + b_{kp}X_p, \quad (3)$$

где h_k – значение функции для класса k , а b_{ki} - коэффициенты, которые необходимо определить.

Ниже представлена формула Байеса (4). При обучении бинарного байесовского классификатора происходит вычисление правдоподобий $P(S_i/D_j)$ для каждого класса (исхода). При классификации определяются значения апостериорных вероятностей $P(D_j/S_i)$

для каждого класса (исхода), после чего происходит сравнение значений вероятностей, случай относится к классу с наибольшим значением $P(D_j/S_i)$.

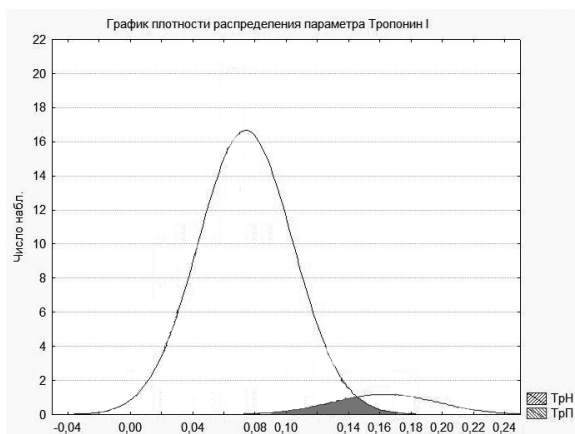
$$P(D_j/S_i) = \frac{P(S_i/D_j)P(D_j)}{P(S_i)} \quad (4)$$

где $P(D_j)$ - априорная вероятность диагноза D_j безотносительно к информации о наличии симптома S_i ; $P(S_i/D_j)$ - правдоподобие, говорит о том, насколько вероятно увидеть все симптомы S_i , если известно о принадлежности образца к диагнозу D_j , $P(S_i)$ – априорная вероятность симптома S_i безотносительно к «данной» информации о D_j , $P(D_j/S_i)$ - апостериорная вероятность диагноза D_j при наличии комплекса симптомов S_i .

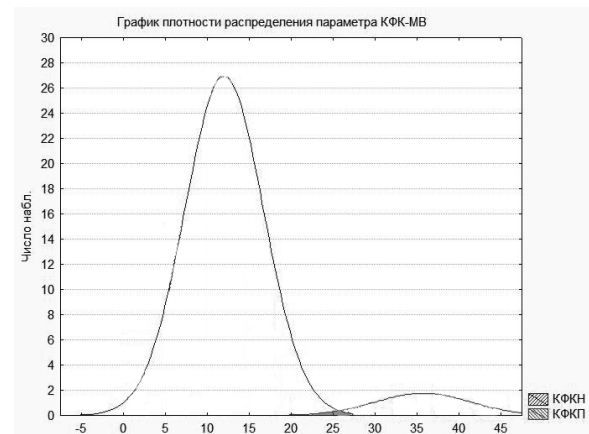
Для обеспечения безопасности космонавтов в длительном космическом полете необходимо учитывать как физическое, так и психо-физиологическое состояния, которое непосредственно влияет на качество операторской деятельности. В работах академика Парина В.В. отмечается, что состояние сердечно-сосудистой системы является универсальным индикатором состояния организма в целом, так как система взаимодействует со всеми органами и системами организма.

Для оценки физического состояния космонавтов значимыми признаками в соответствии с рекомендациями ВОЗ и нормативно-правовыми документами Министерства Здравоохранения РФ являются факторы некроза миокарда: тропонин I, креатинфосфокиназа – МВ, миоглобин.

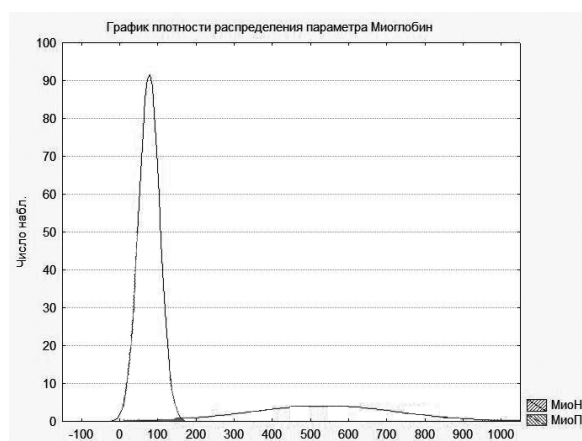
Анализируемые данные состоят из порядка 200 случаев клинической практики. На Рис. 1 приведены графики распределений плотностей вероятностей исходных данных, выборки факторов некроза миокарда (тропонин I, КФК-МВ, миоглобин), которые были проверены на нормальность при помощи критерия согласия Шаиро-Уилка, в ходе проверки было подтверждено нормальное распределение. Кроме того определены корреляционные взаимосвязи методом попарной корреляции Пирсона, подтверждено, что в выборке биохимических показателей параметры слабо коррелируют.



а)



б)



в)

Рис. 1. Гистограммы плотности распределения для следующих диагностических признаков:
 а) концентрация тропонина I;
 б) концентрация КФК-МВ;
 в) концентрация миоглобина.

Рис. 1 визуально иллюстрирует области пересечения значений параметров «нормы» и «патологии», то есть области неопределенности при принятии решений.

Основным способом получения информации о психо-неврологическом статусе космонавтов, отражающем качество осуществления операторской деятельности, является дистанционный контроль. Источником информации служат штатные радиопереговоры космонавтов.

В ходе модельного эксперимента «Марс-500», проводившегося в ГНЦ ИМБП РАН, изучались закономерности и механизмы влияния негативных факторов ДКП на психофизиологический статус членов группы, работоспособность и качество операторской деятельности, одним из которых был контент-анализ видео-сообщений экипажа.

Анализируемые данные состоят из порядка 2700 наблюдений, содержащих 22 переменные и отражающих амплитудно-частотные характеристики голосового сигнала. Первые четыре параметра были описаны по пяти статистическим параметрам, которые представлены в Табл. 1. Параметры LTAS и EMS измеряются как среднее значение для каждой записи.

Табл. 1

Голосовая хар-ка	Описание	Статистические параметры
FX	Основная частотная характеристика	MEAN - среднее значение; SD - стандартное отклонение; SKEW - асимметрия распределения признаков; KURT - пик распределения признаков; MEDIAN – медиана.
VFER	Коэффициент напряжения голосовых связок	
HNR	Коэффициент смыкания связок	
PPQ	Коэффициент возмущения	
LTAS	Наклон среднего спектра	
EMS	Наклон средней огибающей модуляции спектра	

Распределения плотностей вероятностей некоторых предикторов представлено на Рис. 2, анализируемые данные были проверены на нормальность при помощи критерия согласия Шапиро-Уилка. В ходе проверки было подтверждено нормальное распределение, кроме того определены корреляционные взаимосвязи методом попарной корреляции Пирсона. Рис. 2 визуально иллюстрирует области пересечения значений параметров «нормы» и «патологии», то есть область неопределенности при принятии решений.

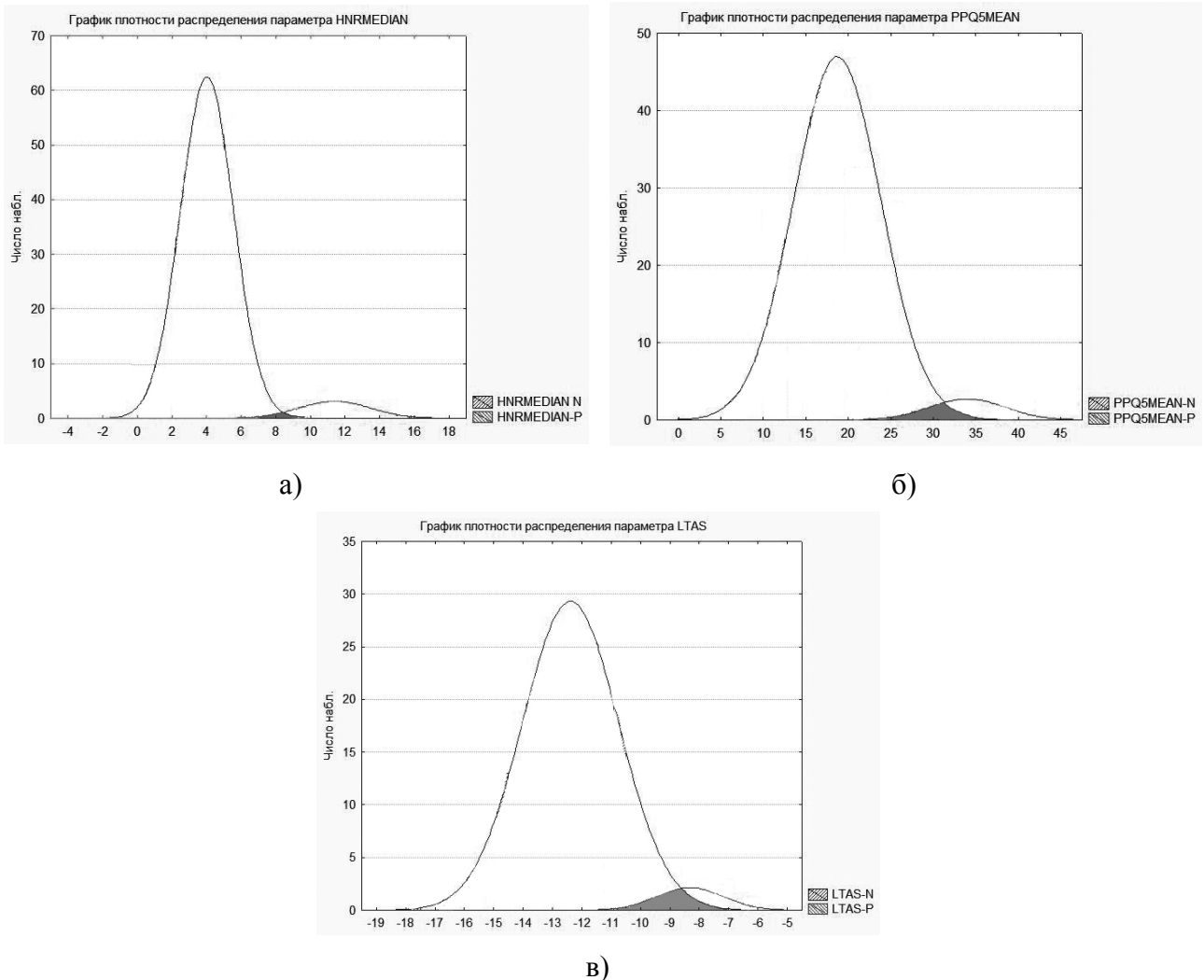


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения для следующих предикторов:
 а) HNRMEDIAN - медиана коэффициента смыкания связок;
 б) PPQ5MEAN - среднее значение коэффициента возмущения;
 в) LTAS - наклон среднего спектра.

Третья глава посвящена описанию внутренней структуры программного комплекса и его места в составе комплекса систем жизнеобеспечения (КСОЖ).

На Рис. 3 представлена структура программного комплекса, которая состоит из трёх основных компонент интерфейса, преобразователя и математической модели. Интерфейс служит для ввода исходных данных для обучения, тестирования, классификации и вывода результатов классификации и графических изображений. В компоненте преобразователя происходит преобразование исходных данных, вычисления плотностей вероятностей

появления симптомо-комплексов при наличии конкретных диагнозов и вычисления коэффициентов классифицирующей функции. В компоненте математической модели за управление всех подмодулей отвечает основной модуль управления, при необходимости вызывая модули классификации или тестирования с помощью методов кросс-валидации, ROC-анализа, матрицы обнаружения или модуля адаптации, который служит для повышения эффективности работы классификатора, добавляя в обучающую выборку новые верифицированные случаи, проводится «переобучение» системы и уточнение параметров классификации.



Рис. 3. Схема основных блоков СППР

На Рис. 4 представлена схема комплекса систем жизнеобеспечения (КСОЖ), составленная на основе ГОСТ Р50804-95, в нее внедрена разработанная СППР, и показано её взаимодействие с другими системами и подсистемами пилотируемого космического аппарата.

Более подробно рассмотрим систему медицинского обеспечения (СМО), которая состоит из средств медицинского контроля (СМК), средств медицинской профилактики (СМП) и средств оказания медицинской помощи космонавту (СОМП). Совершенствование системы СМО предполагается с помощью внедрения дополнительных средств медицинского контроля: диагностических медицинских и психофизиологических программно-аппаратных комплексов, информации которая будет поступать в разработанную СППР. После чего врач

экипажа принимает решение о дальнейших профилактических мероприятиях или об оказании медицинской помощи для предотвращения чрезвычайной ситуации.

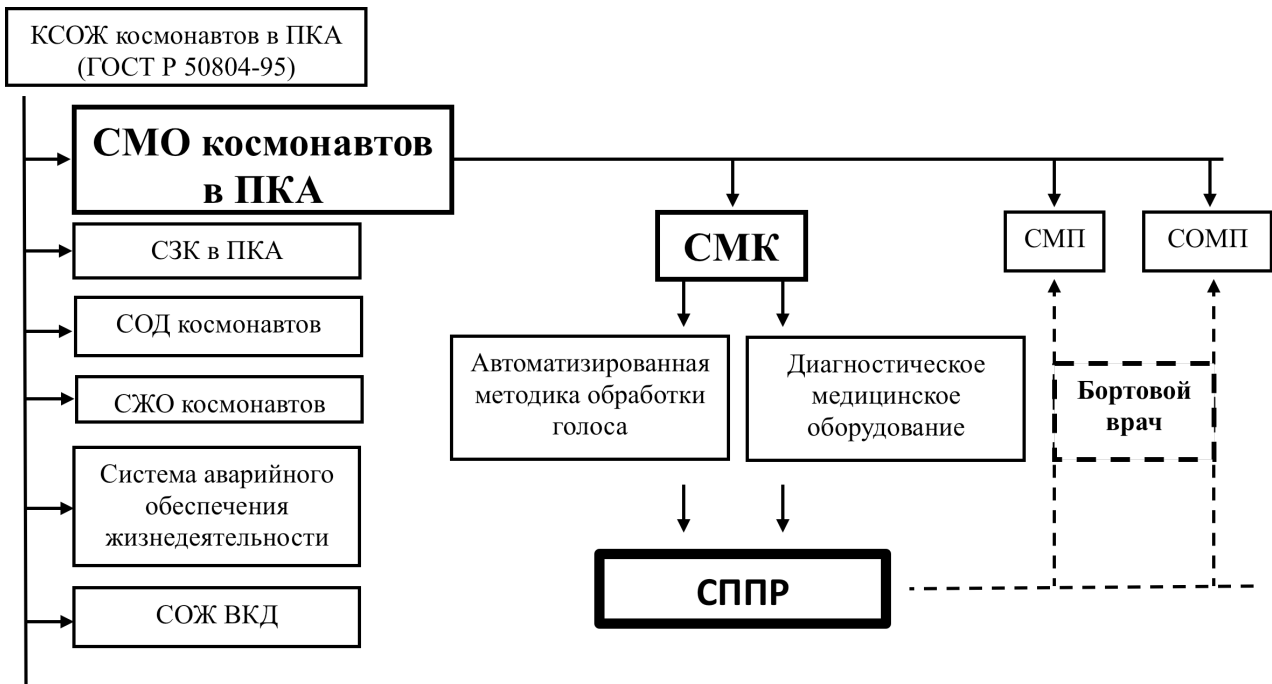


Рис. 4. Схема взаимодействия систем КА и экипажа с СППР

Четвертая глава посвящена проведению оценки качества работы программно-математического обеспечения с возможностью тестирования исходных данных, отражающих физическое и психо-физиологическое состояние человека, описанных во второй главе. Предварительные оценки эффективности разработанной СППР на основе имеющихся статистических данных следующие:

- достоверность оценки риска возникновения нарушений сердечно-сосудистой системы составляет не менее 75%;
- достоверность оценки риска возникновения нарушения психофизиологического статуса у членов экипажа составляет не менее 95%.

Решается специфическая задача классификации. Сложность применения байесовской классификации заключается в отсутствии данных для обучения классификатора в виду того, что межпланетный полет только планируется к реализации, а задачу обеспечения безопасности необходимо решить заблаговременно. Для этого необходимо найти обучающую выборку, которая демонстрирует статистическое подобие с параметрами космонавтов в длительном космическом полете к другим планетам.

Экспериментально доказано Юровым И.Б. (2006), что изменения в состоянии миокарда сердечной мышцы у профессиональных спортсменов спорта высших достижений аналогичны изменениям у космонавтов, поэтому можно применить в качестве априорной вероятности наступления инфаркта миокарда показатель спортсменов, который составляет

примерно 4,8%. Надо сказать, что этот показатель выше, чем в популяции примерно в 2,4 раза (Corrado D. (2006), Adami P.E. (2015)).

Следовательно можно принять, что для адаптации наземных данных к использованию в ДКП необходимо применить априорную вероятность равную $P(S)=0,048$. Кроме того, для повышения качества классификации во время эксплуатации на борту космического аппарата, предлагается его «переобучать» по истечении трех недель после каждой успешной классификации, ввиду того что специфические факторы некроза миокарда начинают появляться в кровотоке не ранее чем за три недели до наступления начала физических нарушений функционирования сердечной мышцы.

После обучения программно-математического обеспечения на представленных статистических данных факторов некроза миокарда по формулам (4) проводится верификация классификатора различными методами и определяется достоверность работы.

Оценка эффективности работы модуля на основе ROC-анализа заключается в визуализации отношения чувствительности алгоритма классификации (sensitivity) и специфичности (specificity), которые можно представить формулами:

$$S_e(\text{sensitivity}) = TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$S_p(\text{specificity}) = 1 - FPR = 1 - \frac{FP}{FP + TN} = TNR = \frac{TN}{FP + TN} \quad (6)$$

где TPR – количество истинно-положительных результатов классификации,

TP – количество истинно-положительных результатов в выборке;

FN – количество ложно-негативных результатов в выборке (ошибка I рода);

FPR – количество ложно-положительных результатов классификации;

FP – количество ложно-положительных решений в выборке (ошибка II рода);

TN – количество истинно-отрицательных результатов в выборке;

TNR – количество истинно-отрицательных результатов классификации.

Оптимальный баланс между чувствительностью S_e и специфичностью S_p найден с помощью порога отсечения η . Значение порога η находится в интервале от 0 до 1, и задано с шагом 0,01 для нахождения оптимального соотношения ошибок I и II рода. Критерии определения решающего правила следующие:

1. требование максимальной суммарной чувствительности S_e и специфичности S_p :

$$\max_k (S_{e_k} + S_{p_k}) \quad (7)$$

2. требования баланса между чувствительностью S_e и специфичностью S_p :

$$\min_k |S_{e_k} - S_{p_k}|. \quad (8)$$

Представлен фрагмент таблицы по выбору значения порога η в Табл. 2.

Оптимальным порогом η для критерия максимальной суммарной чувствительности S_e и специфичности S_p является значение равное 0,83, что свидетельствует о минимуме ошибки

I и II рода, а для критерия требования баланса между чувствительностью S_e и специфичностью S_p значение равно 0,86.

Для количественной оценки ROC-кривой используют понятие площади под кривой (AUC). Максимальное значение площади 1 или 100% – поэтому, чем больше эта характеристика, тем эффективнее классифицирующая способность алгоритма. Для вычисления AUC применен метод трапеций.

Табл. 2

Значение порога (η)	Sens (S_e)	1-Spec ($1-S_p$)	Spec (S_p)	Sens+Spec (S_e+S_p)	Sens-Spec ($ S_e-S_p $)
...
0,81	0,78	0,5	0,5	1,28	0,28
0,82	0,78	0,33	0,67	1,45	0,11
0,83	0,78	0,33	0,67	1,45	0,11
0,84	0,78	0,33	0,67	1,45	0,11
0,85	0,67	0,33	0,67	1,34	0
0,86	0,67	0,33	0,67	1,34	0
0,87	0,67	0,33	0,67	1,34	0
0,88	0,67	0,17	0,83	1,5	0,16
...

Достовернее ориентироваться на значение AUC для тестовой выборки объемом 50 наблюдений, которая подается на вход для уточнения рабочих характеристик модуля классификации для независимых данных. На Рис. 5, представлена ROC-кривая для тестовой выборки, значение AUC составляет 75%.

После завершения процесса обучения и валидации модуля на основе байесовской классификации при поступлении новых значений вычисляются их правдоподобия по формуле (9) (4), которые фактически являются плотностями нормального распределения:

$$P(S_i/D_j) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(S_i-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

где μ - математическое ожидание (среднее значение);

σ - среднеквадратичное отклонение (дисперсия).

Затем вычисляются апостериорные вероятности для каждого входящего вектора:

$$P(D_j/S_{1,\dots,N}) = \frac{\prod_{i=1}^N P(S_i/D_j)P(D_j)}{\sum_{k=1}^M [\prod_{i=1}^N P(S_i/D_k)P(D_k)]} \quad (10)$$

где N - число учитываемых симптомов;

M - число рассматриваемых диагнозов, $j = 1, \dots, M$.

После чего классифицирующий модуль производит сравнение принадлежности наиболее вероятного класса:

Решающее правило для бинарной классификации примет вид:

$$\frac{P(D_1)P(S_i/D_1)}{P(D_2)P(S_i/D_2)} > \eta \quad (11)$$

где η - порог решающего правила (порог отсечения).

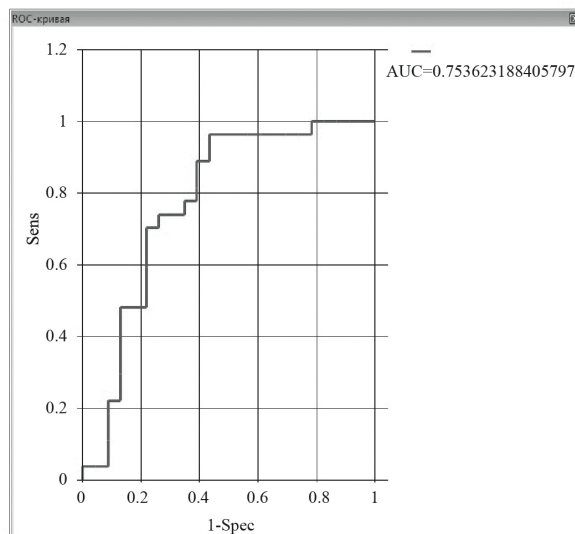


Рис. 5. Визуализация эффективности классификации ROC-анализа для тестовой выборки;

Особенностью гибридного алгоритма (Рис. 6) является использование двух методов классификации. Варьирование применения методов происходит в зависимости от типа данных. Комбинация байесовской классификации и дискриминантного анализа позволит повысить эффективность и точность работы системы.

Для оценки психо-физиологического состояния космонавтов значимыми признаками являются амплитудно-частотные характеристики речи. Обучающая выборка составлена по данным, полученным в ходе эксперимента «Контент» проводившегося в рамках «Марс-500» в ГНЦ ИМБП РАН. Поскольку эксперимент моделировал полет 6 членов экипажа к Марсу, высадку на поверхности планеты и возвращение на Землю, то априорная вероятность наступления стрессового состояния соответствует статистическим данным эксперимента и равна $P(S)=0,02$.

Была проведена оценка эффективности работы модуля байесовской классификации на основе ROC-анализа в соответствии с (5), (6). Найдено оптимальное значение порога отсечения $\eta = 0,9$ по критериям (7), (8) и приведен фрагмент таблицы (Табл. 3).

Табл. 3

Значение порога (η)	Sens (S_e)	1-Spec ($1-S_p$)	Spec (S_p)	Sens+Spec (S_e+S_p)	Sens-Spec ($ S_e-S_p $)
...
0,8	1	1	0	1	1
0,9	0,96	0,94	0,06	1,02	0,9
...

Была построена ROC-кривая для тестовой выборки объемом 700 наблюдений, вычислено значение $AUC=95\%$, что представлено на Рис. 7а.

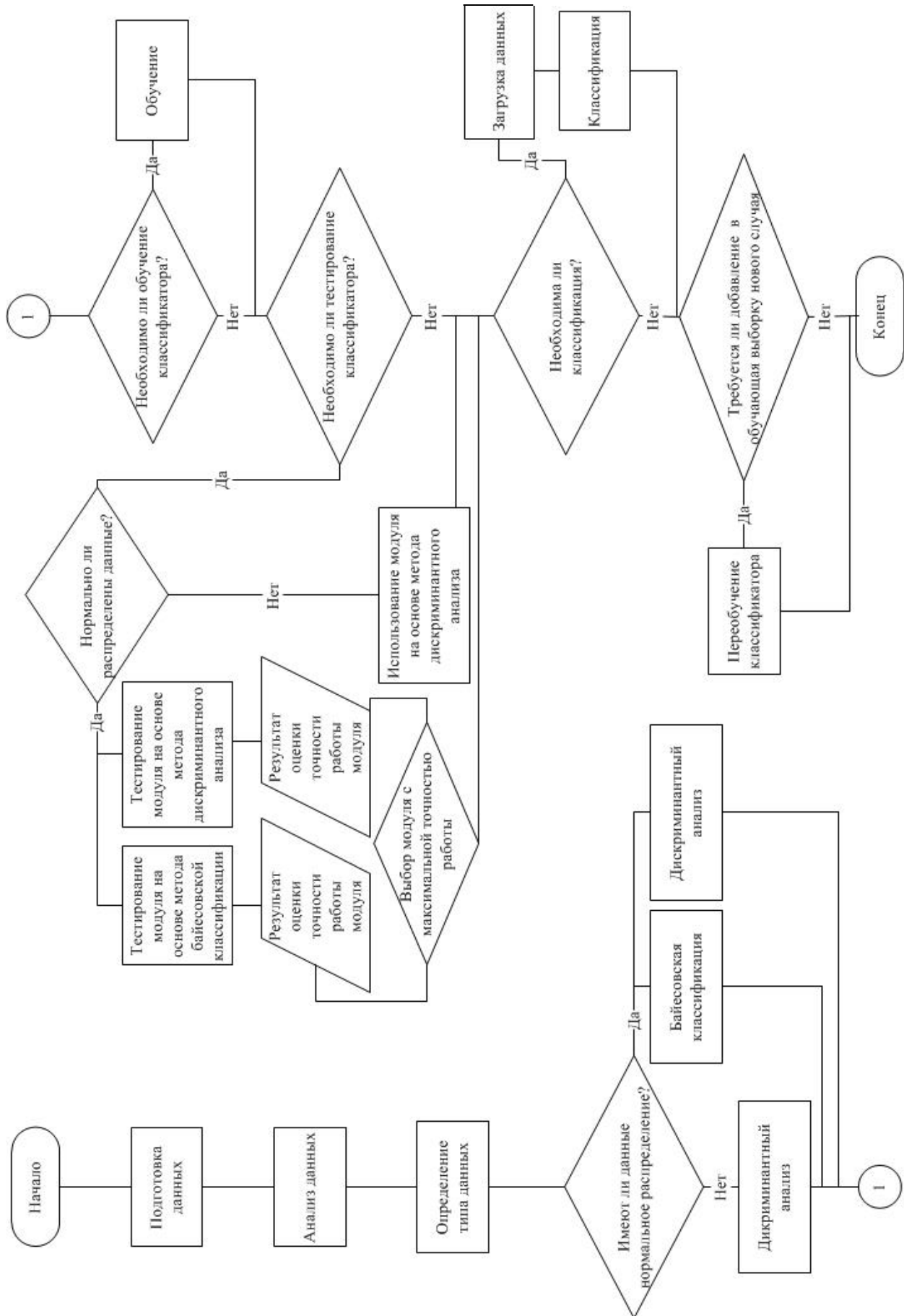


Рис. 6. Схема гибридного алгоритма

Для модуля дискриминантного анализа и оценки вклада в дискриминацию были вычислены стандартизированные коэффициенты для обучающей выборки объемом 2000 наблюдений по формуле:

$$c_i = u_i \sqrt{\frac{w_{ii}}{n. - g}} \quad (12)$$

где w_{ii} - сумма квадратов i -й переменной;

$n.$ - общее число наблюдений;

u_i – коэффициенты приведения к стандартной форме, g - число групп.

Вычислены стандартизированные коэффициенты для 22 предикторов, свободный член и собственное значение.

Вычислена Λ -статистика Уилкса $\Lambda=0,62$ по формуле:

$$\Lambda = \prod_{i=k+1}^g \frac{1}{1 + \lambda_i} \quad (13)$$

где k - число уже вычисленных функций;

g – число классов; λ_i – собственное значение.

Найдены коэффициенты для построения функции классификации по формулам:

$$b_{ki} = (n - g) \sum_{j=1}^p a_{ij} X_{jk}, \quad (14)$$

где b_{ki} - коэффициент для переменной i в выражении, соответствующему классу k ;

a_{ij} - элемент матрицы, обратной к внутригрупповой матрице сумм попарных произведений W ;

$$b_{k0} = -0,5 \sum_{j=1}^p b_{kj} X_{jk} \quad (15)$$

где b_{k0} - свободный член.

Учитывая вычисленные коэффициенты, функции классификации, примут вид:

$$\begin{aligned} h_1 = & -1513,58 - 2,26 * FXMEDIAN + 4,59 * FXMEAN - 4,70 * FXSD + \\ & 38,03 * FXSKEW - 1,90 * FXKURT + 1969,55 * VFERMEDIAN + 625,40 * \\ & VFERMEAN + 4142,32 * VFERSD + 146,66 * VFERSKEW + 44,49 * \\ & VFERKURT + 5,51 * HNRMEDIAN + 2,09 * HNRMEAN + 17,82 * HNRSD + \\ & 83,29 * HNRSKEW + 33,17 * HNRKURT + 1,98 * PPQ5MEDIAN - 5,96 * \\ & PPQ5MEAN + 8,21 * PPQ5SD - 58,95 * PPQ5SKEW + 9,71 * PPQ5KURT - \\ & 0,85 * LTAS + 5,29 * EMSALL \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} h_2 = & -1579,72 - 2,08 * FXMEDIAN + 4,30 * FXMEAN - 4,53 * FXSD + \\ & 38,16 * FXSKEW - 1,98 * FXKURT + 1981,47 * VFERMEDIAN + 635,18 * \\ & VFERMEAN + 4214,89 * VFERSD + 148,87 * VFERSKEW + 48,41 * \\ & VFERKURT + 7,06 * HNRMEDIAN - 0,72 * HNRMEAN + 16,99 * HNRSD + \\ & 86,98 * HNRSKEW + 37,35 * HNRKURT + 0,23 * PPQ5MEDIAN - 0,68 * \\ & PPQ5MEAN + 4,32 * PPQ5SD - 58,84 * PPQ5SKEW + 13,27 * PPQ5KURT - \\ & 0,64 * LTAS + 5,63 * EMSALL \end{aligned} \quad (17)$$

Классификацией новых данных, поступающих в обученную модель, вычисляются все функции классификации для каждого наблюдения. Наблюдение будет отнесено к тому классу, для которого значение функции классификации имеет большее значение.

Для оценки качества классификации рассчитана матрица обнаружения для тестовой выборки объемом 700 наблюдений, которая представлена в Табл. 4. Матрица для бинарной классификации содержит следующие элементы:

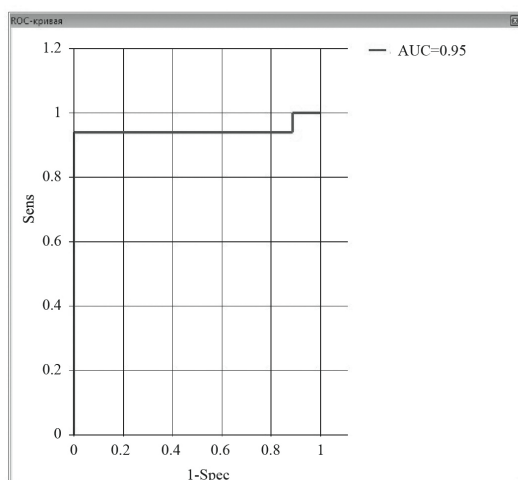
- TP (True Positive) – количество истинно-положительных результатов в выборке;
- TN (True negative) – кол-во истинно-отрицательных результатов в выборке;
- FP (False positive) – кол-во ложно-положительных решений в выборке (ошибка II рода);
- FN (False negative) – кол-во ложно-негативных результатов в выборке (ошибка I рода).

Построенная модель определяет экспертную оценку с точностью 98,6%, причем принадлежность к I классу (нет стрессового состояния) модель определяет с точностью 98,7%, ко II классу (наличие стрессового состояния) – 87,5%.

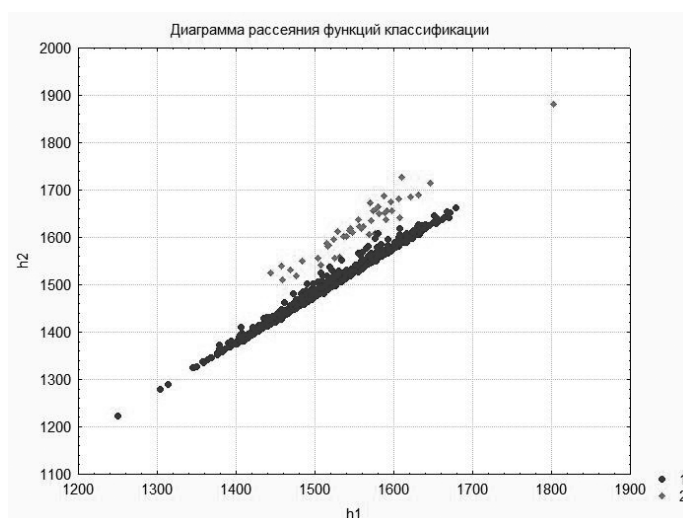
Табл. 4

Предсказанный класс	Доля правильных ответов	Реальный класс	
		Класс 1	Класс 2
Класс 1	98,7	TP=486,0	FP=6,0
Класс 2	87,5	FN=1,0	TN=7,0
Всего	98,6	487,0	13,0

Для графической визуализации классифицирующей способности модели представлена диаграмма рассеивания (Рис. 7б), построенная при использовании (16), (17). Очевидно, что два класса фактически не имеют пересечений, следовательно, предсказательная способность классификатора высокая.



а)



б)

Рис. 7. Визуализация эффективности работы модулей на базе метода байесовской классификации и дискриминантного анализа:

а) ROC-анализ для тестовой выборки;

б) диаграмма рассеивания для функции классификации.

Разработанная система поддержки принятия решений для предупреждения экстремальных ситуаций имеет большой задел по расширению номенклатуры диагностируемых опасных состояний и заболеваний. Кроме того, разработанная система предполагает интеграцию в бортовой многофункциональный медицинский центр для автоматизации сбора и анализа медико-психологических данных, что позволит усовершенствовать существующую систему медицинского обеспечения и средства медицинского контроля в составе комплекса систем обеспечения жизнедеятельности космонавтов, соответствующих требованиям автономного характера космических полетов к другим планетам.

Заключение

В результате проведенной работы создана и апробирована СППР для предотвращения ЧС в экстремальных условиях ДКП с предварительной достоверностью оценки риска возникновения сердечно-сосудистых нарушений не менее 75% и оценки риска наличия психо-эмоционального стресса у членов экипажа не менее 95%.

Основные результаты проведенной работы:

1. На основе проведенного анализа структуры и особенности МК для обеспечения орбитальных и межпланетных полетов, выявлены различия и дополнительные условия, требуемые для достижения приемлемого уровня безопасности. Определены факторы, представляющие наибольшую опасность в условиях длительного космического полета и требующие обеспечения контроля над ними. Важную роль занимают СППР для автоматизированной оценки состояния членов экипажа в условиях пилотируемого космического полета.

2. Разработан алгоритм для проведения оценки опасности возникновения сердечно-сосудистых и психо-эмоциональных расстройств состояния членов экипажа, на основе комбинации методов классификации для предупреждения чрезвычайных ситуаций с возможностью применения в условиях пилотируемого космического полета к другим планетам.

3. Построена СППР для обеспечения безопасности человека в космосе на основе алгоритма для предупреждения ЧС в экстремальных условиях межпланетного полета. Предварительная оценка показала, что достоверность оценки риска возникновения сердечно-сосудистых нарушений составляет не менее 75% и представляет практическую значимость для решения задачи совершенствования системы медицинского обеспечения комплекса систем жизнеобеспечения.

4. Построенная СППР для предупреждения чрезвычайных ситуаций была успешно апробирована и внедрена в ГНЦ РФ ИМБП РАН. Предварительная оценка показала,

что достоверность оценки риска наличия психо-эмоционального стресса не менее 95% случаев, что представляет высокую практическую значимость.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Развитие исследуемой темы будет проводиться в рамках работ по созданию новых технических методов и средств совершенствования СМК для ДКП, лунной и марсианской обитаемых баз. Стремительное развитие информационных технологий в области экспертных систем может внести коррективы в существующий алгоритм. Однако предложенный подход к решению задачи прогнозирования медико-психологических экстремальных ситуаций при обеспечении безопасности в ДКП останется неизменным, хотя новые разработки позволят увеличить точность работы системы и расширить ее возможности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Литвина, Д.В. Вопросы качества обработки и анализа психофизиологических исследований для предупреждения чрезвычайных ситуаций в условиях моделирования длительного космического полета / Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова, В.И. Гуцин // Качество и жизнь. – 2016. - №3(11). – С. 37-39.
2. Литвина, Д.В. Математические методы теории поддержки принятия решений в медицине / Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. - №5. – С. 223-226.
3. Литвина, Д.В. Некоторые аспекты обеспечения безопасности длительных пилотируемых космических полетов / Д.В. Литвина // МНИ «Современные фундаментальные и прикладные исследования». – 2016. - №4(23). - С. 88-94.
4. Литвина, Д.В. Система интеллектуальной поддержки принятия решения для сохранения работоспособности человека в экстремальных условиях, / Д.В. Литвина // Мониторинг. Наука и технологии. - 2017. - №2(31). – С. 36-40.
5. Литвина, Д.В. Система поддержки принятия решений для повышения качества медицинского контроля в межпланетных пилотируемых космических полетах / Д.В. Литвина, А.Н. Князев, Л.Б. Строгонова //Качество и жизнь.–2017. - №3(15). – С. 33-45.
6. Литвина, Д.В. Совершенствование системы медицинского контроля длительного космического полета / Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова // МНИ «Современные фундаментальные и прикладные исследования». – 2017. - №3(26). - С. 36-43.
7. Litvina, D. Application of space telemedicine technology in managing emergencies on the ground / D. Litvina, L. Strogonova // International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2012. – 2012. – P. 103-106.

8. Litvina, D. /Mathematical methods of space telemedicine technologies applicable to remote rural settlements / D. Litvina, L. Strogonova // International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2013. – 2013. – P. 21-24.
9. Litvina, D. Math methodology for the supporting theory of decision taking processes in medicine / D. Litvina, L. Strogonova // International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. – 2014. – P. 191-193.
10. Литвина, Д.В. К вопросу о медицинском контроле жидких биологических сред в пилотируемых космических полетах /Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике». – 2012. – С. 197-198.
11. Литвина, Д.В. Математические методы космических телемедицинских технологий применяемых для отдаленных сельских поселений / Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике». – 2013. – С. 126-127.
12. Литвина, Д.В. Применение космических телемедицинских технологий для отдаленных сельских поселений / Д.В. Литвина // Сборник материалов молодежной конференции «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники». – 2013. – С. 182-185.
13. Литвина, Д.В. Автоматизированный подход к принятию медицинского решения для диагностики инфаркта миокарда при длительном космическом полете к другим планетам / Д.В. Литвина // Евразийский союз ученых (ЕСУ). - 2016. - № 5 (26). - часть 2. - С. 52-53.

Подписано в печать: 22.10.2017
Объем: 1,0 усл.п.л.
Тираж: 100 экз. Заказ № 1951
Отпечатано в типографии «Реглет»
125315, г. Москва, Ленинградский проспект д. 74, корп. 1
+7(495) 790-47-77 www.reglet.ru