

**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
НАУЧНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАИ НИУ)**



На правах рукописи

**ЛИТВИНА ДАРЬЯ ВЛАДИМИРОВНА**

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

Специальность 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации  
(авиационная и ракетно-космическая техника),

Специальность 05.26.02 Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
(авиационная и ракетно-космическая техника)

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Строгонова Любовь Борисовна

Научный консультант:  
доктор технических наук, профессор  
Евдокименков Вениамин Николаевич

**МОСКВА – 2017**

## Оглавление

Оглавление .....	2
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. Анализ особенностей обеспечения безопасности космонавтов в условиях длительного космического полета, постановка задачи оценки состояния космонавтов и предотвращение чрезвычайных ситуаций .....	9
1.1. Анализ особенностей обеспечения безопасности космонавтов в условиях длительного космического полета.....	9
1.2. Постановка задачи оценки состояния космонавтов и предотвращение чрезвычайных ситуаций в длительном космическом полете .....	22
1.3. Выводы по главе 1 .....	24
ГЛАВА 2. Автоматизация оценки состояния космонавтов в условиях длительного космического полета.....	25
2.1. Постановка задачи классификации .....	25
2.2. Методы решения задачи классификации.....	30
2.2.1. Дискриминантный анализ .....	31
2.2.2. Байесовский классификатор.....	33
2.3. Общие положения при моделировании систем поддержки принятия медицинского решения.....	37
2.4. Описание экспериментальных данных .....	39
2.5. Выводы по главе 2 .....	53
ГЛАВА 3. Описание программного комплекса.....	54
3.1. Общая структура алгоритма реализации байесовского классификатора.....	54
3.2. Структура системы поддержки принятия решений.....	59
3.3. Выводы по главе 3 .....	65
ГЛАВА 4. Результаты тестирования программного комплекса.....	66

4.1. Тестирование системы поддержки принятия решений на примере концентраций биохимических параметров, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы .....	66
4.2. Тестирование системы поддержки принятия решений на примере расширенного перечня параметров, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы .....	70
4.3. Тестирование системы поддержки принятия решений на примере амплитудно-частотных параметров речи человека, характеризующих психофизиологический статус и качество работы человека-оператора.....	78
4.4. Возможность применение системы поддержки принятия решений для предупреждения чрезвычайных ситуаций в экстремальных условиях профессиональной деятельности на наземных объектах.....	87
4.4. Выводы по главе 4 .....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	94
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	96

## **ВВЕДЕНИЕ**

В диссертационной работе рассматриваются вопросы совершенствования существующей системы медицинского обеспечения, являющейся составной частью комплекса систем обеспечения жизнедеятельности космонавтов при длительных космических полетах к другим планетам. Для обеспечения надежности операторской деятельности и безопасности пилотируемого полета необходимо проводить мониторинг и анализ параметров с целью предупреждения чрезвычайных ситуаций и выявления опасных состояний для обеспечения безопасности экипажа и предотвращения нештатных и чрезвычайных ситуаций на борту космического аппарата. Автономный характер межпланетной экспедиции требует создания новых средств медицинского контроля для космонавтов, работающих в экстремальных условиях профессиональной деятельности. Рассматриваются вопросы разработки системы поддержки принятия решений для автоматизированной оценки состояния членов экипажа для своевременного предотвращения чрезвычайных ситуаций в пилотируемом полете.

### **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 система 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**

В литературе рассмотрено множество СППР. Отдельно выделены алгоритмы, которые формализуют знания экспертов, данные типы алгоритмов относят к экспертным системам, 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, работающих в экстремальных условиях профессиональной деятельности.

## Цели и задачи

**Целью работы** является совершенствование системы медицинского обеспечения для предотвращения ЧС, обеспечения безопасности жизнедеятельности и профессиональной деятельности 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

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:

- сердечнососудистых 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.

### **Достоверности 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).



## **ГЛАВА 1. Анализ особенностей обеспечения безопасности космонавтов в условиях длительного космического полета, постановка задачи оценки состояния космонавтов и предотвращение чрезвычайных ситуаций**

### **1.1. Анализ особенностей обеспечения безопасности космонавтов в условиях длительного космического полета**

За более чем полувековой период космонавтика прошла большой и сложный путь. С момента первого полета человека в космос чрезвычайно важным остается обеспечение безопасности пилотируемых полетов в космос [53].

В настоящее время перспективными направлениями развития пилотируемой космонавтики являются:

- освоение и эффективное использование околоземного орбитального пространства;
- создание постоянно действующей обитаемой базы на Луне;
- осуществление пилотируемых полетов к Марсу с высадкой экспедиции на его поверхность [38].

Безопасность ДКП складывается из трех основных факторов: технического, организационного и «человеческого фактора» экипажа и работников ЦУПа. Если ранее в рамках космических полетов малой длительности возможно было рассматривать эти факторы изолированно, то в связи с планированием длительного космического полета (ДКП) к другим планетам необходимо консолидированно подходить к вопросам безопасности полетов, что требует разработки новых методов, методик, систем и средств. [57]

Большинство нештатных ситуаций, произошедших из-за «человеческого фактора», связано с нарушениями физиологического статуса человека-оператора, характеризующимися изменениями состояния здоровья. Для предотвращения операторских ошибок из-за «человеческого фактора» необходимо осуществлять мониторинг ключевых физиологических показателей и прогнозировать наступление критических точек. По отечественным данным доля происшествий, имеющих одним из факторов ошибку экипажа, составляет около 60...80% [45].

В космическом полете на организм человека могут влиять три основные группы факторов:

1-я группа – крайне низкие степени барометрического давления, космическое излучение, метеорная опасность, температура, отсутствие атмосферы;

2-я группа – шум, вибрация, ускорение, невесомость;

3-я группа – длительная изоляция, микроклимат кабины, психологическая совместимость членов экипажа, изменение суточной периодики [57].

Невесомость, или более точно – микрогравитация, по современным представлениям оказывает наиболее существенное влияние на организм человека во время полетов на орбитальных станциях, имеющих герметичные жилые отсеки достаточно большого объема с составом атмосферы, близким к земному, и трасса которых проходит ниже радиационных поясов Земли. Функциональные сдвиги, развивающиеся под влиянием микрогравитации в организме человека, представляют собой сочетание специфических изменений, обусловленных физической природой этого фактора, а также вторичных проявлений, связанных с адаптивными реакциями (Газенко, Егоров, 1984; Газенко, Григорьев, Егоров, 1990; Grigoriev, Egorov, 1991, 1996) [29].

В связи с воздействием микрогравитации организм человека начинает адаптироваться к новым условиям функционирования, таким образом, происходят обратимые при возвращении на Землю изменения во всех органах и системах.

В период острой адаптации при смене гравитационной постоянной происходят первичные изменения, связанные с воздействиями невесомости, затем включаются вторичные механизмы, такие как: перераспределение жидких сред организма, уменьшение нагрузки на опорно-двигательную и мышечную системы, изменение сенсорного входа и т.д.

Для компенсации воздействия негативных факторов в условиях ДКП применяется комплекс средств профилактики.

Выполненные во время ДКП исследования показали, что человек достаточно хорошо приспособляется и эффективно работает в условиях невесомости длительностью до 14,2 месяцев. Вместе с тем был выявлен ряд типичных изменений в основных системах организма, развивающихся при длительном пребывании в микрогравитации. В целом симптомокомплексы этих изменений могут, особенно при недостаточно полном и рациональном использовании средств профилактики, вызывать дискомфортные ощущения, снижение работоспособности и резервных возможностей организма космонавтов, приводить к развитию неблагоприятных состояний представленных в табл. 1.1 [29].

табл. 1.1 [29]

<p><b>Центральная и периферическая нервная система.</b> Черепно-мозговая травма, травма спинного мозга, астено-невротический синдром, вегето-сосудистая дистония, невралгия, невриты, радикулиты, эмоциональные нарушения</p>
---

<b>Сердечно-сосудистая система.</b> Стенокардия, инфаркт миокарда, нарушения сердечного ритма и проводимости миокарда, гипертонические и гипотонические реакции, метаболические нарушения миокарда
<b>Органы дыхания.</b> Бронхиты, пневмонии
<b>Желудочно-кишечный тракт и печень.</b> Острые гастриты, энтероколиты, колиты, язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки, острый аппендицит, острый холецистит, желчнокаменная болезнь, метеоризм, геморрой, запоры, диарея, дисбактериоз
<b>Мочеполовые органы.</b> Уретриты, циститы, пиелоститы, простатиты, почечнокаменная болезнь
<b>Кожные покровы и кожно-жировая клетчатка.</b> Дерматиты, фурункулы, карбункулы, пиодермия, мелкие травмы, ссадины, раны, ожоги
<b>Оториноларингология и верхние дыхательные пути.</b> Риниты, синуситы, тонзиллиты, фарингиты, ларингиты, трахеиты, отиты, инородные тела, повреждения
<b>Офтальмология.</b> Конъюнктивиты, кератиты, блефариты, ячмень, инородное тело глаза, проникающие ранение глаз
<b>Стоматология.</b> Стоматиты, гингивиты, кариес, пульпиты, перелом верхней и нижней челюсти, вывих нижней челюсти
<b>Опорно-двигательный аппарат.</b> Ушибы, вывихи, переломы, повреждения связок, артриты, бурситы, миалгия, миозиты
<b>Аллергические реакции и заболевания</b>
<b>Онкологические и инфекционные заболевания</b>
<b>Жизнеугрожающие состояния.</b> Остановка сердечной деятельности и дыхания; шок травматический, ожоговый, анафилактический, кардиогенный, геморрагический; черепно-мозговая кома; интоксикации; гипоксия; асфиксия

Способность к уравниванию с окружающей средой является важнейшей особенностью живой системы. В условиях космического полета одним из ведущих факторов окружающей среды становится невесомость [48]. Сердечно-сосудистая система является главной мишенью воздействия микрогравитации.

Сердечно-сосудистая система и система дыхания играют ведущую роль в обеспечении адаптации организма к условиям окружающей среды. В новых, необычных условиях невесомости сохранение необходимого уровня функционирования этих систем во многом зависит от работы регуляторных механизмов [13].

Между состоянием здоровья и болезни существует несколько переходных состояний, называемые донозологическими. Особенно важно их отслеживать для космической медицины в рамках обеспечения безопасности полета, так как они являются предвестниками опасных состояний космонавтов.

Необходимо осуществлять индивидуальный подход к каждому человеку, так как понятие нормы и патологии для всех разное. Однако множество физических и биохимических параметров, таких как величина артериального давления, клинические показатели крови и т.д., имеют однородные значения для большинства индивидуумов из популяции.

В ходе космического полета организм человека пытается адаптироваться к изменившимся условиям окружающей среды, изменяя уровни функционирования (УФ). Для того, что бы корректно перейти на новые условиях функционирования необходимо затратить часть функциональных резервов и мобилизовать регуляторные механизмы, необходимые для поддержания гемостаза. Степень напряжение регуляторных систем соответствует настоящему функциональному состоянию человека. Донозологическое состояние сменяется на патологическое только при истощении и превышении ресурса регуляторных систем человека.

Основа донозологической диагностики заключается в измерении физических и физиологических качеств, психофизиологического состояния, т.е. качественных и количественных показателей здоровья и получении научно обоснованного ответа на вопрос о том, как далеко от возможной дезадаптации и развития заболевания находится человек. Задача, которая стоит перед донозологической диагностикой, – определить, какие профилактические мероприятия и когда необходимо провести для повышения уровня здоровья и предотвращения заболеваний [25].

Для того чтобы корректно освещать аспекты безопасности и чрезвычайных ситуаций на борту космического аппарата, необходимо ввести некоторые определения ключевых понятий и терминов [14]:

- безопасность экипажа – совокупность свойств космического комплекса и привлекаемых технических средств, обеспечивающих работоспособность космонавтов и исключающих ухудшение состояния здоровья или гибели космонавтов на всех этапах космического полета, а также обеспечивающих их возвращение на Землю без опасных для здоровья последствий [14];
- нештатная ситуация – состояние космического комплекса, его составных частей и привлекаемых технических средств, не предусмотренное программой их штатного функционирования в процессе полета [14];

- аварийная ситуация – нештатная ситуация, при которой имеется непосредственная угроза здоровью или жизни космонавтов [14];
- неблагоприятный фактор космического полета – фактор, соответствующий штатной программе полета, воздействие которого без специальных мер защиты может привести к ухудшению здоровья, травме или заболеванию экипажа [14].

Для обеспечения безопасности в ДКП с точки зрения «человеческого фактора» необходимо осуществлять мониторинг, как за физическим, так и психофизиологическим состоянием космонавта (Рис. 1.1). Если рассматривать медицинские аспекты обеспечения безопасности, то в работах Парина В.В. отмечается, что сердечно-сосудистая система первой реагирует на изменение условий окружающей среды и начинает к ним адаптироваться, используя внутренние резервы. Кроме того система кровообращения взаимодействует со всеми органами и системами организма и нарушения ее функционирования оказывают влияние на организм в целом с негативным прогнозом. С точки зрения психофизиологического аспекта обеспечения безопасности, важно идентифицировать статус космонавта для предупреждения ошибок при операторской деятельности в ходе выполнения полетной программы.

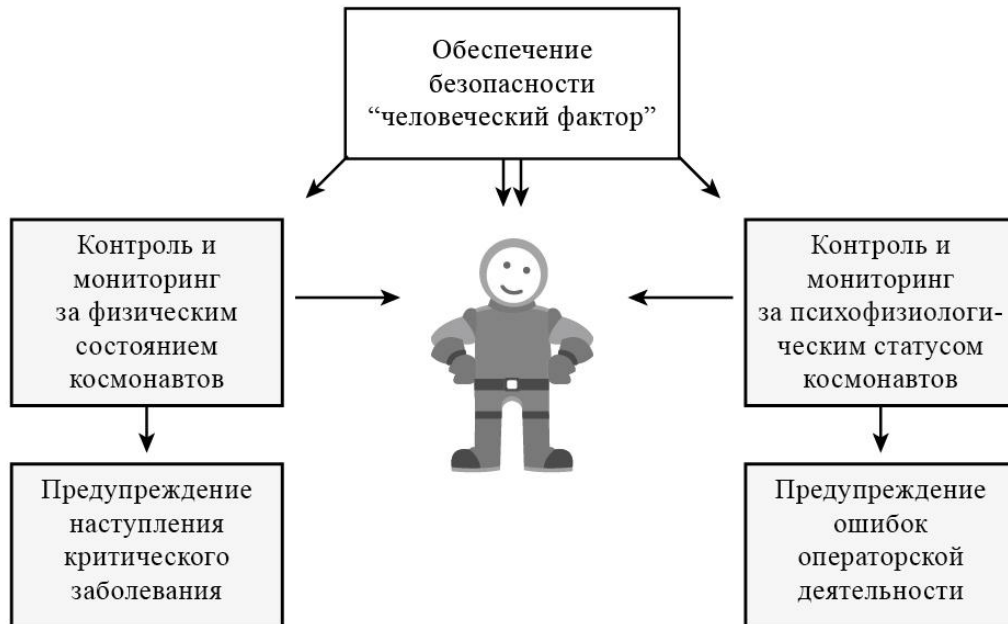


Рис. 1.1. Аспекты обеспечения безопасности с точки зрения «человеческого фактора»

В ходе космического полета особое внимание уделяется состоянию и функционированию сердечно-сосудистой системы; это выделено в отдельное направление – космическую кардиологию. Данный интерес обусловлен следующими факторами [49]:

1. Система кровообращения настолько тесно связана с другими системами организма, что может рассматриваться в качестве универсального индикатора различных нарушений [49].

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 [49].

3. В настоящее время реакции сердечно-сосудистой системы исследованы наиболее подробно как в условиях космического полета, так и при имитированном действии различных факторов [49].

Риск летальности, как известно, наиболее высок в первые часы после развития инфаркта миокарда (ИМ). Быстрота диагностирования острого инфаркта миокарда (ОИМ) – критический момент, от которого зависит своевременность и обоснованность терапии. Традиционно диагностика ИМ требует длительного мониторинга (от 6 до 12 часов) уровней тропонинов и других маркеров миокардиального некроза. Задержка в постановке диагноза может привести к повышению летальности [10].

Однако необходимо модернизировать диагностические мероприятия МК, связанные с выявлением прединфарктных состояний. На данный момент известно, что тесты на тропонин были разработаны для того, чтобы избавиться от ложноположительных результатов, которые дает тест на креатинкиназу-МВ [17].

Масштабные перспективные исследования показали: даже небольшое повышение уровня кардиальных тропонинов у пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) связано с повышенным риском неблагоприятных кардиальных событий [7, 9]. Именно это и привело к пересмотру диагностических критериев ИМ Всемирной организацией здравоохранения еще в 1979 г. [4]. Новые критерии ИМ, наряду с другими диагностическими признаками, устанавливали, что «любая степень миокардиального некроза, вызванного ишемией, должна обозначаться как ИМ» [2].

Как показано в [29, 49] 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 [37].

При разработке диагностической аппаратуры требования касаются выбора наиболее информативных параметров, реализуемых с помощью доступных измерительных средств и отражающих патологические изменения в организме или предрасположенность к ним [12].

ВОЗ рекомендует в полном объеме применять универсальное определение ИМ ESC/ACCF/АНА/WHF в финансово благополучных странах, в то время как в странах с ограниченными ресурсами допускается применение более гибких стандартов. Одним из таких вариантов является Российский стандарт медицинской помощи больным с острым инфарктом миокарда (приказ МЗ РФ №582 от 2 августа 2006 г. и приказ Минздравсоцразвития РФ №599н от 19 августа 2009 г. «Об утверждении порядка оказания плановой и неотложной медицинской помощи населению Российской Федерации при болезнях системы кровообращения кардиологического профиля»). В них рекомендуется использование таких трех маркеров цитолиза кардиомиоцитов, как концентрация миоглобина, активность креатинкиназа МВ-фракция (СК-МВ) и уровень тропонинов [47].

В работах Строгоновой Л.Б. [54] обоснована возможность применения метода «сухая химия» для биохимического анализа жидких сред организма в условиях микрогравитации на борту орбитальной станции. Важной особенностью фотометрических анализаторов является то, что химическая реакция смешивания исследуемой жидкости проходит в капиллярном слое, т.е. для этих приборов используется метод «сухой химии». Движение жидкости в капилляре в условиях невесомости и на Земле согласно физической сущности процесса аналогично, что позволяет сравнивать результаты исследований на Земле и в космосе. Так же было доказано, что на Земле влияние на точность и воспроизводимость материала биопробы (капиллярная и венозная кровь, плазма) минимально. Точность воспроизведения, а также точность анализа, которая получена при сравнении с другими методами биохимических исследований, укладывается в нормы, предъявляемые Минздравом России к биохимической аппаратуре [54].

Оптимальным методом определения в условиях невесомости маркеров некроза миокарда является метод «сухая химия», который уже ранее применялся на борту орбитальной станции для определения других биохимических параметров. Кардиопанель анализатора Alere Triage® MeterPro содержит все необходимые параметры, такие как миоглобин, креатинкиназу-МВ (КК-МВ), тропонин I. Пробы не требуют специальной подготовки, необходимо только смешать цельную кровь или плазму с антикоагулянтом EDTA. На Рис. 1.2 представлено изображение кардиопанели Alere Triage® Cardiac Panel и анализатора Alere Triage® MeterPro.



а)



б)

Рис. 1.2. Иллюстрация экспресс анализатора и кардиопанели:

а) кардиопанель Alere Triage® Cardiac Panel; б) анализатор Alere Triage® MeterPro

Кроме того, экипаж межпланетной экспедиции будет подвержен воздействию хронического стресса, что обусловлено, в том числе, социально-бытовыми причинами (внутригрупповая коммуникация, нехватка персонального пространства) и условиями труда (монотонность и напряженность).

Как следствие жалобы на плохой сон, а именно длительное засыпание и частые ночные пробуждения, – наиболее часто предъявляемые космонавтами (Мясников, 1971). Развитию проблем со сном у космонавтов способствует действие ряда негативных факторов, таких как широкополосный шум, невесомость, гипокинезия, изоляция и др. (Мясников, 1971) [30].

Неуспешная адаптация к условиям деятельности в изоляции выражается в постоянно высоком уровне общения с внешними коммуникантами, когда в общении группы в равно высокой степени реализованы информационно-коммуникативная, регуляционно-коммуникативная и эмоционально-коммуникативная потребности [24]. Однако в случае полета к другим планетам это недопустимо и должно быть скорректировано.

Отечественные исследователи [41] собрали значительное количество данных об изменении психоневрологического статуса и работоспособности в течение длительного полета. Во время начальной стадии (1–6 недель) можно обнаружить эмоциональное напряжение и возбужденность из-за адаптации к условиям микрогравитации. После шести недель появляется скука, депрессия, нарушение сна (бессонница, невысыпание), раздражительность. К этим явлениям приводят условия изоляции, монотонность работы и недостаток комфорта. Растущая усталость приводит к ошибкам в операторской деятельности (до 30%), которые особенно очевидны при увеличении объема работы. В завершающей части полета может наблюдаться синдром «ожидания» и радостная эйфория [6].



Можно выделить следующие нефизиологические стрессобразующие факторы в экстремальных условиях космического полета: сенсорная депривация, монотония, рассогласование режима сна и бодрствования, изменение восприятия пространственной структуры, ограничение информации, одиночество, групповая изоляция, угроза жизни, «публичное одиночество» [34, 35, 41].

В адаптации к неблагоприятным условиям нейрогормональный фон организма имеет решающее значение, так как все процессы, в том числе микроциркуляция крови, тканевое дыхание на клеточном и субклеточном уровнях, интегрируются и координируются нейроэндокринными механизмами. Возрастание нервно-эмоциональных нагрузок в процессе трудовой деятельности приводит к состоянию напряжения, а нередко и перенапряжения функционального состояния организма, что можно рассматривать, как формирование производственного стресса [34, 35, 41].

Важным параметром качества работы человека-оператора является его психофизиологическое состояние, так как стресс может значительно влиять на состояние здоровья. Обеспечение надежности операторской деятельности космонавтов является важнейшей задачей обеспечения безопасности длительных космических полетов (ДКП) к другим планетам, для этого необходимо осуществлять своевременную диагностику психофизиологического статуса членов экипажа межпланетной экспедиции [36].

Дистанционный контроль состояния работающих является единственно возможным способом получения значимых психоневрологических данных, базой профилактики неблагоприятных изменений психического здоровья в коллективе [5, 6, 8, 26].

Психодиагностика в системе медицинского обеспечения пилотируемых космических полетов направлена на выявление различных форм приспособительной активности человека в специфических условиях профессиональной деятельности. Иными словами, психодиагностика состояния здоровья космонавтов представляет собой синтез клинической, психологической и профессиональной оценок, осуществляемых специалистом-экспертом [40].

Экспертно-диагностическая работа в ходе полета в отличие от клинических условий осуществляется в режиме дистанционного наблюдения за «пациентом» (при отсутствии непосредственного контакта с ним) при дефиците диагностической информации и невозможности в ряде случаев проведения необходимых дополнительных исследований показанных на Рис. 1.3. [40].



Рис. 1.3. Схема экспертно-диагностической работы при дистанционном наблюдении

Психолингвистический анализ речи является одним из классов методов изучения речи. Данный класс расширяет задачу выявления эмоционального состояния говорящего до определения его работоспособности и в целом оценки его функциональных состояний. Эти методы основываются на положении о том, что психологическая и лингвистическая структура высказывания идентичны или максимально приближены друг к другу [56]. В состоянии эмоциональной напряженности и падения уровня работоспособности исследователи отмечают такие лингвистические особенности высказывания, как уменьшение словарного разнообразия речи, уменьшение длины слов. Речь становится более стереотипизированной, возрастает спонтанная активность в выборе наиболее привычных языковых единиц [11].

Целью проводимого Роскосмосом и реализованного в 2010–2011 гг. Институтом медико-биологических проблем (ИМБП) РАН эксперимента «Марс-500» явилось изучение взаимодействия человек – окружающая среда и получение экспериментальных данных о состоянии здоровья и работоспособности человека, находящегося в условиях изоляции в герметично замкнутом пространстве ограниченного объема при моделировании основных отличий и ограничений, присущих марсианскому полету. В рамках проекта изучались медико-биологические аспекты автономного пилотируемого полета на Марс международного экипажа из шести человек в возрасте от 25 до 40 лет: трех россиян, двух представителей Европейского космического агентства (ЕКА) и представителя Китайского космического агентства [55].

В ходе 520-суточной изоляции экипаж выполнял интенсивную научную программу, включающую более 100 экспериментов, реализовал мероприятия по профилактике действия моделируемых неблагоприятных факторов длительного космического полета. Автономные условия существования создавались путем ограничения количества имеющихся у экипажа ресурсов и прекращения дооснащения с 36-х суток эксперимента. Впервые применительно к межпланетному полету с помощью компьютерной сети воссоздалась нарастающая задержка связи Центра управления полетами (ЦУП) с экипажем, которая к 350-м суткам эксперимента достигла 12 мин. Кроме того, на 320–327-е сутки эксперимента моделировалось полное

прекращение связи с экипажем. В период задержки связи для общения с ЦУПом экипаж использовал электронные послания и видеосообщения [55].

Научные результаты эксперимента «Марс-500» связаны с определением особенностей действия моделируемых факторов межпланетного космического полета на психофизиологические возможности человека-оператора [55].

Психофизиологическое состояние (функциональное) – это совокупность трех составляющих: внутренние психофизиологические условия; внешняя среда, в том числе и социальная; факторы деятельности. Всякая деятельность, идеальная (психическая) или внешне реализуемая (поведенческая), предполагает наличие определенного фона или, другими словами, определенных условий. При одних условиях эта деятельность может протекать успешно, при других – менее успешно, при третьих – вообще невозможна. Для биологических систем высокого уровня развития, каким является человек, определение условий, детерминирующих различные реакции, является решающим, но часто вызывает затруднения. Каждый из нас субъективно отличает состояние высокой работоспособности от состояния утомления и сонливости, напряжение внимания от расслабленности [44].

Под психофизиологическим состоянием понимается некоторый симптомокомплекс характеристик физиологических и психофизиологических процессов, определяющих уровень активности функций и систем организма, особенности жизнедеятельности, и обуславливающих в большой мере работоспособность и поведение человека [44].

Психофизиологическое состояние выступает в качестве важнейшего фактора, обуславливающего успешность и продуктивность деятельности человека в сфере труда, общения, познания, оказывает существенное влияние на эффективность и качество различных видов деятельности [44].

Изучение общения космических экипажей с ЦУПом является штатной процедурой. Главной целью этого анализа является получение оперативных диагностических данных о психоневрологическом статусе членов экипажа под влиянием факторов космического полета. Основным преимуществом подхода является проведение мониторинга космонавтов непосредственно в ходе выполнения ими реальной деятельности – радиопереговоров с ЦУПом, без использования дополнительного оборудования и специального выделения времени экипажа для проведения обследований. В ДКП, а также в модельных гермокамерных экспериментах показано, что содержание и объем сообщений членов экипажа коррелирует с индивидуальным уровнем адаптации к условиям ДКП либо модельного эксперимента. Принципиально новые возможности дистанционного психофизиологического мониторинга открывает автоматизированный контент-анализ [22].

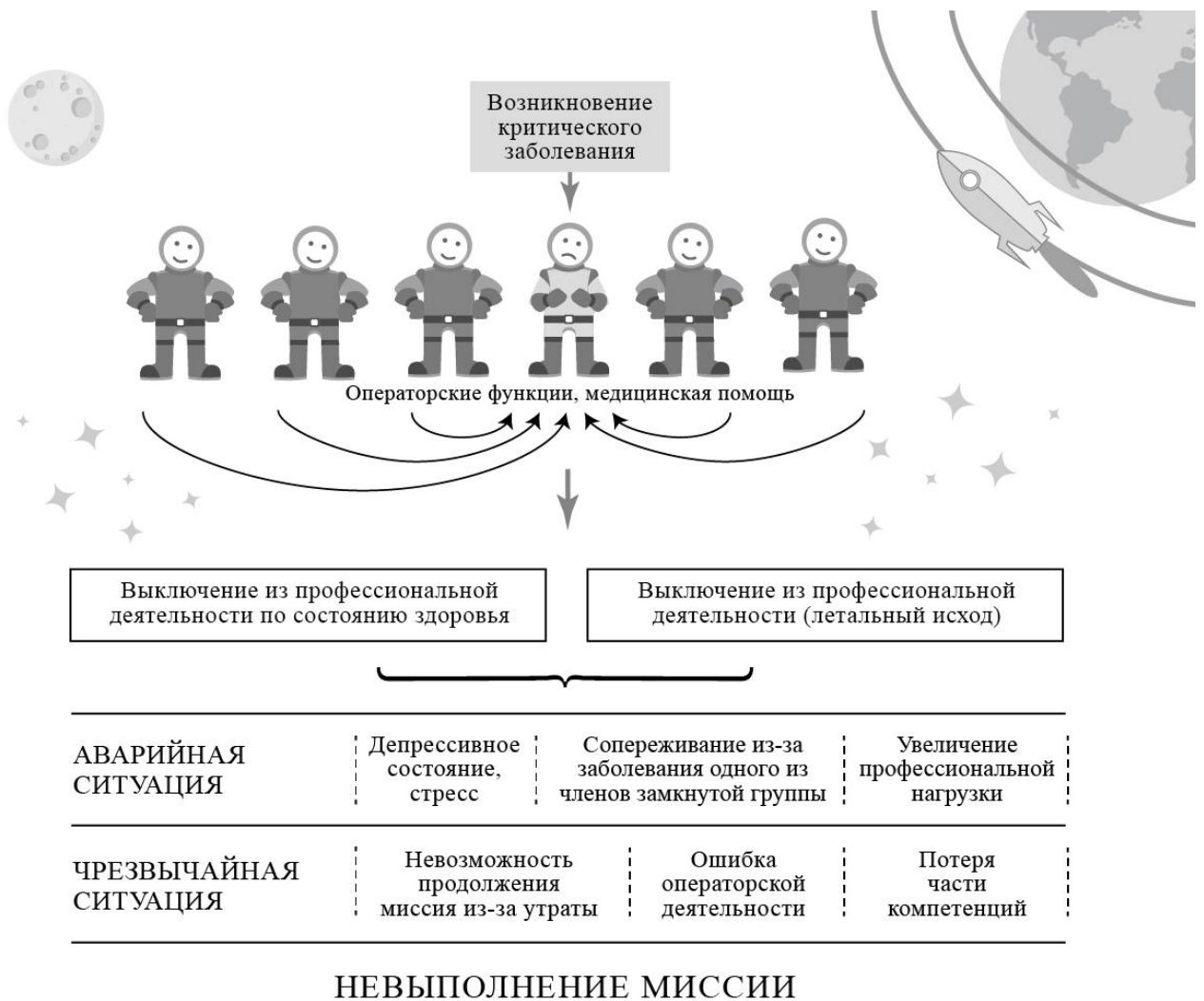


Рис. 1.4. Схема развития чрезвычайной ситуации в ходе длительного космического полета

Одной из существенных опасностей возникновения чрезвычайной ситуации на борту космического аппарата является заболевание члена экипажа. Причиной возникновения этого является осуществление профессиональной деятельности в экстремальных условиях ДКП, и можно выделить следующие основные факторы опасности заболевания или ухудшения здоровья:

- 1) негативные факторы космического полета как основной: невесомость и другие – такие, как радиация, температура, общее давление, парциальное давление газов, шум и вибрация, токсичные вещества, недостаток пищи и воды и т.д.;
- 2) агрессивность микроорганизмов, подвергшихся изменениям в условиях космического полета;

3) травматизм из-за взаимодействия типа человек – машина.

На Рис. 1.4 отражена картина развития ЧС в ходе ДКП по причине заболевания одного из космонавтов; данное обстоятельство по ряду причин может привести к аварийной ситуации, а затем к ЧС и невыполнению поставленных целей.

Комплекс систем жизнеобеспечения играет важную роль в обеспечении безопасности космонавтов в ДКП. Составной частью комплекса является система медицинского обеспечения (СМО) и средства медицинского контроля экипажа (СМК), которые необходимы для оценки отклонений от предельно допустимых значений параметров, характеризующих состояние организма на всех этапах ДКП.

Основные принципы медицинского контроля (МК) в длительных космических полетах [29]:

1. Патогенетический принцип – ориентация на выявление и диагностику наиболее вероятных прогнозируемых состояний и заболеваний.
2. Плановые скрининговые обследования.
3. Индивидуализация диагностических обследований.
4. Коррекция программы обследований в зависимости от состояния членов экипажа.
5. Оценка изменений функций организма с учетом адекватности условиям среды.
6. Преимущество проведения обследований на всех этапах подготовки к полету, в полете и после его завершения.
7. Информационно-анамнестический анализ, предусматривающий использование информации, содержащейся в базе данных.
8. Конфиденциальность результатов медицинских обследований. [29, 43]

Периодичность МК определяется составленной программой обследования космонавта (ПОК) на ближайшие сутки, неделю и т.д. Данная программа разрабатывается на базе вышеперечисленных принципов МК. Основные мероприятия ПОК – это плановые скрининговые обследования членов экипажа, которые имеют профилактические цели для ранней диагностики и предупреждения опасных состояний здоровья или же показаний для проведения более детального обследования той или иной системы организма космонавта.

Методики, используемые для МК на борту космического аппарата (КА) или космической станции, обусловлены не только потребностями в контроле физиологических параметров членов экипажа, а также раннего выявления отклонений от предельно допустимых значений опасных состояний, но и медико-техническим обеспечением и возможностями

средств медицинского контроля в условиях ДКП. В любом случае оптимальный баланс между потребностями и техническими возможностями достигается как компромисс (Рис. 1.5).



Рис. 1.5. Схема особенностей технических средств медицинского контроля

Негативные факторы ДКП при межпланетных экспедициях неблагоприятно воздействуют на организм человека, что ведёт к изменению регистрируемых физиологических параметров. Благодаря имеющемуся опыту орбитальных ДКП возможно определить наиболее вероятные риски с точки зрения безопасности, а также разработать методики диагностики в условиях ограниченности технических аппаратов и средств медицинского контроля. В рамках подготовки к межпланетным экспедициям для уменьшения рисков, необходима разработка новых средств медицинского контроля для обеспечения жизнедеятельности.

## 1.2. Постановка задачи оценки состояния космонавтов и предотвращение чрезвычайных ситуаций в длительном космическом полете

В условиях ДКП к другим планетам действует множество негативных факторов, среди которых можно выделить такие, как автономность, изоляция экипажа и задержка связи с ЦУПом. Для предупреждения чрезвычайных ситуаций на борту и обеспечения безопасности членов экипажа космического корабля в рамках системы медицинского обеспечения и поддержания корректного состояния работоспособности и здоровья космонавтов на плечи бортового специалиста ложится задача по дифференциальной диагностике и предупреждению угрожающих и опасных состояний космонавтов, которые характеризуются отклонением параметров от нормы. [37]

В рамках длительных межпланетных полетов, особую важность приобретает оценка не отдельных показателей, а совокупности или ряда параметров. Такая оценка должна основываться на обработке исходных данных статистическим или иным методом. Подобная

тактика позволит уменьшить количество анализируемых параметров и рассматривать их консолидированно.

Для космической медицины актуальнее применение систем поддержки принятия решения (СППР) в процессе диагностических мероприятий. Исходные параметры представляют собой совокупность совершенно разнородных данных, анализ которых и процесс принятия решений затруднен в силу ряда причин:

- большой объем информации и требуемой памяти;
- наличие ошибок и противоречий в исходной информации;
- малое время принятия решения;
- необходимость обеспечения точности, достоверности, корректности решения.

Бортовому специалисту необходимо обрабатывать большое количество данных и выявлять все значимые отклонения параметров от нормы, после чего принимать решение о дальнейших действиях для корректировки состояния и работоспособности экипажа. Однако в межпланетном полете отсутствует связь в режиме реального времени с ЦУПом, а количество времени на принятие решения ограничено, что создает условия неопределенности для постановки и верификации диагноза, а так же определения дальнейшей тактики действий.

На Земле применяется специальное программное обеспечение в виде экспертных систем или словарей для различных микро и макро специализаций, функция которых поддержка принятия решения для специалиста в случае необходимости. Для использования на борту космического аппарата подобные системы отсутствуют. Дефицит времени для принятия решения диктует необходимость совершенствования существующих средств медицинского контроля и разработки нового средства для мониторинга за основными параметрами и в случае превышения предельно допустимого значения предупреждать бортового специалиста и прогнозировать наступление чрезвычайной ситуации для обеспечения безопасности межпланетного ДКП. Соответственно требуется разработка проблемно-ориентированной системы поддержки принятия решения для применения на борту космического аппарата следующего к другим планетам с целью эффективного мониторинга и предотвращения чрезвычайной ситуации и минимизации времени принятия корректного решения, что позволит благополучно завершить космическую экспедицию и выполнить полетную программу.

Таким образом, целью работы является совершенствование системы медицинского обеспечения для предотвращения ЧС, обеспечения безопасности жизнедеятельности и профессиональной деятельности космонавтов в экстремальных условиях ДКП. Для достижения данной цели решены следующие 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».

### **1.3. Выводы по главе 1**

1. Проведен анализ особенностей обеспечения безопасности космонавтов в условиях длительного космического полета, освещены негативные факторы космического полета и их воздействия на организм человека, а так же рассмотрены мероприятия по проведению медицинского контроля на борту космического аппарата.
2. На основании проведенного анализа выявлена новая и актуальная задача совершенствования существующей системы медицинского контроля и разработки СППР для предотвращения ЧС, обеспечения безопасности жизнедеятельности и профессиональной деятельности в экстремальных условиях ДКП.



## **ГЛАВА 2. Автоматизация оценки состояния космонавтов в условиях длительного космического полета**

### **2.1. Постановка задачи классификации**

В межпланетной экспедиции в отличие от орбитального полета в связи с появлением негативных факторов космического полета к другим планетам, таких как увеличенное время полета и воздействия негативных факторов, так называемый накопительный эффект, изоляция, отсутствие возможности взаимодействия в ЦУПом в режиме реального времени, невозможность экстренной эвакуации на Землю, появляется потребность в совершенствовании существующей системы медицинского контроля и автоматизации процесса принятия решения об отклонении предельно допустимых значений физиологических и психологических параметров, характеризующих наступление заболевания и нарушение безопасности ДКП.

Соответственно, в условиях ДКП при межпланетных перелетах возникает потребность в создании принципиально нового средства медицинского контроля в виде бортовой системы принятия решения, ввиду обособленности и изолированности экипажа, задержке аудио- и видеосигнала, невозможности мгновенного возвращения космонавтов на Землю в случае нештатной (аварийной) ситуации.

Система поддержки принятия решения, по сути, является медицинской биотехнической системой (БТС) диагностического типа (Рис. 2.1) учитывают особенности объекта исследования, способов регистрации сигналов и интерпретации результатов. Исследования в этой области необходимы для определения более узких требований к датчикам, конфигурации технических средств, математическим алгоритмам обработки и интерпретации сигналов от объекта.



Рис. 2.1. Схема диагностической БТС

Экспертные системы применяются в сочетании с базами данных для обеспечения распознавания образов по такому же принципу, как это делает человек, и с автоматизированными системами принятия решений для обеспечения выявления знаний с помощью анализа скрытых закономерностей в данных и создания, таким образом, интеллектуальной базы данных [3]. Принцип работы экспертной системы представлен на Рис. 2.2.

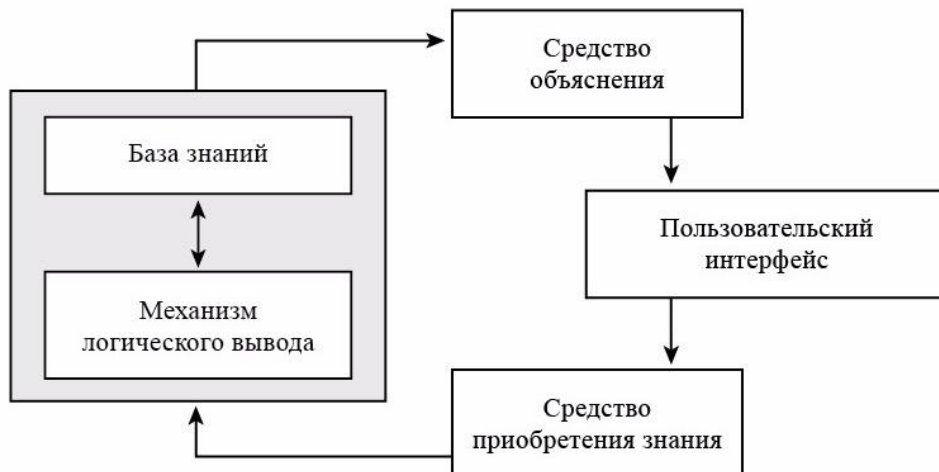


Рис. 2.2. Принцип работы экспертной системы

Однако стоит отметить, что на данный момент времени не существует системы, которая могла бы работать абсолютно в любых областях жизнедеятельности, но отдельные проблемно-ориентированные СППР эффективны в своих областях применения.

В условиях космического полета физиологические процессы в организме космонавтов протекают по новым законам и на данный момент не до конца изучены, вследствие чего появилась необходимость создания БТС для оценки и формирования представления о нормах диагностических исследований физиологических показателей в условиях ДКП. Предыдущий опыт показывает, что в ходе адаптации к условиям микрогравитации в организме человека происходят функциональные изменения, что приводит к формированию нового равновесного состояния и появлению новых норм референсных значений диагностических исследований, в связи с чем необходимо использовать новые математические методы для создания БТС с целью поиска новых закономерностей в области космической физиологии человека.

Для разработки эффективной системы медицинского обеспечения необходима разработка нового средства медицинского контроля для уменьшения зависимости экипажа от ЦУПа и минимизации времени для принятия решений и повышения его качества. Экспертная проблемно-ориентированная система нацелена на решение подобных задач в экстремальных условиях ограниченности ресурсов и неопределенности. Данная система будет включать в себя базы данных значимых параметров и их референсных значений для мониторинга опасных состояний космонавтов.

Формализация и автоматизация знаний имеет определенные особенности в зависимости от области исследования. Так процесс мониторинга значимых параметров на борту космического аппарата можно разделить на два этапа:

- 1) проведение текущего медицинского контроля и предварительное заключение, характеризующее состояние и степень опасности наступления чрезвычайной ситуации;
- 2) верификация предварительного заключения, которое включает проведение углубленных медицинских обследований, доступных в условиях ДКП.

На Рис. 2.3 представлена схема процесса медицинского контроля в виде логической диаграммы с присущими ей специализированными символами структурного системного анализа. Данная схема учитывает этапность проведения мониторинга значимых параметров на борту космического аппарата.

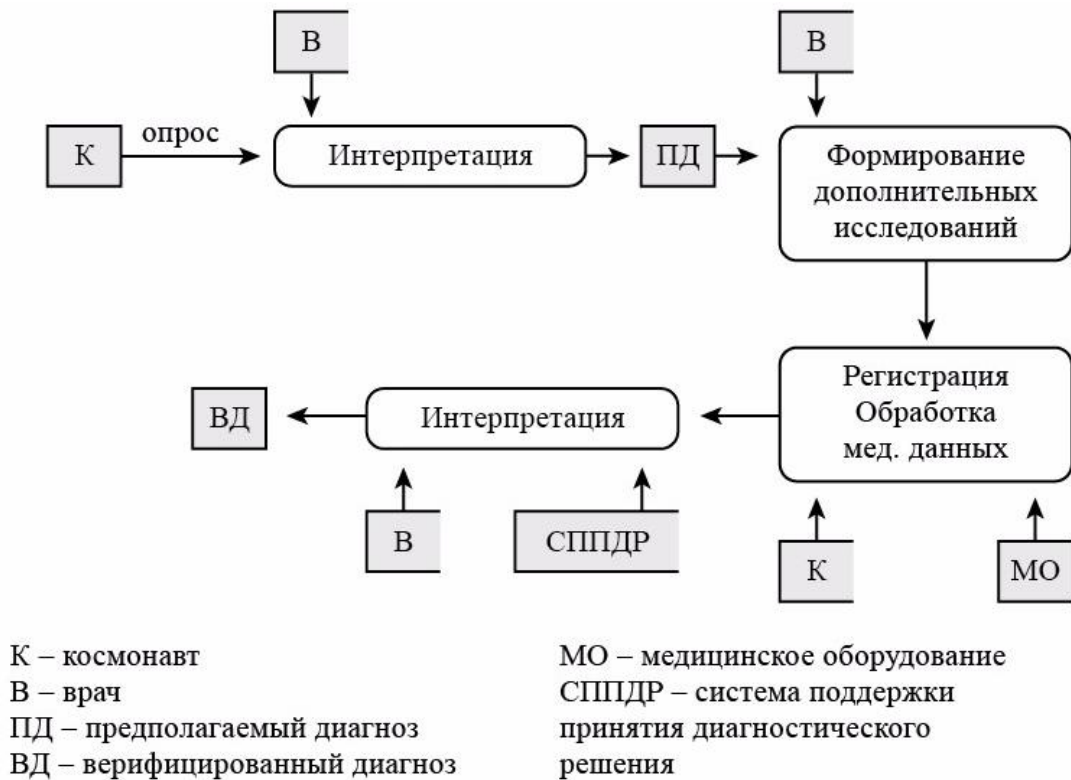


Рис. 2.3. Схема процесса медицинского контроля

На этапе верификации предварительного заключения в условиях ДКП требуется поддержка принятия решения для специалиста на борту космического аппарата. Исходными данными будут результаты мониторинга, 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 заключением. В таком случае автоматизация диагностического процесса – это не что иное, как классическая задача классификации, которая является одним из разделов теории машинного обучения.

Графическое представление классической постановки задачи классификации представлено на Рис. 2.4. Предположим, что  $s$  – элемент (симптом заболевания), представленный для классификации, а  $S$  – множество элементов  $s$ . Соответственно каждый  $s \in S$  и может содержать неограниченное количество признаков. Теперь предположим, что каждый элемент  $s$  имеет некоторые особенности и принадлежит к какому-либо классу. Метки класса (диагнозы заболеваний) объединены в множество  $D$  [28, 39].

На этапе обучения на вход системе подается обучающая выборка  $\Omega = ((s_1, y_1), \dots, (s_j, y_j))$ , в которой доступна информация о классах в виде некоторого множества пар  $(s_j, y_j), j=1, \dots, N$ ,

являющихся прецедентами. По обучающей выборке требуется найти решающее правило – функцию типа  $h: S \rightarrow D$ , которая разбивает элементы  $s_i \in S$  на несколько классов [19, 28, 39].

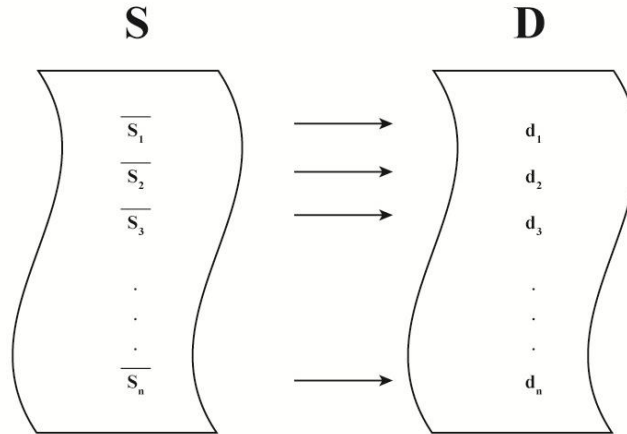


Рис. 2.4. Иллюстрация задачи классификации

Рассмотрим вариант бинарной классификации  $D=\{-1,1\}$ , а решающая функция будет называться индикаторной. В этом случае вся выборка будет разбита на две подвыборки:  $\Omega^+ = ((s_i, y_i) : y_i = 1)$  – первый класс и  $\Omega^- = ((s_i, y_i) : y_i = -1)$  – второй класс. В ряде случаев индикаторная функция  $h$  (2.1) задается с помощью некоторой вещественной функции  $f$  и числа  $r \in R$  [19]:

$$h(s) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(s) > r, \\ -1 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $h$  – индикаторная функция;

$f(s)$  – вещественная функция;

$r$  – число  $r \in R$  [19].

Пары  $(s, y)$  являются реализациями случайной величины  $(S, Y)$ , которая имеет распределение вероятностей  $P(s, y)$  [19].

Предсказательная способность некоторой функции классификации  $h$  будет оцениваться по ошибке классификации, которая определяется как вероятность неправильной классификации [19]:

$$err_p(h) = P\{h(S) \neq Y\} = P\{(s, y) : h(s) \neq y\}, \quad (2.2)$$

где  $err_p(h)$  – функция риск-функционал;

$h(S)$  – функция от случайной величины  $S$ ;

$(S, Y)$  – случайная величина;

$(s, y)$  – реализация случайной величины;

$P(s,y)$  – распределение вероятностей случайной величины  $(S,Y)$  [19].

Здесь  $h(S)$  – функция от случайной величины  $S$  также является случайной величиной, поэтому можно рассматривать вероятность события  $\{h(S) \neq Y\}$ . Функция  $err_p(h)$  также называется риск-функционалом [19].

Задача обучения распознавания образов есть частный случай задачи и минимизации среднего риска [16].

## 2.2. Методы решения задачи классификации

Стремительное развитие IT-технологий ведет к значительному увеличению объемов данных и информации, для анализа которых возможности специалистов-экспертов уже не хватает. Требуются новые автоматизированные подходы к решению подобных задач. В лечебно-профилактических учреждениях ситуация схожа, так как они оснащены широким спектром профильного оборудования для сбора данных, а так же масштабными хранилищами информации для хранения и дальнейшей обработки. Данная ситуация свидетельствует о тенденции увеличения количества разнородных электронных данных и возможности применения методов интеллектуального анализа.

Для решения задачи классификации используются методы распознавания, с точки зрения машинного обучения можно выделить три группы:

1. группа методов сравнения с прототипом;
2. статистические методы;
3. группа методов дискриминантного анализа.

Группа методов сравнения с прототипом включает в себя набор довольно простых способов решения задачи классификации, таких как непосредственно метод сравнения с прототипом, метод  $k$ -ближайших соседей, алгоритмы вычисления оценок (голосования), коллективы решающих правил и т.д.

Статистические методы, характеризуются применением правила Байеса, частным случаем является алгоритм байесовского классификатора (БК).

Группа методов дискриминантного анализа включает множество методов таких как дискриминантный анализ, нейронные сети, логистическая регрессия, дерево принятия решений и т.д.

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 простоты.

### 2.2.1. Дискриминантный анализ

Основной целью дискриминантного анализа является нахождение такой линейной комбинации переменных, которая бы оптимально разделила рассматриваемые группы. Каноническая дискриминантная функция имеет следующее математическое представление [58, 31]:

$$f_{km} = u_0 + u_1 X_{1km} + u_2 X_{2km} + \dots + u_p X_{pkm}, \quad (2.3)$$

где  $f_{km}$  – значение канонической дискриминантной функции для  $m$ -го объекта в группе  $k$ ;

$X_{ikm}$  – значение дискриминантной переменной  $X_i$  для  $m$ -го объекта в группе  $k$ ;

$u_i$  – коэффициенты, обеспечивающие выполнение требуемых условий [58, 31].

В общем случае необходимо рассчитать  $p$  дискриминантных функций, равное количеству анализируемых популяций, после чего с использованием коэффициентов  $u_p$  и постоянной  $u_0$  можно провести классификацию любого произвольного наблюдения [58].

Для расчета коэффициентов дискриминантных функций нужен статистический критерий, оценивающий различия между группами. Очевидно, что классификация переменных будет осуществляться тем лучше, чем меньше рассеяние точек относительно центроида внутри группы и чем больше расстояние между центроидами групп. Один из методов поиска наилучшей дискриминации данных заключается в нахождении таких дискриминантных функций  $f_k$ , которые были бы основаны на максимуме отношения межгрупповой вариации к внутригрупповой [58].

Введем матрицу сумм квадратов и попарных произведений  $T$ , являющуюся квадратной симметричной матрицей. Элементы матрицы  $T$  задаются соотношением [31]:

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^g \sum_{m=1}^{n_k} (X_{ikm} - X_{i..})(X_{jkm} - X_{j..}), \quad (2.4)$$

где  $g$  – число классов;

$n_k$  – число наблюдений в  $k$ -м классе;

$n$  – общее число наблюдений по всем классам;

$X_{ikm}$  – величина переменной  $i$  для  $m$ -го наблюдения в  $k$ -м классе;

$X_{ik.}$  – средняя величина переменной  $i$  в  $k$ -м классе;

$X_{i..}$  – средняя величина переменной  $i$  по всем классам (общее среднее) [31].

Выражение в скобках является отклонениями значений переменных от общего среднего. Если разделить каждый элемент  $T$  на  $(n - 1)$ , получим ковариационную матрицу [31].

Для измерения разброса внутри классов служит матрица  $W$ , которая отличается от  $T$  тем, что ее элементы определяются средними значениями переменных для отдельных классов (2.5), а не общими средними [31, 27]:

$$W_{ij} = \sum_{k=1}^g \sum_{m=1}^{n_k} (X_{ikm} - X_{ik.})(X_{jkm} - X_{jk.}). \quad (2.5)$$

Если элементы матрицы  $W$  разделить на  $(n. - g)$ , получится внутригрупповая ковариационная матрица; она является взвешенным средним ковариационных матриц отдельных классов [31, 27].

Когда центроиды различных классов совпадают, элементы матриц  $T$  и  $W$  также будут равны (поскольку, тогда  $X_{ik.} = X_{i..}$ ). Если же центроиды у классов разные, элементы  $W$  будут меньше соответствующих элементов матрицы  $T$ . Эта разница обозначается как матрица  $B$  ( $B = T - W$ , т.е.  $b_{ij} = t_{ij} - W_{ij}$ ) [31, 27].

Матрица  $B$  называется межгрупповой суммой квадратов отклонений и попарных произведений. Величины элементов  $B$  по отношению к величинам элементов  $W$  дают меру различия между группами [31, 27].

Матрицы  $B$  и  $W$  содержат основную информацию о зависимости внутри групп и между группами. Необходимо решить систему уравнений [31]:

$$\begin{aligned} \sum b_{1i}v_i &= \lambda \sum \omega_{1i}v_i \\ \sum b_{2i}v_i &= \lambda \sum \omega_{2i}v_i \\ &\vdots \\ \sum b_{pi}v_i &= \lambda \sum \omega_{pi}v_i, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $\lambda$  – собственное число;

$v_i$  – последовательность  $p$  коэффициентов;

$b_{ij}$  и  $\omega_{ij}$  – элементы матриц  $B$  и  $W$  соответственно [31].

Построение дискриминантной функции сводится к решению системы уравнений (2.6) относительно  $\lambda$  и  $v_i$ . Для получения единственного правильного решения дополнительно наложим условие, что сумма квадратов  $v_i$  должна быть равна 1. Каждое решение соответствует одной канонической дискриминантной функции. Коэффициенты  $v_i$  могут использоваться как коэффициенты требуемой дискриминантной функции и вычисляются по следующим формулам [31]:

$$u_i = v_i \sqrt{n. - g}, \quad (2.7)$$



$$u_0 = - \sum_{i=1}^p u_i X_{i..} . \quad (2.8)$$

Эти коэффициенты  $u_i$  и требовалось определить в соотношении (2.4). Применение  $u_i$  из (2.7), (2.8) приводит величины  $f_{km}$  (значения дискриминантной функции) к стандартной форме [31].

Классифицирующая функция, состоящая из линейной комбинации дискриминантных переменных, имеет следующий вид [31, 46]:

$$h_k = b_{k0} + b_{k1}X_1 + b_{k2}X_2 + \dots + b_{kp}X_p, \quad (2.9)$$

где  $h_k$  – значение функции для класса  $k$ ;

$b_{ki}$  – коэффициенты, которые необходимо определить [31, 46].

Объект относится к классу с наибольшим значением (наибольшим  $h$ ). Коэффициенты для классифицирующих функций определяются следующим образом [31, 46]:

$$b_{ki} = (n - g) \sum_{j=1}^p a_{ij}X_{jk}, \quad (2.10)$$

где  $b_{ki}$  – коэффициент для переменной  $i$  в выражении, соответствующий классу  $k$ ;

$a_{ij}$  – элемент матрицы, обратной к внутригрупповой матрице сумм попарных произведений  $W$  [31, 46].

Постоянный член определяется следующим выражением [31, 46]:

$$b_{k0} = -0,5 \sum_{j=1}^p b_{kj}X_{jk} . \quad (2.11)$$

Классификация может быть проведена и с помощью канонических дискриминантных функций вместо использования исходных дискриминантных переменных. При этом применяются те же формулы (лишь меняется  $X$  на  $f$ ) и результаты классификации обычно бывают идентичными. [31]

### 2.2.2. Байесовский классификатор

Байесовский классификатор (БК) является одним из наиболее эффективных и действенных алгоритмов классификации. Этот простой вероятностный классификатор основан на применении теоремы Байеса с сильными предположениями о независимости [1].

Хотя байесовская классификация работает из предположения о независимости данных, на практике он может конкурировать с гораздо более сложными методами. В масштабном сравнении с другими алгоритмами (Domingos and Pazzani, 1997) байесовский классификатор

иногда превосходит другие модели, даже на выборках с существенной зависимостью объектов [1].

Одним из основных преимуществ БК является привлекательная для врачей прозрачность конечных выводов. Это кажется «естественным» для специалистов диагностики и прогнозирования, т.е. близко к тому, как врачи сами диагностируют пациентов (Zelic и др., 1997) [1].

Байесовская классификация, пожалуй, один из самых элегантных практически используемых алгоритмов машинного обучения. Вопреки своему названию он отнюдь не так наивен, если судить по качеству результата. Он устойчив к нерелевантным признакам, которые попросту игнорирует. Он быстро обучается и быстро возвращает предсказание. Он потребляет не очень много памяти. В реальных приложениях признаки часто оказывают значительное влияние друг на друга, и тем не менее верность этого алгоритма достаточно высока, даже если предположение о независимости признаков не оправдывается [51].

Байесовская классификация – это отслеживание того, какой признак о каком классе свидетельствует. Формула Байеса выглядит следующим образом [51, 52]:

$$P(D/S) = \frac{P(S/D)P(D)}{P(S)}, \quad (2.12)$$

где  $P(D)$  – априорная вероятность диагноза  $D$  безотносительно к информации о наличии симптома  $S$ ;

$P(S/D)$  – правдоподобие говорит о том, насколько вероятно увидеть все симптомы  $S$ , если известно о принадлежности образца к диагнозу  $D$ ;

$P(S)$  – априорная вероятность симптома  $S$  безотносительно к «данной» информации о  $D$ ;

$P(D/S)$  – апостериорная вероятность диагноза  $D$  при наличии комплекса симптомов  $S$  [51,52].

Формула Байеса для нескольких симптомов и симптомокомплексов запишется в следующем виде [52]:

$$P(D_j/S_{1,\dots,N}) = \frac{\prod_{i=1}^N P(S_i/D_j)P(D_j)}{\sum_{k=1}^M [\prod_{i=1}^N P(S_i/D_k)P(D_k)]}, \quad (2.13)$$

где  $N$  – число учитываемых симптомов и/или симптомокомплексов;

$M$  – число рассматриваемых диагнозов,  $j = 1, \dots, M$  [52].

Алгоритм вычислительной диагностики с использованием формулы Байеса заключается в вычислении апостериорных вероятностей заболеваний в соответствии с формулой, приведенной выше [52].

Расчет правдоподобий в случае, если данные имеют нормальное распределение плотности вероятности производится по формуле:

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |K_s|}} e^{-\frac{1}{2}(s-\mu_s)^T K_s^{-1} (s-\mu_s)} \quad (2.14)$$

где  $|K_s|$  – определитель матрицы  $K_s$ ;

$K_s^{-1}$  - обратная матрица к  $K_s$ ;

$\mu_s$  - вектор средних значений  $s$ ;

$n$  – размерность, в случае  $n=1$  – задача сводится к обычному нормальному распределению. Если внутригрупповые корреляции отсутствуют, формула (2.14) преобразуются к формуле обычного нормального распределения.

При использовании формулы Байеса предполагается независимость симптомов – это условие часто не выполняется на практике. Тем не менее, использование формулы Байеса дает вполне обоснованные результаты при диагностике очень многих заболеваний. Поэтому при практических применениях достаточно, выбрав не слишком коррелированные симптомы, ограничиться допущением об их условной независимости [51].

Отметим, однако, что реальные вероятности не вычисляются. Вместо этого мы оцениваем, какой класс более правдоподобен. БК вычисляет не истинные вероятности, а информацию о том, какой класс правдоподобнее следующим образом [51]:

$$D_{best} = \arg \max_D P(D) \prod_{i=1}^N P(S_i/D). \quad (2.15)$$

Учитывая, что статистическая классификация строится на основе сравнения величин правдоподобий, то в качестве основы принятия решений используется следующий логарифмический коэффициент (диагностический коэффициент) [28, 52]:

$$I_i = 10 \log P(D_j) + \sum_{i=1}^N 10 \log P(S_i, D_j). \quad (2.16)$$

В процессе регистрации объекта и измерения его характерных признаков получают множество чисел, которые составляют вектор наблюдения. Будем считать, что этот вектор наблюдений  $s$  представляет собой случайный вектор с условной плотностью вероятности, зависящей от принадлежности этого вектора определенному классу. При распознавании объектов задачу формально сводят к проверке многих гипотез  $H_1, H_2, \dots, H_k$ , где  $H_i$  – гипотеза, предполагающая принадлежность объекта классу  $D_i$ . Здесь принято, что априорные распределения вероятностей этих гипотез заданы, т.е. известно, с какой вероятностью  $P(H_i)$  объект может принадлежать классу  $D_i$  (или как часто появляется объект данного класса).

Причем  $\sum_{i=1}^k P(H_i) = 1$ , поскольку наверняка объект должен принадлежать какому-нибудь классу [23].

Если классификатор принимает решение о том, что объект  $s$  принадлежит классу  $D_j$ , когда на самом деле он принадлежит классу  $D_i$ , то классификатор несет потери, равные  $L_{ij}$ . Так как объект  $s$  может принадлежать любому из  $k$  рассматриваемых классов, то математическое ожидание потерь, связанных с отнесением наблюдаемого объекта к классу  $D_j$ , определяется следующим выражением [23]:

$$\pi_j(s) = \sum_{i=1}^k L_{ij} p(H_i|s), \quad (2.17)$$

где  $\pi_j(s)$  – условный средний риск или условные средние потери;

$L_{ij}$  – потери при неправильной классификации;

$H_i$  – гипотеза, предполагающая принадлежность к классу;

$s$  – вектор наблюдений;

$P(H_i)$  – распределение вероятности гипотез.

В теории статистических решений эту величину часто называют условным средним риском или условными средними потерями [23].

Классификатор, минимизирующий математическое ожидание общих потерь, называется байесовским. Со статистической точки зрения байесовский классификатор соответствует оптимальному качеству классификации [23].

Используя формулу Байеса, выражение для средних потерь сводится к следующему [23]:

$$\pi_j(s) = \sum_{i=1}^k L_{ij} P(H_i) p(s|H_i), j = 1, 2, \dots, k. \quad (2.18)$$

При бинарной классификации ( $k = 2$ ) байесовское решающее правило примет следующий вид [23]:

$$\frac{p(s|H_1)}{p(s|H_2)} > \frac{P(H_2)(L_{21} - L_{22})}{P(H_1)(L_{12} - L_{11})}, \quad (2.19)$$

где  $\frac{p(s|H_1)}{p(s|H_2)}$  – отношение правдоподобия, обозначается через  $\Lambda(s) = \frac{p(s|H_1)}{p(s|H_2)}$ ,

величина в правой части неравенства (2.19) является пороговым значением  $\eta = \frac{P(H_2)(L_{21} - L_{22})}{P(H_1)(L_{12} - L_{11})}$  критерия отношения правдоподобия, к которому в итоге свелось байесовское решающее правило [23]:

$$s \in D_1, \text{ если } \Lambda(s) > \eta. \quad (2.20)$$

Значение порога  $\eta$  находится в интервале от 0 до 1 и в прикладных задачах задается с некоторым шагом (например, 0,1 или 0,01 и т.д.) для нахождения оптимального соотношения ошибок I и II рода.

### **2.3. Общие положения при моделировании систем поддержки принятия медицинского решения**

Требования к системам, касающимся обеспечения безопасности космического полета к другим планетам:

- Возможность обработки пропущенных значений и зашумленных данных. Таким образом, системы интеллектуального анализа должны быть в состоянии должным образом справляться с такой неполнотой данных. Некоторые подходы интеллектуального анализа данных являются устойчивыми к отсутствующим значениям, в то время как другие подходы возможно применить только после предварительной обработки данных..
- Возможность высокой производительности и эффективности модели. Точность системы обеспечивающей безопасность должна быть настолько высокой, насколько это возможно.
- Прозрачность модели. Методы интеллектуального анализа данных различаются по степени прозрачности, то есть по способности пользователей понимать конечный результат работы модели. В программах для обеспечения безопасности космического полета специалист должен иметь возможность понимать логику модели.
- Интерпретируемость и приемлемость результатов. Специалисту важно понимать, каким образом получен результат, так как это имеет решающее значение для экспертной системы обеспечения безопасности.
- Уменьшение количества данных и обобщения. Собрать большую по объему обучающую выборку не всегда возможно, то необходима система, которая способна надежно диагностировать, обучаясь на не большом количестве.
- Конфиденциальность данных. При работе с данными, связанными с безопасностью космического полета важно соблюсти конфиденциальность информации и определить возможные способы безопасной передачи данных.

Система интеллектуального анализа медицинских данных является биотехнической системой (БТС), которая должна объединять следующие элементы [12]:

- физиологические системы организма обследуемого, ответственные за формирование диагностируемого состояния;

- технические средства определения параметров, отражающих состояние сердечно-сосудистой системы;
- диагностические средства, реализующие решающие правила, определяемые целевой функцией системы;
- средства воздействия на обследуемого, необходимые для формирования функциональной пробы [12].

Формализованный алгоритм определения состояния (диагноза) может включать в себя логические правила (сопоставления), а также математические модели (вероятностные), повышающие надежность диагностических решений [12].

Для межпланетных полетов в отличие от орбитальных требуется более серьезный подход к обеспечению безопасности. Новые условия требуют создания новых средств медицинского контроля - бортового комплекса, который будет содержать перечень оборудования для мониторинга и терапии, а также аппаратно-программный комплекс поддержки принятия решения для специалиста. Общая структура медико-биологического обеспечения ДКП к другим планетам представлена на Рис. 2.5.

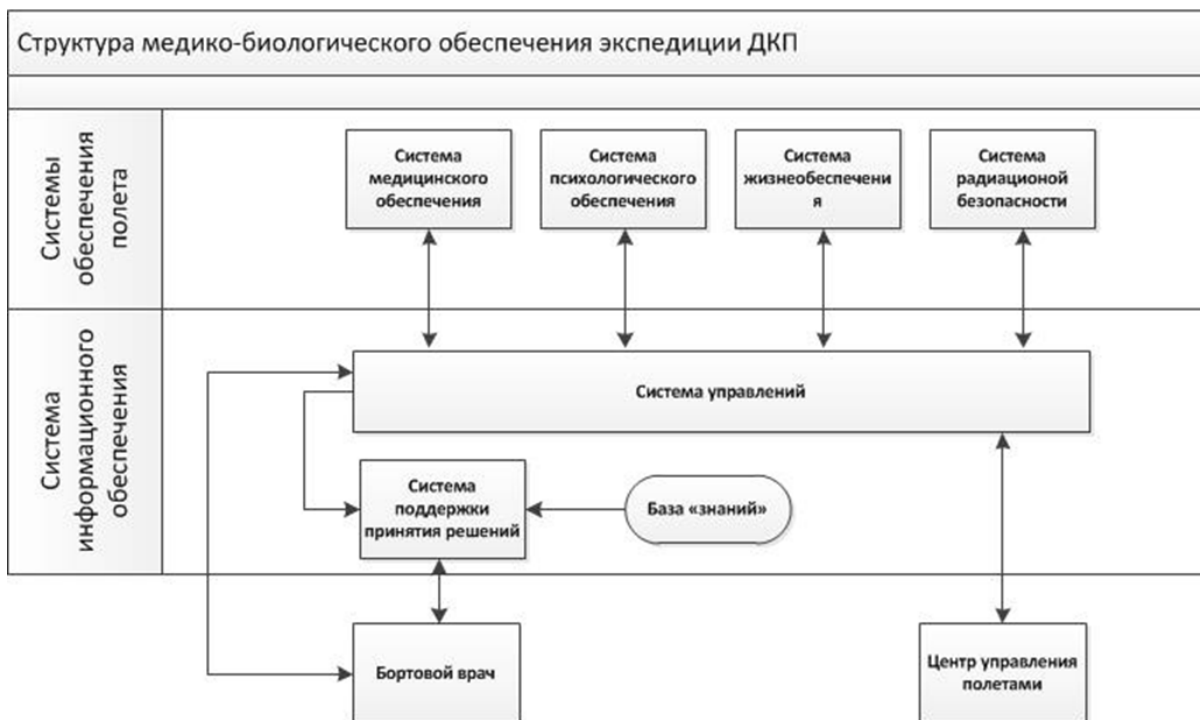


Рис. 2.5. Структура медико-биологического обеспечения экспедиции ДКП

Алгоритм для поддержки принятия решения необходим для повышения эффективности принятия корректных решений специалистом и конкретизации заключения по опасности состояния и назначения адекватной последующей терапии для космонавта. Любые опасные

состояния здоровья членов экипажа необходимо купировать на самой ранней стадии во избежание возникновения чрезвычайной ситуации на борту и срыва программы полета.

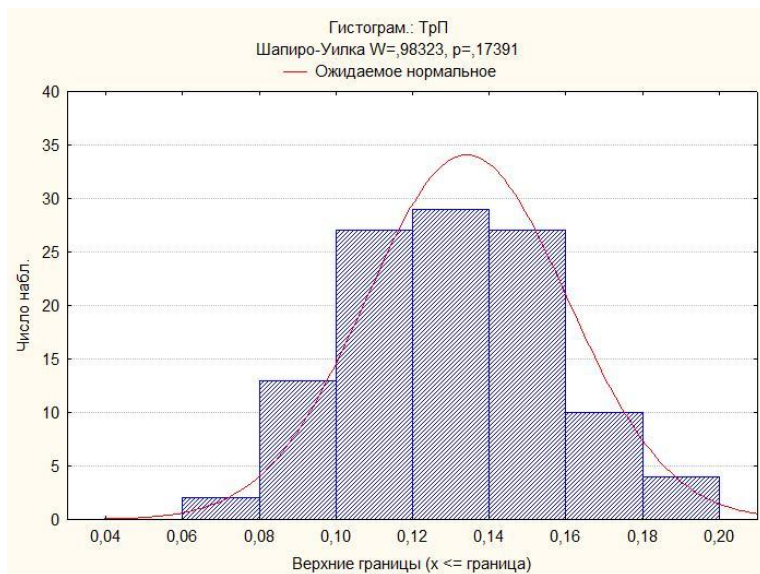
## **2.4. Описание экспериментальных данных**

В данной работе будет рассматриваться опасное состояние, связанное с патологией сердечно-сосудистой системы, а именно инфаркт миокарда. Для ранней диагностики необходимо контролировать несколько биохимических маркеров некроза миокарда, таких как:

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

Для возможности осуществления проверки корректности работы созданного модуля системы поддержки принятия решения, была собрана выборка параметров, выходящих за норму, характеризующую опасное состояние сердечно-сосудистой системы человека. Из клинической практики ГКБ №84 г. Москвы был собран материал - около 200 случаев с превышением предельно допустимых значений ряда параметров и верифицированным диагнозом, в ряде случаев инфарктом миокарда (ИМ). На основании измеренных параметров была сформирована обучающая выборка для настройки и проверки работоспособности классификатора.

Предварительно был проведен анализ природы исходных данных, в ходе которого установлено, что результаты исследований, полученные с помощью лабораторных анализаторов, являются количественными данными.



а)

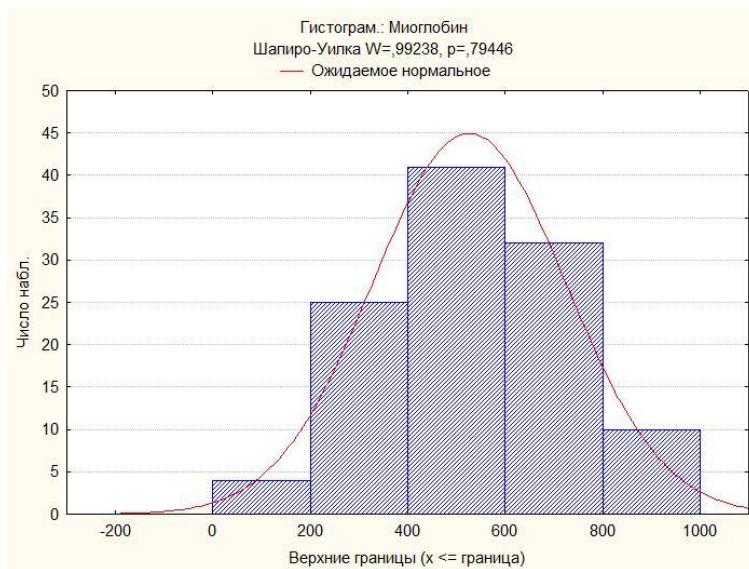
Мин. знач.	0,07
Макс. знач.	0,20
Ср. значение	0,13
Станд. откл.	0,03
Медиана	0,13
W	0,98

б)

Рис. 2.6. Гистограмма распределения плотности вероятности для тропонина I:

а) гистограмма распределения плотности вероятности для тропонина I;

б) основные статистические данные



а)

Мин. знач.	49,9
Макс. знач.	978,6
Ср. значение	526,2
Станд. откл.	198,9
Медиана	517,3
W	0,99

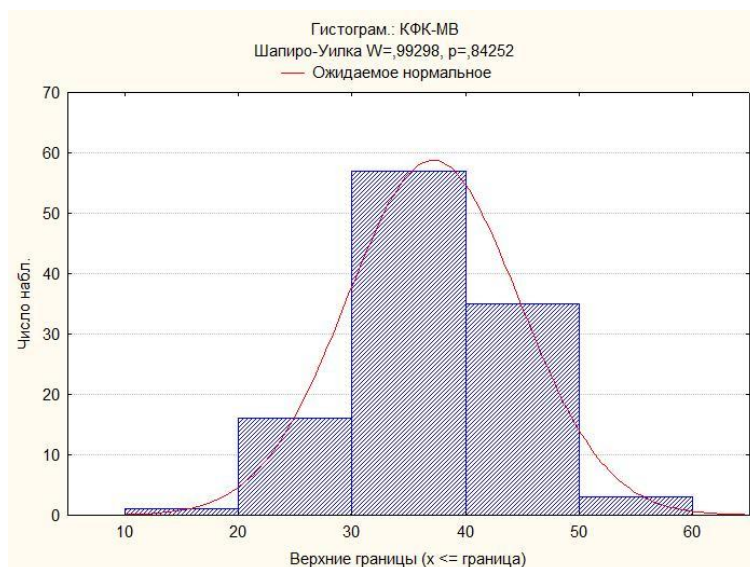
б)

Рис. 2.7. Гистограмма распределения плотности вероятности для миоглобина:

а) гистограмма распределения плотности вероятности для миоглобина;

б) основные статистические данные





а)

б)

Мин. знач.	15,3
Макс. знач.	58,7
Ср. значение	37,1
Станд. откл.	7,6
Медиана	36,9
W	0,99

Рис. 2.8. Гистограмма распределения плотности вероятности для КФК-МВ:

а) гистограмма распределения плотности вероятности для КФК-МВ;

б) основные статистические данные

Выше приведены гистограммы плотностей распределения выборки биохимических данных по концентрациям тропонина I, миоглобина, КФК-МВ (Рис. 2.6, Рис. 2.7, Рис. 2.8), а также основные статистические характеристики. Исходные данные были проверены на нормальность при помощи критерии Шапиро-Уилка. В ходе проверки было подтверждено, что распределение близко к нормальному. Кроме того определены корреляционные взаимосвязи методом попарной корреляции Пирсона на уровне  $p < 0,05$ , результаты приведены в табл. 2.1.

табл. 2.1

	Тропонин	Миоглобин	КФК фракция МВ
Тропонин	1,00	0,01	-0,08
Миоглобин	0,01	1,00	0,01
КФК фракция МВ	-0,08	0,01	1,00

В качестве исходных данных для тестирования системы была использована выборка по сердечно-сосудистым заболеваниям из UCI Machine Learning Repository [<http://www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. Анализируемые данные состоят из 270 наблюдений и 13 переменных (предикторов), 14-я переменная является экспертной оценкой, которая отражает экспертное мнение о наличии или отсутствии заболевания у пациента. Данная оценка имеет два

значения: 1 – нет заболевания, 2 – есть заболевание. Диагностические предикторы можно интерпретировать следующим образом:

- 1) возраст;
- 2) пол;
- 3) тип боли в грудной клетке (4 значения);
- 4) систолическое давление;
- 5) значение холестерина в мг/дл;
- 6) уровень сахара в крови натощак > 120 мг / дл;
- 7) ЭКГ в покое (значения 0,1,2);
- 8) частота сердечных сокращений;
- 9) наличие стенокардии;
- 10) депрессия сегмента ST на ЭКГ;
- 11) наклон пика сегмента ST;
- 12) количество крупных сосудов (0-3);
- 13) интегральный показатель: 3 = нормальный; 6 = зафиксированный дефект; 7 = обратимый дефект;
- 14) 1 – нет заболевания, 2 – есть заболевание.

Данные имеют различный тип: количественный, бинарный, бальный, следовательно, нормальным распределением не определяются.

Кроме того в качестве тестовых данных использовались результаты, полученные в ходе эксперимента Марс-500.

Важным параметром качества работы человека-оператора является его психофизиологическое состояние. Для изучения механизмов влияния факторов длительного космического полета на состояние космонавтов и определение их работоспособности был проведен ряд экспериментальных исследований в рамках «Марс-500», одним из которых является контент-анализ видеосообщений экипажа в течение всего эксперимента «Марс-500». Целью данного исследования является выявление аномальных изменений в голосовых сообщениях испытуемых и определение их психофизиологического статуса для оценки качества операторской деятельности, а также прогнозирования и корректировки режима труда и отдыха (РТО) в будущих экспериментах и длительных космических полетах [36].

Контент-анализ видеосообщений космонавтов является совместным исследованием ГНЦ РФ ИМБП РАН и University College London, в рамках которого были использованы более чем 2,5 тысячи записей. Для аудиоанализа из каждой видеозаписи были извлечены аудиосигналы и

преобразованы в 16-битные PCM-файлы. Для проведения контент-анализа были выбраны следующие голосовые характеристики, представленные в табл. 2.2 [36].

табл. 2.2 [36]

Голосовая характеристика	Описание
FX	Основная частотная характеристика
VFER	Коэффициент напряжения голосовых связок
HNR	Коэффициент смыкания связок
PPQ	Коэффициент возмущения
LTAS	Наклон среднего спектра
EMS	Наклон средней огибающей модуляции спектра

Первые четыре параметра были множественно измерены в каждую секунду аудиозаписи и собраны в вероятностное распределение для каждой записи. Каждое распределение было описано по пяти статистическим параметрам и показано в табл. 2.3 [36].

табл. 2.3 [36]

Наименование	Описание
MEAN	Среднее значение
SD	Стандартное отклонение
SKEW	Асимметрия распределения признаков
KURT	Пик распределения признаков
MEDIAN	Медиана

Параметры LTAS и EMS измеряются как среднее значение для каждой записи. Средние значения и стандартное отклонение приведены в табл. 2.4 для каждого испытателя. Анализ выбранных характеристик показал, что изменение происходит в пределах 10% от среднего значения [36].

табл. 2.4 [36]

Голосовая характеристика	Статистические параметры	5001	5002	5003	5004	5005	5006
FX	MEAN	130,7495 ±10,1708	140,691 ±12,7065	126,8753 ±9,939	130,6934 ±6,0728	124,4837 ±10,2123	148,0531 ±10,6517
FX	SD	40,2499 ±6,8503	37,4792 ±6,3217	28,5819 ±7,7702	24,3987 ±5,8617	31,0156 ±9,2761	27,7449 ±5,1463

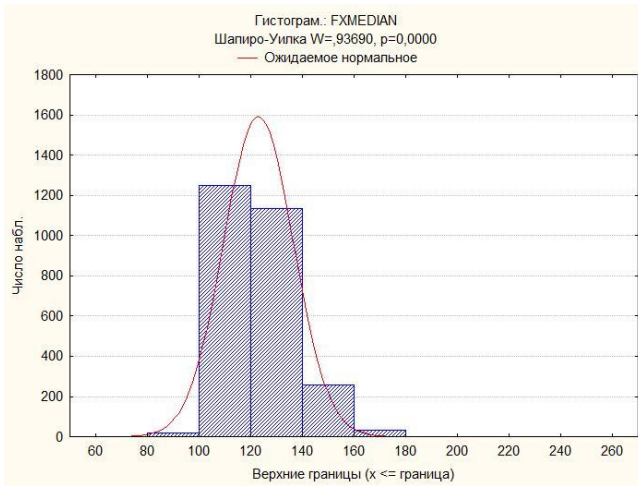
FX	SKEW	1,6117 ±0,544	1,5979 ±0,5261	1,9874 ±0,8661	2,6013 ±0,8767	2,4551 ±0,9464	1,6155 ±0,8373
FX	KURT	6,8782 ±3,839	6,8907 ±3,2651	7,1463 ±10,6	16,1956 ±8,1507	12,9748 ±8,1401	10,1783 ±5,4853
FX	MEDIAN	118,2337 ±11,3515	129,2414 ±13,7099	118,371 ±9,185	125,6128 ±6,0018	114,7632 ±9,4476	142,9712 ±11,9771
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
PPQ	MEDIAN	15,0599 ±3,4436	15,1534 ±4,2416	12,6868 ±5,0854	11,5087 ±3,5721	13,6026 ±4,7275	10,1411 ±3,0219

В качестве исходных данных была использована выборка, составленная по результатам, полученным в ходе эксперимента «Контент» в ходе «Марс-500». Анализируемые данные состоят из 2700 наблюдений и 22 переменных (предикторов), 23-я переменная является экспертной оценкой, которая отражает экспертное мнение о наличии аномальных изменений в голосе, что свидетельствует о развитии стрессового состояния. Экспертная оценка имеет два значения: 0 – отсутствие изменений, 1 – наличие изменений в голосовых сообщениях испытуемых. Диагностические предикторы можно интерпретировать следующим образом:

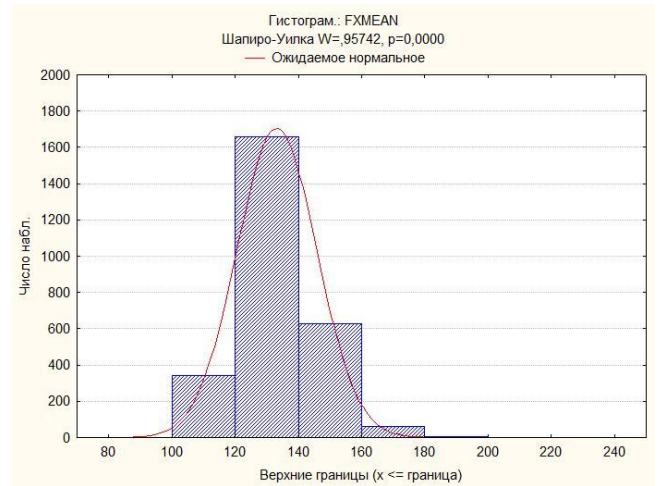
1. FXMEDIAN – медиана основной частотной характеристики.
2. FXMEAN – среднее значение основной частотной характеристики.
3. FXSD – стандартное отклонение основной частотной характеристики.
4. FXSKEW – асимметрия распределения признаков основной частотной характеристики.
5. FXKURT – пик распределения основной частотной характеристики.
6. VFERMEDIAN – медиана коэффициента напряжения голосовых связок.
7. VFERMEAN – среднее значение коэффициента напряжения голосовых связок.
8. VFERSD – стандартное отклонение коэффициента напряжения голосовых связок.
9. VFERSKEW – ассиметрия распределения признаков коэффициента напряжения голосовых связок.
10. VFERKURT – пик распределения коэффициента напряжения голосовых связок.
11. HNRMEDIAN – медиана коэффициента смыкания связок.
12. HNRMEAN – среднее значение коэффициента смыкания связок.
13. HNRSD – стандартное отклонение коэффициента смыкания связок.
14. HNRSKEW – асимметрия распределения признаков коэффициента смыкания связок.

15. HNRKURT – пик распределения коэффициента смыкания связок.
16. PPQ5MEDIAN – медиана коэффициента возмущения.
17. PPQ5MEAN – среднее значение коэффициента возмущения.
18. PPQ5SD – стандартное отклонение коэффициента возмущения.
19. PPQ5SKEW – асимметрия распределения признаков коэффициента возмущения.
20. PPQ5KURT – пик распределения коэффициента возмущения.
21. LTAS – наклон среднего спектра.
22. EMSALL – наклон средней величины огибающей модуляции спектра.
23. Оценка экспертов: 0 – отсутствие изменений, 1 – наличие изменений.

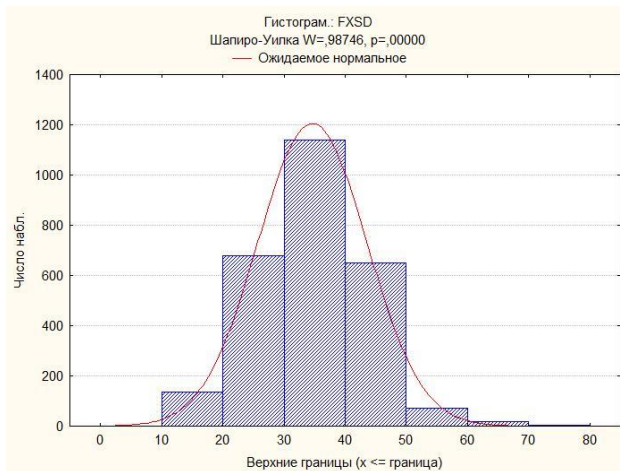
На Рис. 2.9 представлены диаграммы распределений предикторов, составляющих выборку исходных данных. Диаграммы построены в программном пакете STATISTICA.



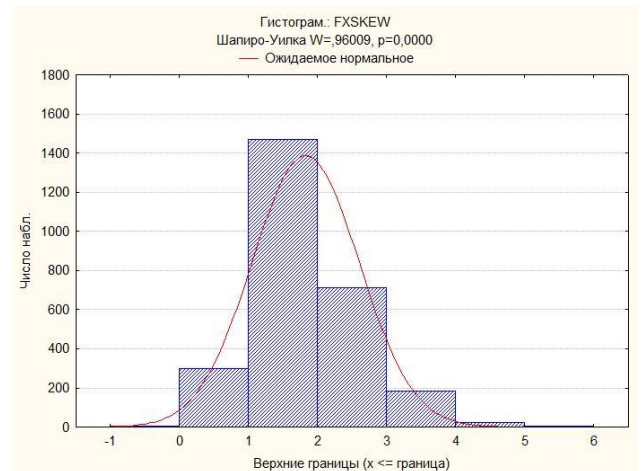
а)



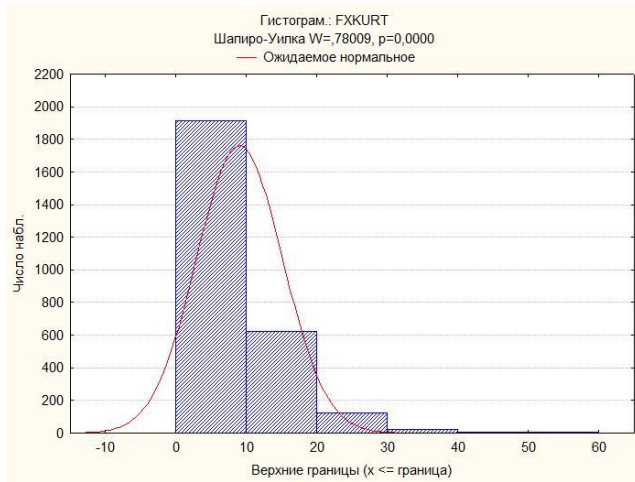
б)



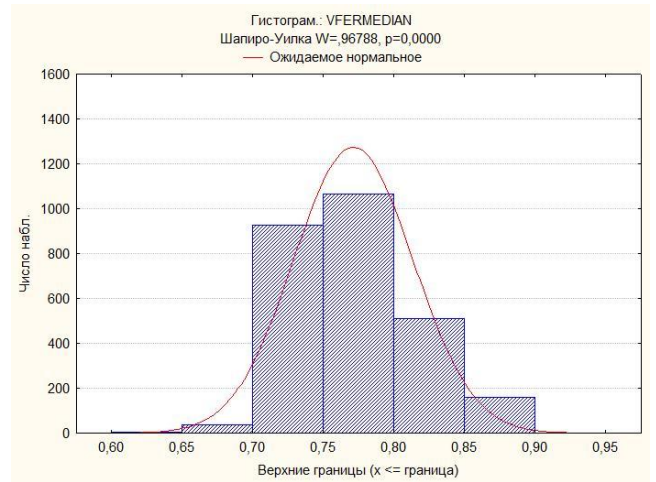
в)



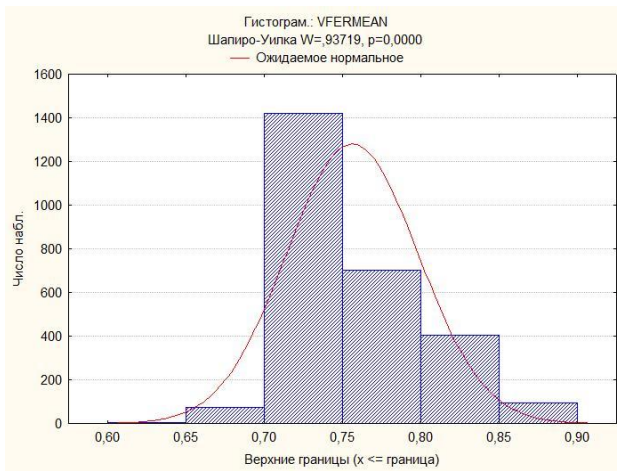
г)



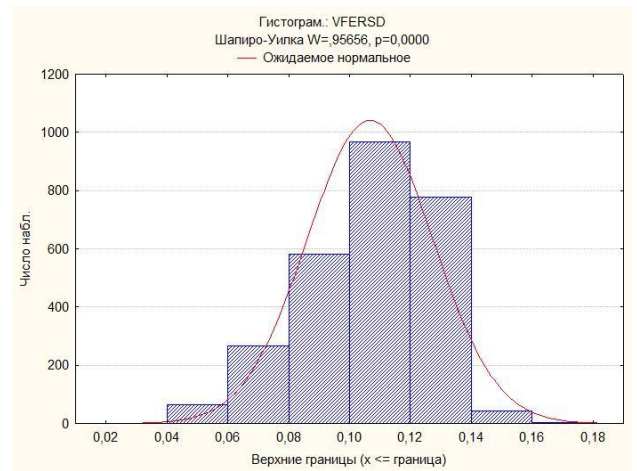
д)



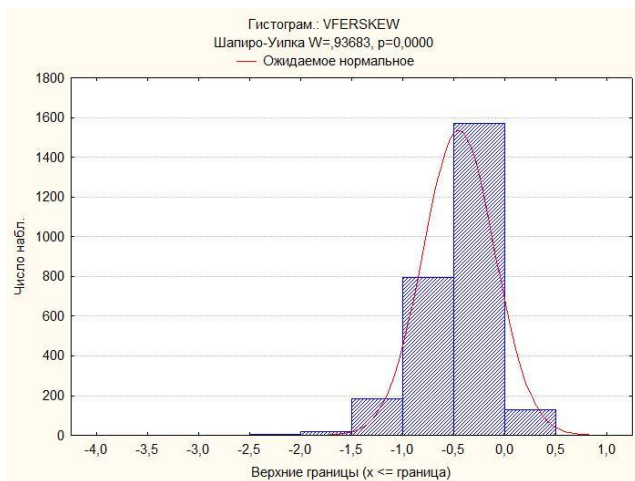
е)



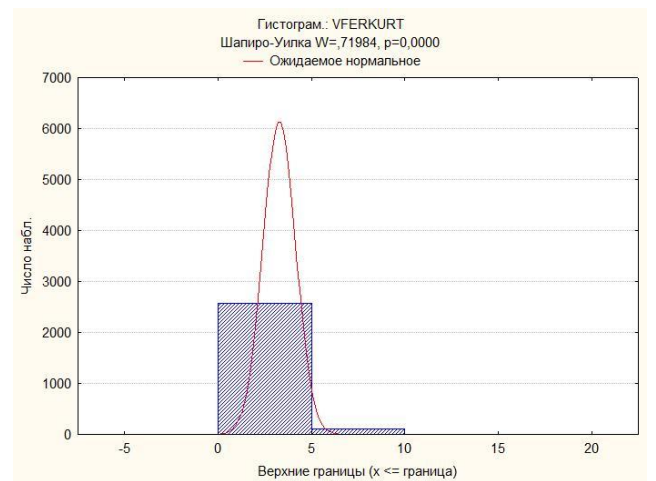
ж)



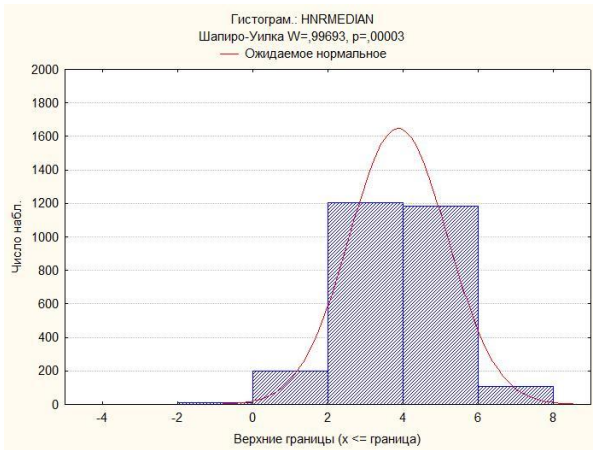
з)



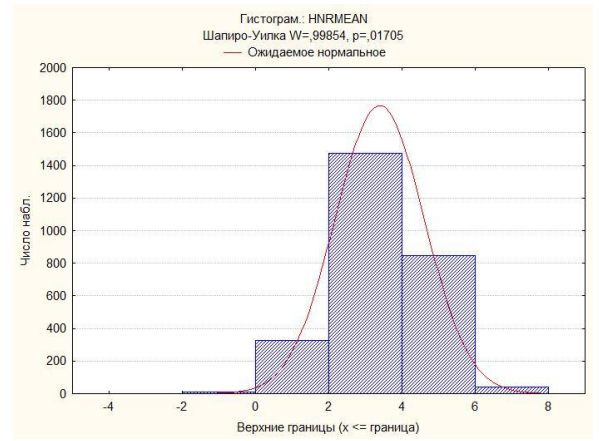
и)



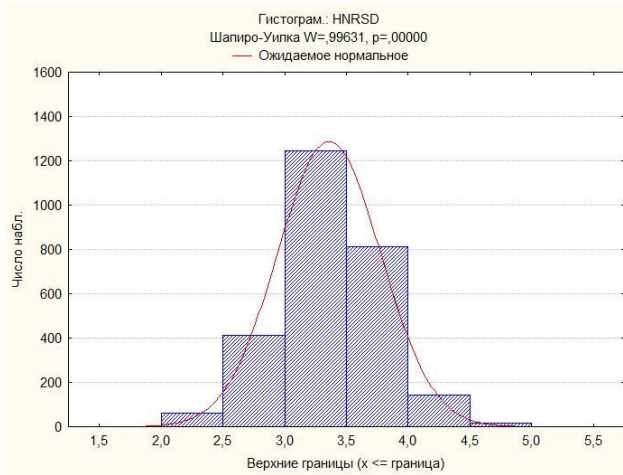
к)



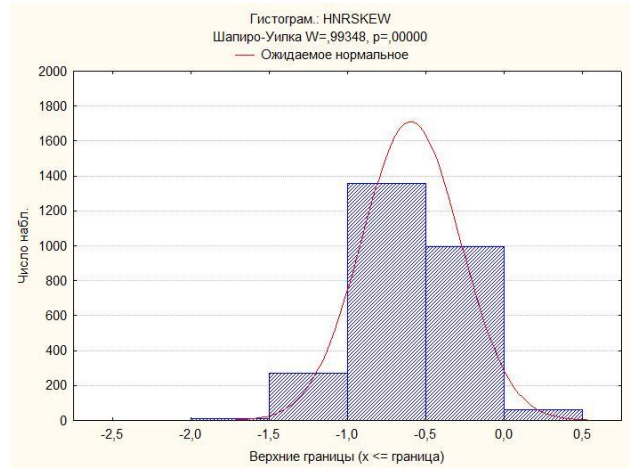
л)



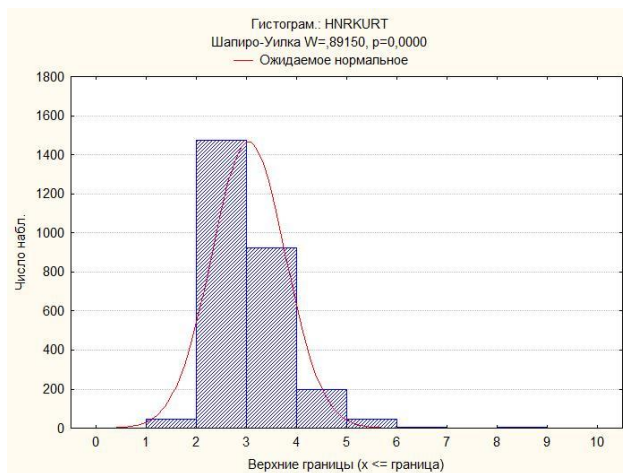
м)



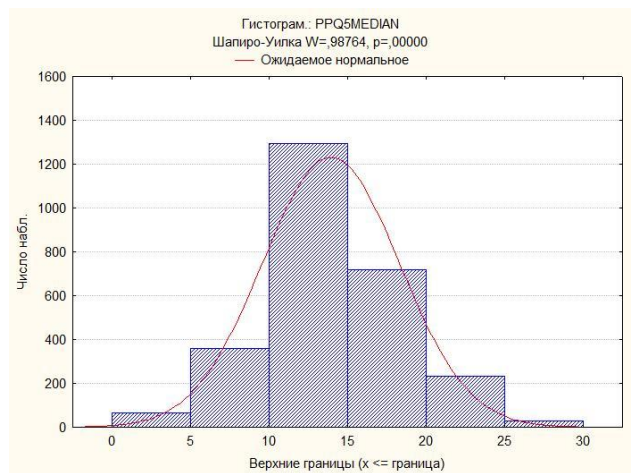
н)



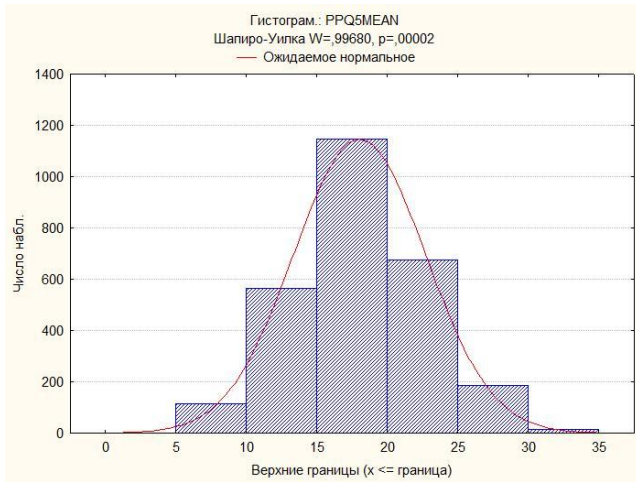
о)



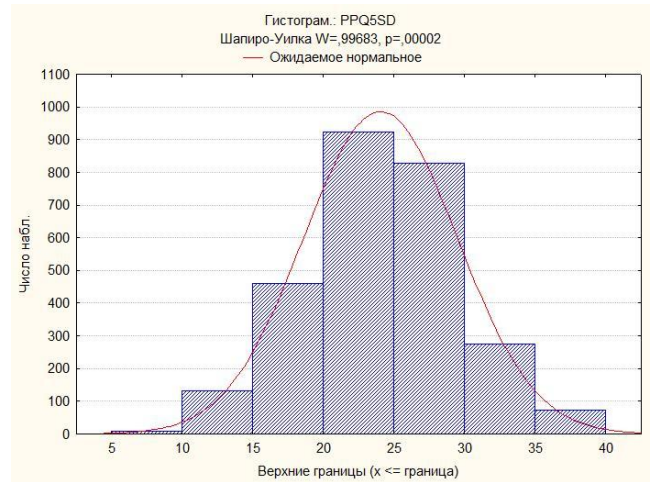
п)



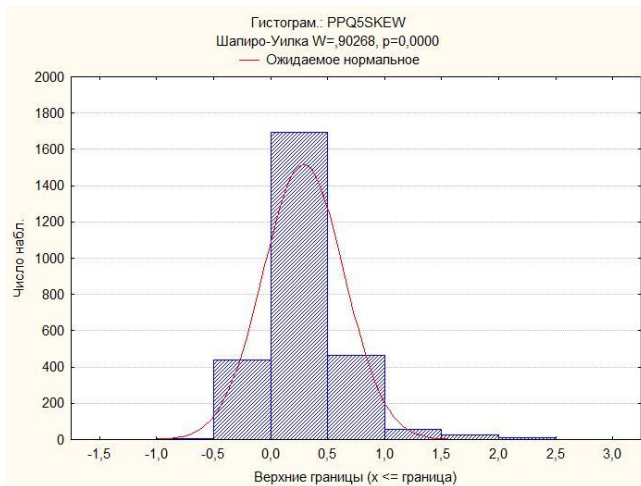
р)



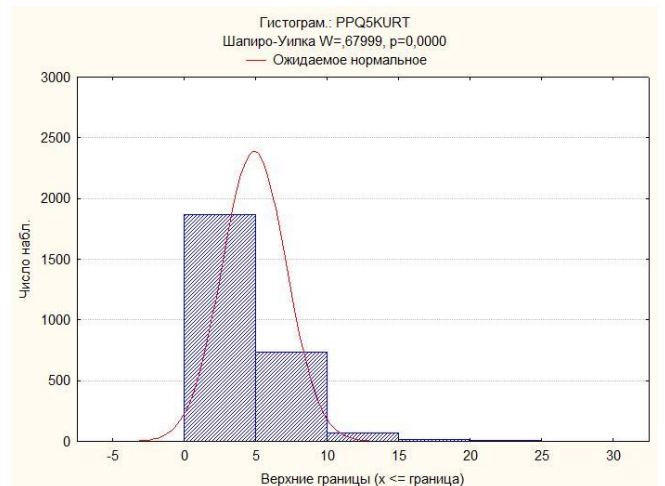
с)



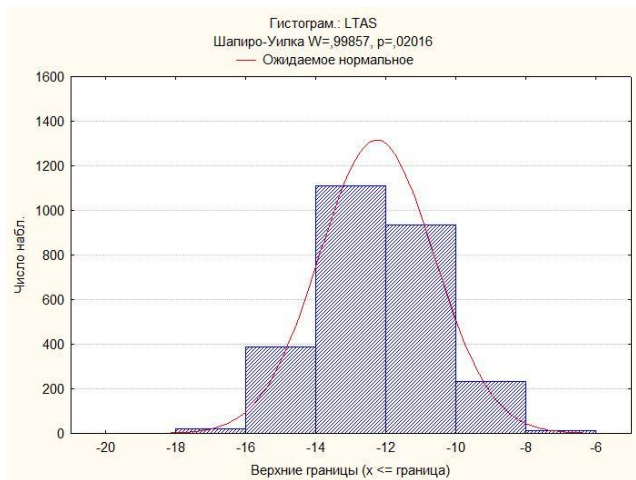
т)



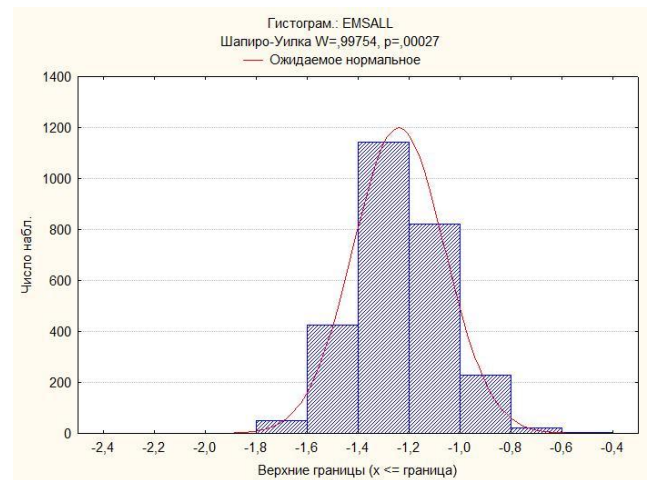
у)



ф)



х)



ц)

Рис. 2.9. Диаграммы распределения для предикторов выборки:



а) FXMEDIAN; б) FXMEAN; в) FXSD; г) FXKURT; д) FXSKEW; е) VFERMEDIAN; ж) VFERMEAN; з) VFERSD; и) VFERKURT; к) VFERSKEW; л) HNRMEDIAN; м) HNRMEAN; н) HNRSD; о) HNRKURT; п) HNRSKEW; р) PPQ5MEDIAN; с) PPQ5MEAN; т) PPQ5SD; у) PPQ5KURT; ф) PPQ5SKEW; х) LTAS; ц) EMSALL

Выше приведены гистограммы плотностей распределения выборки психофизиологических параметров (Рис. 2.9). Исходные данные были проверены на нормальность при помощи критерии Шапиро-Уилка. В ходе проверки была подтверждено, что распределение близко к нормальному, значения критерия представлены в табл. 2.5.

табл. 2.5

№ п/п	Наименование параметра	Значение критерия Шапиро-Уилка W
1.	FXMEDIAN	0,94
2.	FXMEAN	0,96
3.	FXSD	0,98
4.	FXKURT	0,96
5.	FXSKEW	0,78
6.	VFERMEDIAN	0,96
7.	VFERMEAN	0,94
8.	VFERSD	0,96
9.	VFERKURT	0,94
10.	VFERSKEW	0,72
11.	HNRMEDIAN	0,99
12.	HNRMEAN	0,99
13.	HNRSD	0,99
14.	HNRKURT	0,99
15.	HNRSKEW	0,89
16.	PPQ5MEDIA	0,99
17.	PPQ5MEAN	0,99
18.	PPQ5SD	0,99
19.	PPQ5KURT	0,90
20.	PPQ5SKEW	0,68
21.	LTAS	0,99
22.	EMSALL	0,99

Кроме того определены корреляционные взаимосвязи методом попарной корреляции Пирсона на уровне  $p < 0,05$ , результаты приведены в табл. 2.6.

табл. 2.6

	FXMEDIAN	FXMEAN	FXSD	FXKURT	FXSKEW	VFERMEDIAN	VFERMEAN	VFERSD	VFERKURT	VFERSKEW	HNRMEDIAN	HNRMEAN	HNRSD	HNRKURT	HNRSKEW	PPQ5MEDIA	PPQ5MEAN	PPQ5SD	PPQ5KURT	PPQ5SKEW	LTAS	EMSALL
FXMEDIAN	1,00	0,93	0,43	-0,60	-0,39	0,03	0,03	0,03	0,13	-0,16	0,02	0,08	0,09	0,24	-0,06	0,26	0,21	0,18	0,51	-0,07	-0,21	-0,02
FXMEAN	0,93	1,00	0,67	-0,60	-0,47	0,01	0,03	0,07	0,23	-0,24	-0,08	-0,02	0,10	0,34	-0,13	0,39	0,35	0,32	0,49	-0,19	-0,10	-0,03
FXSD	0,43	0,67	1,00	-0,25	-0,33	-0,02	0,03	0,12	0,34	-0,32	-0,38	-0,34	0,05	0,47	-0,28	0,50	0,49	0,46	0,25	-0,39	0,18	-0,02
FXKURT	-0,60	-0,60	-0,25	1,00	0,89	-0,07	-0,07	0,02	-0,13	0,11	0,17	0,14	-0,07	-0,25	0,15	-0,37	-0,36	-0,34	-0,30	0,27	0,12	0,01
FXSKEW	-0,39	-0,47	-0,33	0,89	1,00	0,00	-0,01	-0,07	-0,22	0,20	0,23	0,21	-0,09	-0,28	0,22	-0,38	-0,39	-0,39	-0,13	0,37	0,01	0,02
VFERMEDIAN	0,03	0,01	-0,02	-0,07	0,00	1,00	0,96	-0,76	-0,61	0,56	-0,17	-0,19	-0,17	-0,10	0,09	0,34	0,31	0,30	0,31	-0,13	0,04	0,17
VFERMEAN	0,03	0,03	0,03	-0,07	-0,01	0,96	1,00	-0,81	-0,48	0,56	-0,22	-0,25	-0,18	-0,10	0,09	0,40	0,37	0,35	0,35	-0,17	0,07	0,21
VFERSD	0,03	0,07	0,12	0,02	-0,07	-0,76	-0,81	1,00	0,53	-0,65	0,07	0,10	0,32	0,21	-0,20	-0,30	-0,26	-0,24	-0,32	0,06	0,00	-0,20
VFERKURT	0,13	0,23	0,34	-0,13	-0,22	-0,61	-0,48	0,53	1,00	-0,81	-0,20	-0,19	0,18	0,27	-0,29	0,14	0,17	0,18	-0,07	-0,18	0,09	-0,08
VFERSKEW	-0,16	-0,24	-0,32	0,11	0,20	0,56	0,56	-0,65	-0,81	1,00	0,18	0,16	-0,21	-0,33	0,33	-0,06	-0,09	-0,11	0,09	0,12	-0,08	0,15
HNRMEDIAN	0,02	-0,08	-0,38	0,17	0,23	-0,17	-0,22	0,07	-0,20	0,18	1,00	0,97	-0,09	-0,69	0,57	-0,44	-0,43	-0,41	-0,06	0,41	-0,39	-0,14
HNRMEAN	0,08	-0,02	-0,34	0,14	0,21	-0,19	-0,25	0,10	-0,19	0,16	0,97	1,00	-0,17	-0,57	0,58	-0,44	-0,44	-0,42	-0,04	0,43	-0,40	-0,15
HNRSD	0,09	0,10	0,05	-0,07	-0,09	-0,17	-0,18	0,32	0,18	-0,21	-0,09	-0,17	1,00	0,15	-0,47	-0,05	-0,03	-0,03	-0,08	-0,05	0,04	-0,14
HNRKURT	0,24	0,34	0,47	-0,25	-0,28	-0,10	-0,10	0,21	0,27	-0,33	-0,69	-0,57	0,15	1,00	-0,69	0,25	0,24	0,23	0,05	-0,25	0,22	0,00
HNRSKEW	-0,06	-0,13	-0,28	0,15	0,22	0,09	0,09	-0,20	-0,29	0,33	0,57	0,58	-0,47	-0,69	1,00	-0,24	-0,25	-0,25	0,10	0,33	-0,17	0,02

PPQ5MEDIA	0,26	0,39	0,50	-0,37	-0,38	0,34	0,40	-0,30	0,14	-0,06	-0,44	-0,44	-0,05	0,25	-0,24	1,00	0,97	0,94	0,27	-0,74	0,07	0,05
PPQ5MEAN	0,21	0,35	0,49	-0,36	-0,39	0,31	0,37	-0,26	0,17	-0,09	-0,43	-0,44	-0,03	0,24	-0,25	0,97	1,00	0,99	0,22	-0,75	0,07	0,04
PPQ5SD	0,18	0,32	0,46	-0,34	-0,39	0,30	0,35	-0,24	0,18	-0,11	-0,41	-0,42	-0,03	0,23	-0,25	0,94	0,99	1,00	0,21	-0,70	0,06	0,03
PPQ5KURT	0,51	0,49	0,25	-0,30	-0,13	0,31	0,35	-0,32	-0,07	0,09	-0,06	-0,04	-0,08	0,05	0,10	0,27	0,22	0,21	1,00	0,24	-0,09	0,09
PPQ5SKEW	-0,07	-0,19	-0,39	0,27	0,37	-0,13	-0,17	0,06	-0,18	0,12	0,41	0,43	-0,05	-0,25	0,33	-0,74	-0,75	-0,70	0,24	1,00	-0,16	0,01
LTAS	-0,21	-0,10	0,18	0,12	0,01	0,04	0,07	0,00	0,09	-0,08	-0,39	-0,40	0,04	0,22	-0,17	0,07	0,07	0,06	-0,09	-0,16	1,00	0,11
EMSALL	-0,02	-0,03	-0,02	0,01	0,02	0,17	0,21	-0,20	-0,08	0,15	-0,14	-0,15	-0,14	0,00	0,02	0,05	0,04	0,03	0,09	0,01	0,11	1,00

## **2.5. Выводы по главе 2**

1. Сформулирована специфическая задача классификации, выбраны методы ее решения, такие как байесовская классификация и дискриминантный анализ.
2. Произведен статистический анализ данных для тестирования разрабатываемой системы поддержки принятия решения.

## ГЛАВА 3. Описание программного комплекса

### 3.1. Общая структура алгоритма реализации байесовского классификатора

При моделировании БК была использована следующая общая структура алгоритма, предложенная на Рис. 3.1. Она показывает последовательность процессов, которые происходят при работе программы для системы поддержки принятия решений. Процесс проходит в несколько «условных» этапов:

- 1) на вход системе поступают данные для обучения. Необходимо обратить особое внимание на природу и качество исходных данных, так как от этого непосредственно зависит точность работ классификатора;
- 2) в ходе обучения происходит вычисление правдоподобий  $P(S/D)$  и определение, с какой частотой каждый признак принадлежит тому или иному классу;
- 3) затем на вход поступают данные для классификации в виде вектора или системы векторов;
- 4) в ходе классификации происходит вычисление правдоподобий  $P(S/D)$  для каждого из параметров и по формуле (2.13) перемножение и вычисление апостериорной вероятности  $P(D/S)$  для каждого класса;
- 5) затем по формуле (2.15) происходит сравнение апостериорных вероятностей  $P(D/S)$  и наблюдению с вектором данных присваивается класс, которому принадлежит максимальная апостериорная вероятность.

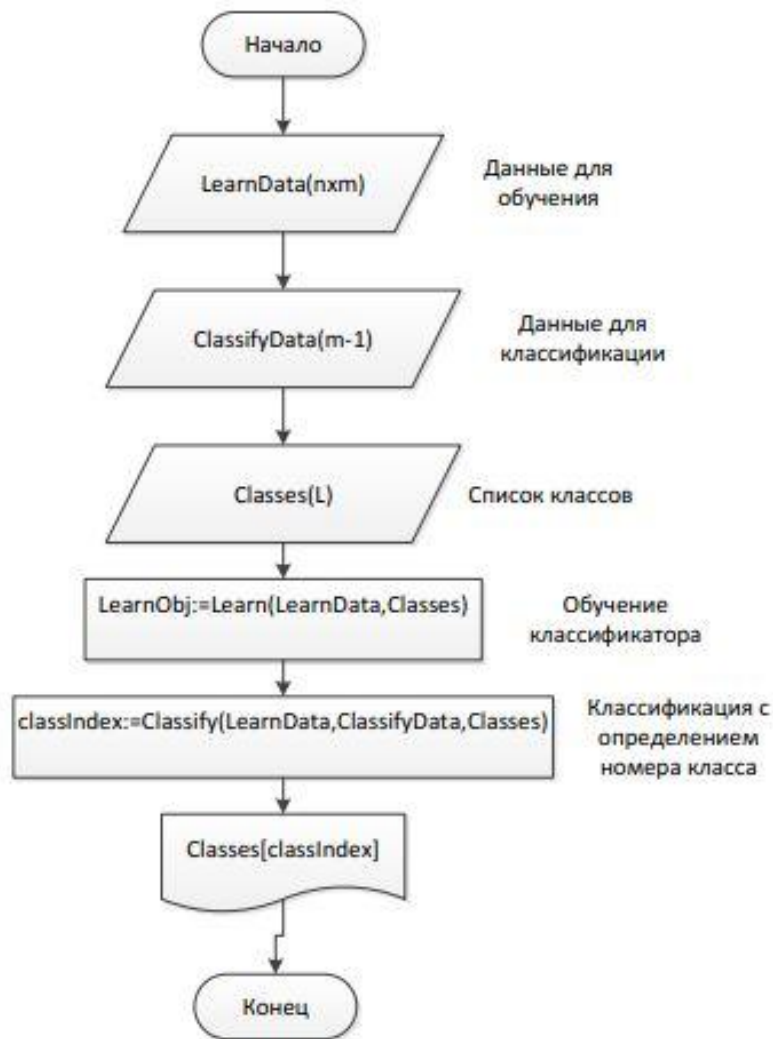


Рис. 3.1. Общая структура алгоритма БК

Более подробно рассмотрим алгоритм обучения БК для нормально распределенных данных, который представлен на Рис. 3.2. На вход поступает обучающая выборка, заблаговременно подготовленная и размеченная по классам. Для каждого класса происходит вычисление дисперсии и математического ожидания для расчета плотности нормального распределения. Затем формируется матрица, состоящая из дисперсий и математических ожиданий, что является обученным классификатором, готовым к работе с новыми данными.

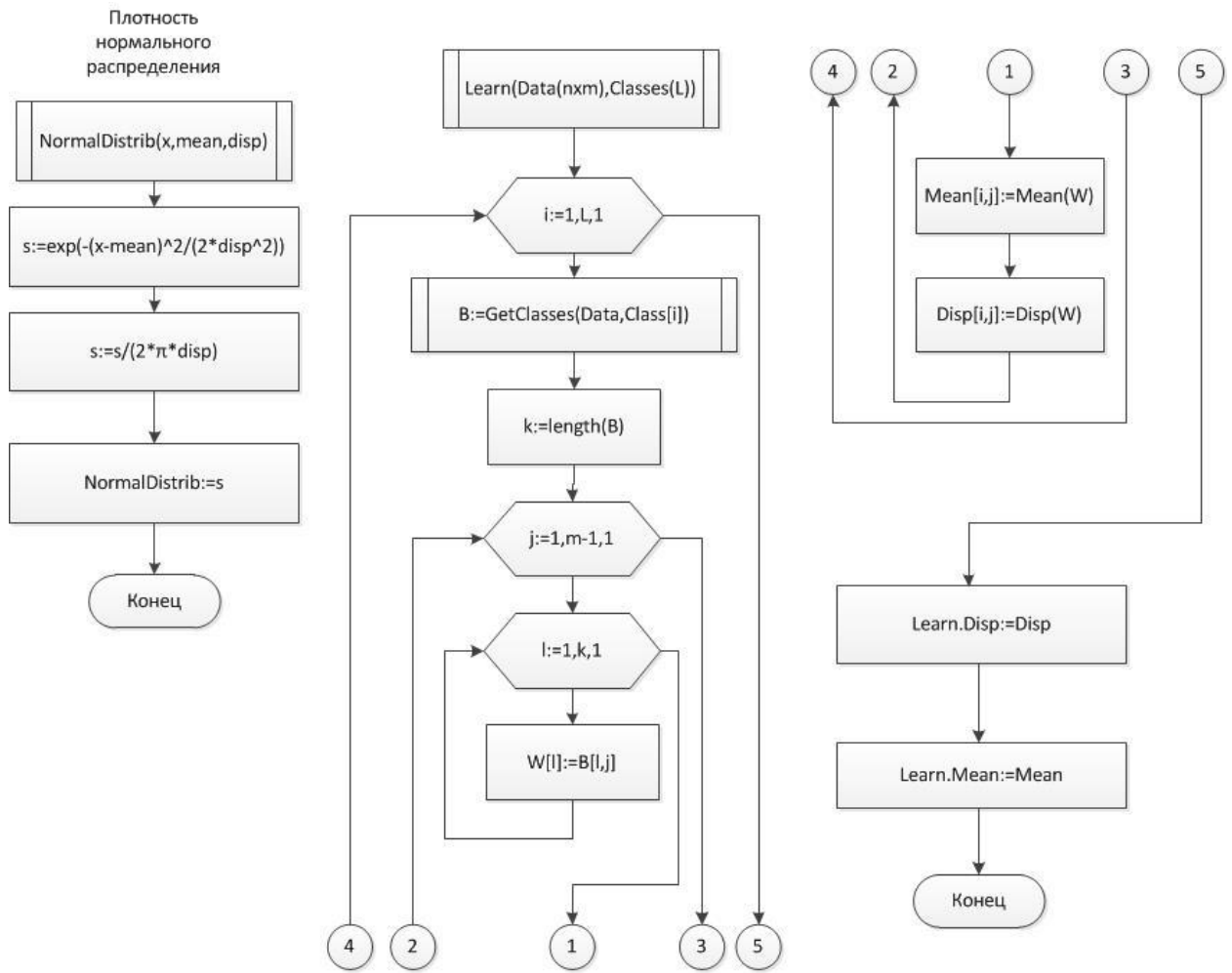


Рис. 3.2. Алгоритм обучения БК

Далее рассмотрим более подробно алгоритм классификации БК новых данных, который представлен на Рис. 3.3. На вход поступают данные для классификации в виде вектора или системы векторов. Затем для каждого из классов рассчитывается произведение элементов плотностей вероятности, по сути, являющимися апостериорными вероятностями, соответствующих каждому классу. Далее необходимо применить решающее правило (2.20) и сравнить значения апостериорных вероятностей всех классов для каждого вектора данных и выбрать максимальную, которая будет соответствовать наиболее вероятному классу. После чего выбранный класс присваивается текущему вектору данных; на этом классификация оканчивается.



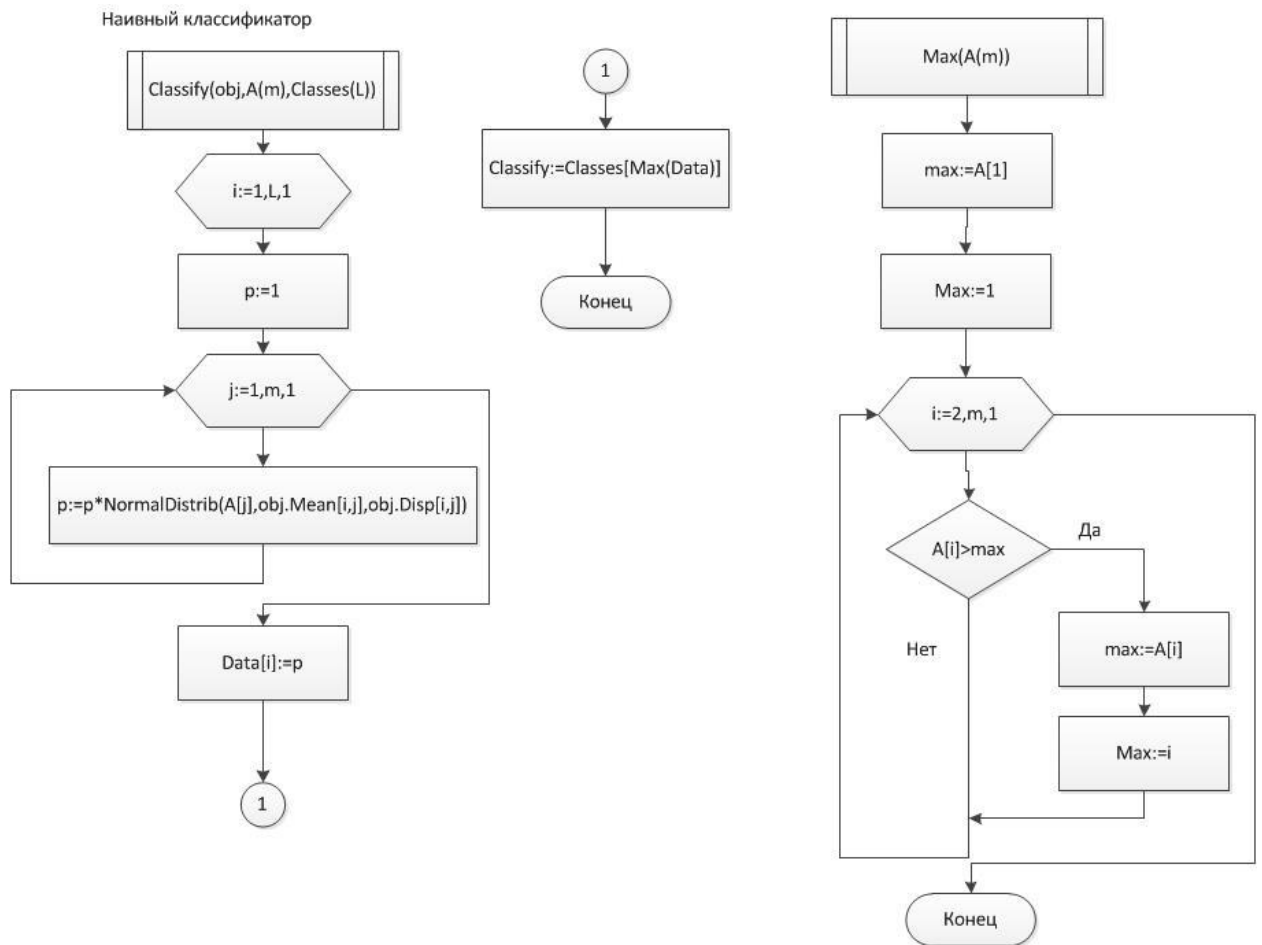


Рис. 3.3. Алгоритм классификации БК

В соответствии с этапностью моделирования БК на Рис. 3.4 представлена структура пользовательской программы системы поддержки принятия решения. Из представленной схемы видно, что процесс имеет следующую последовательность. Есть возможность загрузки ранее обученного классификатора. Если требуется обучение пользовательской программы на новых данных, то требуется их загрузка в виде обучающей выборки. Затем проводится обучение программы. На этапе тестирования предлагается провести k-фолдовую кросс-валидацию, количество фолдов задается произвольно. В ходе тестирования проводится ROC-анализ, вычисляются площади под кривой AUC, подбирается оптимальный порог отсечения. Задается оптимальный классификатор. Затем на вход подается тестовая выборка для понимания предрасположенности классификатора к переобучению, после чего программа готова к классификации новых задач без заранее известного ответа с заданной вероятностью верной классификации.

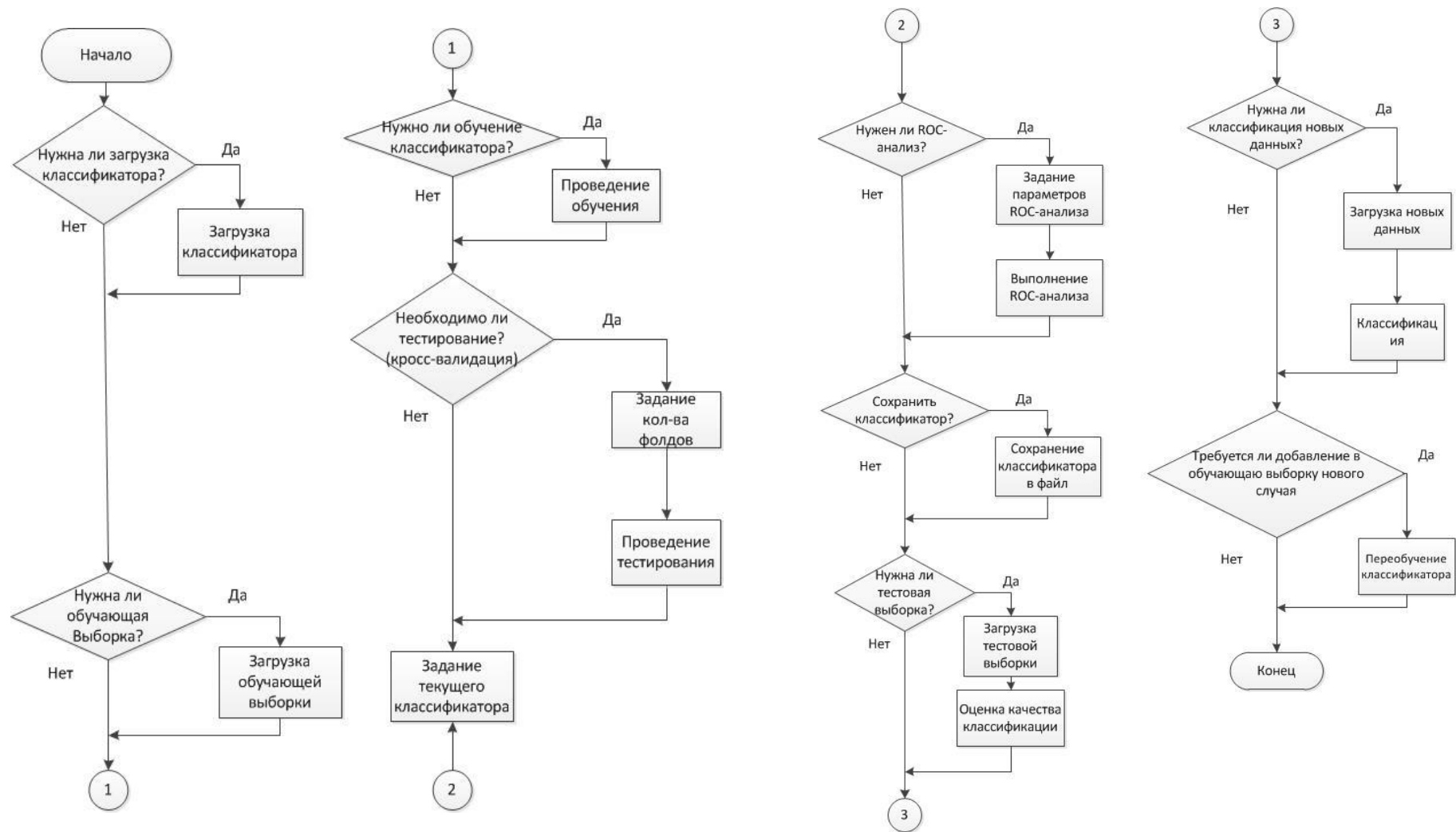


Рис. 3.4 Структура пользовательской программы на базе БК

На Рис. 3.5 представлена схема комплекса систем жизнеобеспечения (КСОЖ), составленная на основе ГОСТ Р50804-95 [21] в нее внедрена разработанная СППР и показано её взаимодействие с другими системами и подсистемами пилотируемого космического аппарата.

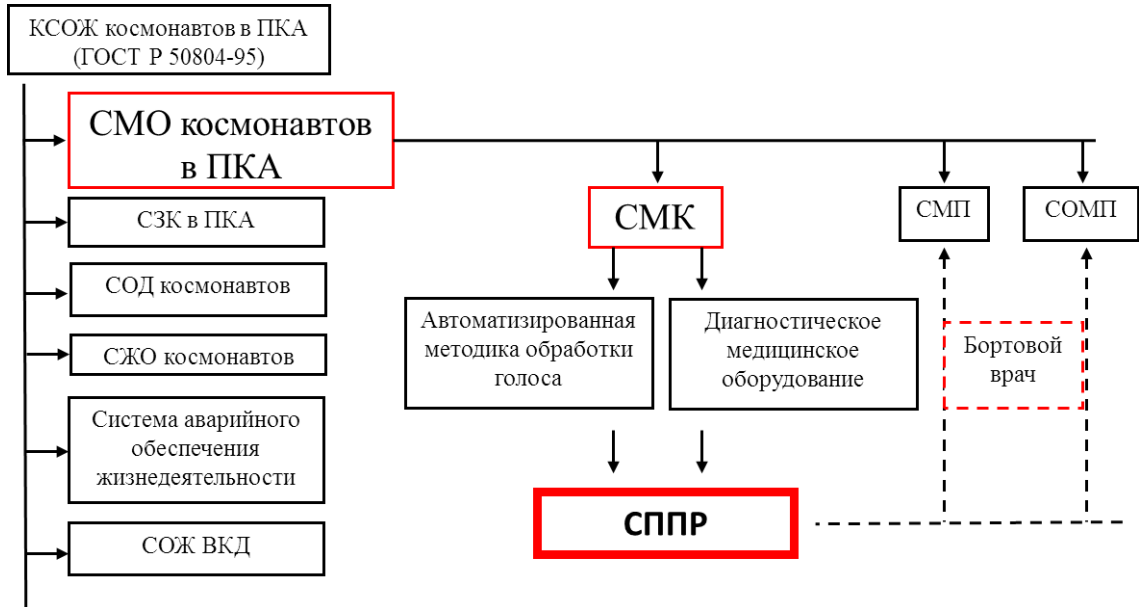


Рис. 3.5 Схема взаимодействия систем КА и экипажа с СППР

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: диагностические медицинские и психофизиологические программно-аппаратные комплексы, информация от которых будет поступать в разработанную СППР, после чего врач экипажа принимает решения о дальнейших профилактических мероприятиях или об оказании медицинской помощи для предотвращения чрезвычайной ситуации.

### 3.2. Структура системы поддержки принятия решений

На Рис. 3.6 представлена схема структуры СППР для решения задачи автоматизированной оценки психофизиологического состояния космонавтов для обеспечения безопасности в длительном космическом полете. Система состоит из трех основных модулей: интерфейс, преобразователь, математическая модель.



Рис. 3.6. Структура СППР

Система состоит из нескольких модулей, ниже приведено более подробное описание.

Интерфейс служит для ввода исходных данных для обучения, тестирования и классификации и вывода результатов классификации и графических изображений. В компоненте преобразователя происходит преобразование исходных данных  $s_i$ , вычисления плотностей вероятностей появления симптомокомплексов при наличии конкретных диагнозов  $P(D/S)$  и вычисления правдоподобий  $P(S/D)$ . 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 или матрицы обнаружения.

#### Модуль подготовки исходных данных

Исходными данными для обучения является матрица чисел, один столбец которой является меткой класса  $d_i$ , все остальные элементы представляют собой вектора симптомокомплексов, состоящих из значений физических параметров характеризующих состояние космонавта  $s_i$ . На этапе обучения происходит вычисление плотностей вероятностей появления симптомокомплексов при наличии конкретных диагнозов  $P(D/S)$ , при

непосредственной работе классификатора вычисляются правдоподобия  $P(S/D)$  для определения метки класса, что соответствует более вероятному диагнозу.

#### Модуль классификации

В ходе классификации происходит вычисление правдоподобий  $P(S/D)$  для каждого из параметров и по формуле (2.13) перемножение и вычисление апостериорной вероятности  $P(D/S)$  для каждого класса. Затем по формуле (2.15) происходит сравнение апостериорных вероятностей  $P(D/S)$  и наблюдению с вектором данных присваивается класс, которому принадлежит максимальная апостериорная вероятность

#### Модуль классификации с порогом отсечения

Порог отсечения это точка баланса между ошибками I и II рода. Варьируя значение порога отсечения, возможно настроить классификатор на более приемлемый характер работы с учетом решаемой задачи, так например для медицинской диагностики важна высокая чувствительность, что свидетельствует об увеличении ошибки II рода и гипердиагностике.

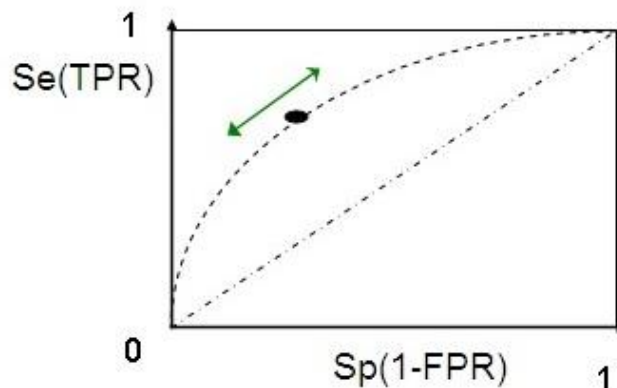


Рис. 3.7. Графическое представление ROC-кривой, варьирование порога отсечения, поиск баланс между ошибками I и II рода

#### Модуль кросс-валидации

Для определения эффективности и точности работы классификатора предусмотрен ряд модулей проверки, первый из них модуль кросс-валидации. Кросс-валидация – это методика проверки эффективности работы модели на независимом наборе данных. Для получения более объективного результата применяется кросс-валидация. Видов кросс-валидации множество, применен  $k$ -fold cross validation. Исходный набор данных разбивается на  $k$  фолдов, затем каждый фолд используется для теста, в то время как остальные  $k-1$  фолдов – для обучения. Значение параметра  $k$  может быть произвольным.

### Модуль ROC-анализа

Метод графической визуализации качества работы классификатора представлен в виде ROC-кривой – это зависимость чувствительностью (sensitivity) от специфичности (specificity). Идеальный классификатор обладает чувствительностью и специфичностью, равным 1, однако при анализе ROC-кривой, изображенной на Рис. 3.7, становится очевидно, что это невозможно, так как чем выше одна характеристика, тем ниже другая характеристика. Баланс между чувствительностью  $S_e$  и специфичностью  $S_p$  возможно найти с помощью порога отсечения. Таким образом, данное действие позволяет повысить точность работы классификатора, настраивая оптимальный порог отсечения. Пороговая линия решающего правила должна оптимально разделять области пересечения двух выборок, как представлено на Рис. 3.7.

### Модуль расчета матрицы сопряженности (обнаружения)

Конкретная численная метрика качества работы классификатора для оценки на качественном и количественном уровне новых реализаций является матрица обнаружения, которая представляет собой таблицу, содержащую основные статистические характеристики качества классификации. Для бинарной классификации матрица содержит следующие элементы:

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

### Модуль адаптации

Модуль адаптации служит для повышения эффективности работы классификатора, добавляя в обучающую выборку новые верифицированные случаи, проводится «переобучение» системы и уточнение параметров классификации. При использовании СППР на борту космического аппарата в случае диагностики сердечно-сосудистых патологий обновление и «переобучение» системы целесообразно производить через две недели после проведенного исследования, так как повышение концентрации маркеров некроза миокарда в крови происходит не более чем за вышеупомянутый срок до кардиальной катастрофы.

### Модуль интерфейса

В данном модуле представлен интерфейс для работы с исходными данными, а так же вывода результатов обучения и классификации, представлено на Рис. 3.8 - Рис. 3.11.

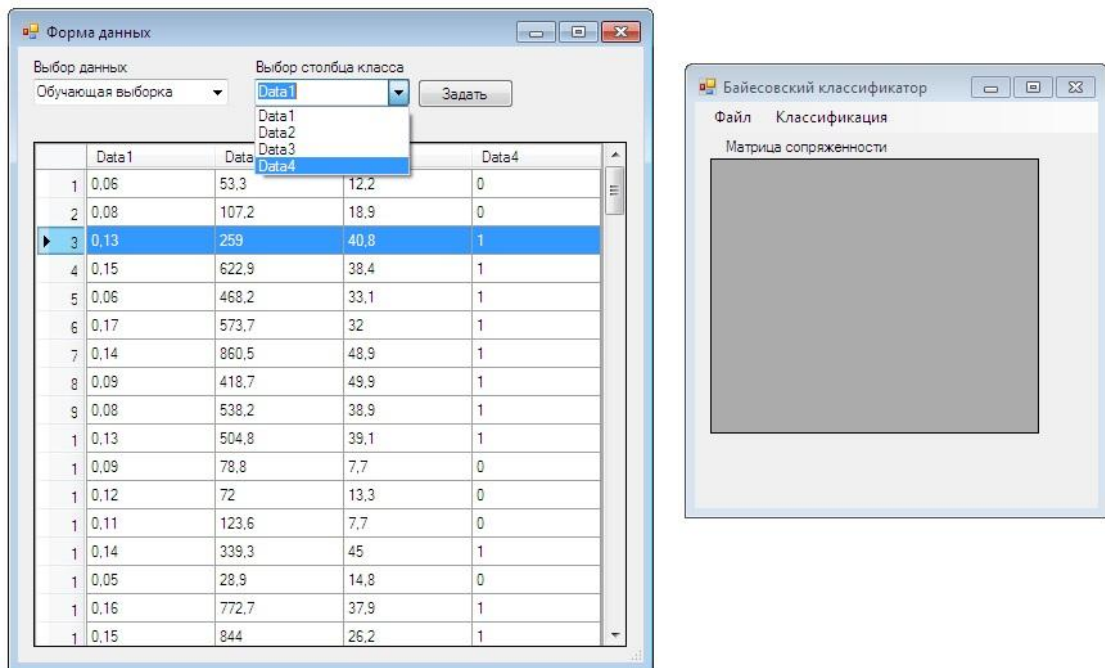


Рис. 3.8. Визуализация обучающей выборки и выбор столбца класса

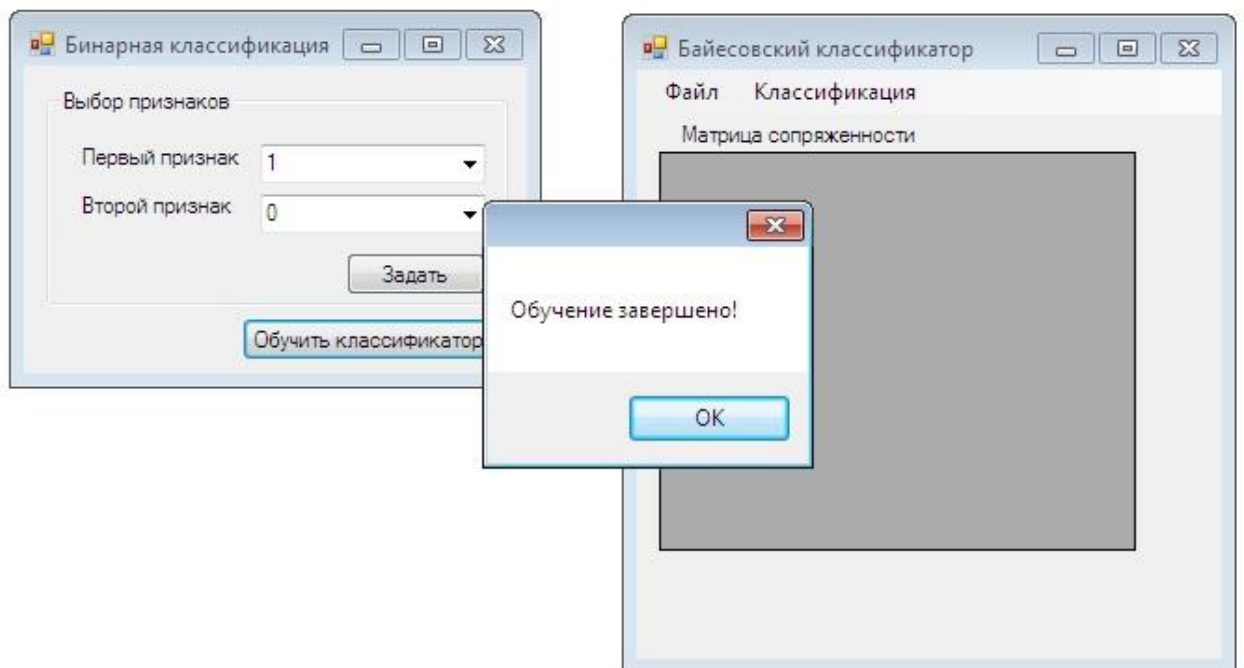


Рис. 3.9. Обучение классификатора

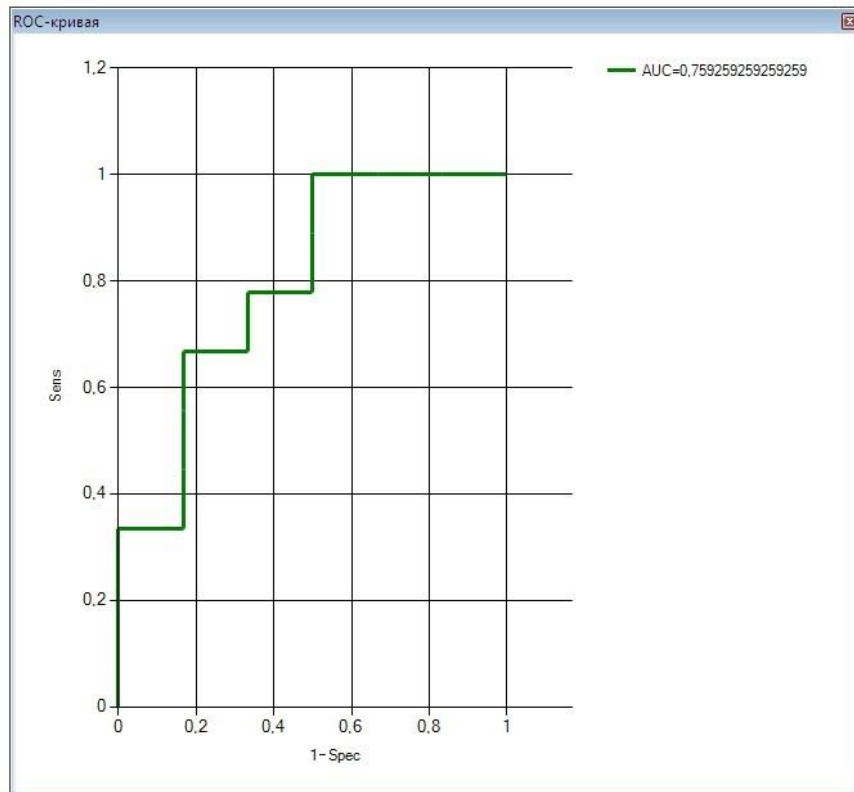


Рис. 3.10. ROC-кривая

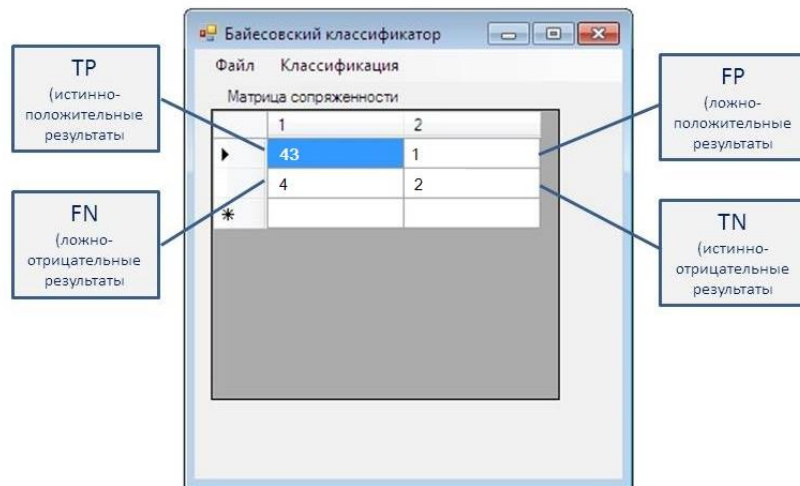


Рис. 3.11. Матрица сопряженности (обнаружения) для тестовой выборки



### 3.3. Выводы по главе 3

1. Разработаны структура алгоритма реализации и принципы построения программно-математического обеспечения для решения задачи автоматизированной оценки состояния космонавтов в условиях ДКП для обеспечения безопасности.
2. Разработано программно-математическое обеспечения с возможностью решения задач на основе различных исходных данных и варьированием пороговой линии решающего правила.

## ГЛАВА 4. Результаты тестирования программного комплекса

### 4.1. Тестирование системы поддержки принятия решений на примере концентраций биохимических параметров, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы

Для проведения корректного тестирования СППР для применения на борту космического аппарата, используя клинические данные пациентов, находящихся на Земле необходимо определить априорную вероятность наступления заболевания для космонавтов. Надо добавить, что тестирования на статистических данных, полученных из космической миссии невозможно, так как такой полет лишь планируется, а задачу обеспечения безопасности необходимо решить заблаговременно. В работе Юрова И.Б. (2006) отмечается, что функциональные изменения, которые происходят в сердечно-сосудистой и мышечной системах у космонавтов и профессиональных спортсменов схожи, поэтому в рамках моделирования из-за нехватки информации непосредственно из космических миссий допустимо использовать параметры профессиональных спортсменов.

По статистическим данным Министерства здравоохранения РФ (2013) в популяции российских граждан заболеваемость по острому инфаркту миокарда и сопутствующих кардиозаболеваний составляет 2 093,9 человека на 100 000 человек населения, что в процентном соотношении составляет примерно 2%. Различные группы ученых в своих научных исследованиях Corrado D. (2006), Adami P.E. (2015) показали, что сердечно-сосудистые заболевания присущи профессиональным спортсменам в 2,4 раза выше, чем людям из популяции не занимающимся спортом.

Следовательно, можно принять, что 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.

Итак, при моделировании БК необходимо учитывать следующую последовательность действий, которые представлены на Рис. 4.1. Инструменты для реализации всех этапов представлены выше в предыдущих пунктах работы.



Рис. 4.1. Этапы моделирования классификатора

Алгоритм работы пользовательской программы имеет следующую структуру:

- 1) загрузка обучающей выборки;
- 2) визуализация обучающей выборки и выбор столбца класса;
- 3) проведение обучения бинарного классификатора;
- 4) проведение процедуры кросс-валидации;
- 5) выполнение 10-фолдовой кросс-валидации, расчет матрицы обнаружения для каждого фолда, расчет значения AUC для каждого фолда;
- 6) визуализация расчета чувствительности и специфичности для построения ROC-кривой. Шаг порога отсечения задается произвольно, определение оптимального порога отсечения представлено в табл. 4.1.

табл. 4.1

Значение порога ( $\eta$ )	Sens ( $S_e$ )	1-Spec ( $1-S_p$ )	Spec ( $S_p$ )	Sens+Spec ( $S_e+S_p$ )	Sens-Spec  ( $ S_e-S_p $ )
<b>0,01</b>	1	1	0	1	1
<b>0,02</b>	1	1	0	1	1
<b>0,03</b>	1	1	0	1	1
<b>0,04</b>	1	1	0	1	1
<b>0,05</b>	1	1	0	1	1

0,06	1	1	0	1	1
0,07	1	1	0	1	1
0,08	1	1	0	1	1
0,09	1	1	0	1	1
0,1	1	1	0	1	1
0,11	1	1	0	1	1
...	...	...	...	...	...
0,79	0,78	0,5	0,5	1,28	0,28
0,8	0,78	0,5	0,5	1,28	0,28
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
0,89	0,56	0,17	0,83	1,39	0,27
0,9	0,56	0,17	0,83	1,39	0,27
0,91	0,44	0,17	0,83	1,27	0,39
...	...	...	...	...	...

Анализируя табл. 4.1 необходимо выбрать оптимальный критерий порога отсечения:

- максимальная сумма чувствительности и специфичности:

$$\max_k (S_{e_k} + S_{p_k}); \quad (4.1)$$

- равенство чувствительности и специфичности:

$$\min_k |S_{e_k} - S_{p_k}|. \quad (4.2)$$

Используя критерии нахождения оптимального порога отсечения, определено, что максимальная чувствительность и специфичность и, следовательно, минимум ошибок I и II рода достигается при значении порога 0,83. В данной точке чувствительность равна 78% это можно интерпретировать, следующим образом, что данный классификатор в 78% случаев у

пациентов с наличием ИМ результаты классификации будут положительными. Специфичность равна 67%, следовательно, в 67% случаев у пациентов без ИМ результаты классификации будут отрицательными. Точкой, в которой чувствительность и специфичность равны, является 0,86;

7) построение ROC-кривых для каждого фолда (Рис. 4.2);

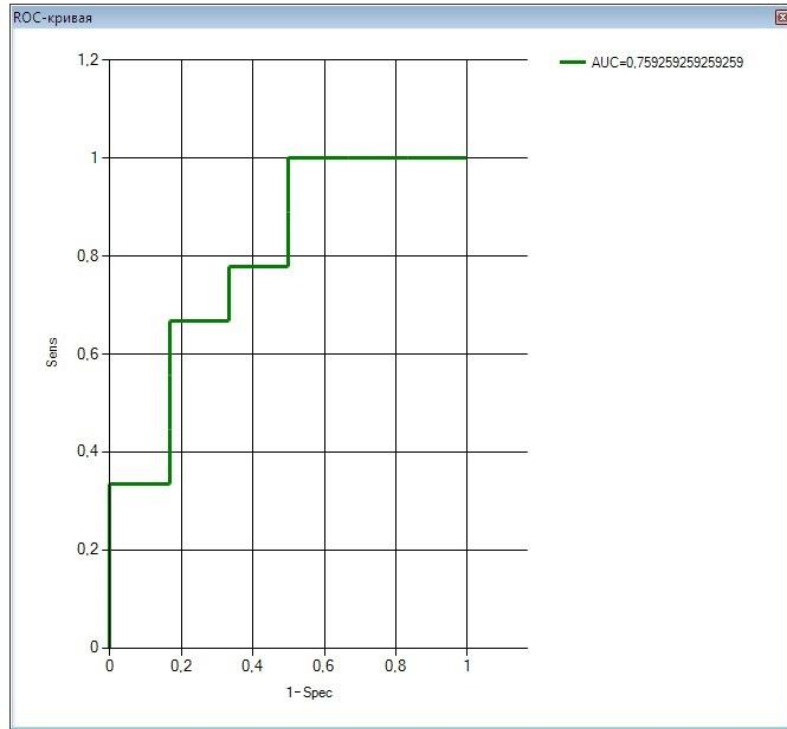


Рис. 4.2. ROC-кривая

8) выполнение тестирования классификатора. Загрузка тестовой выборки. Вычисление матрицы обнаружения (Рис. 4.3);

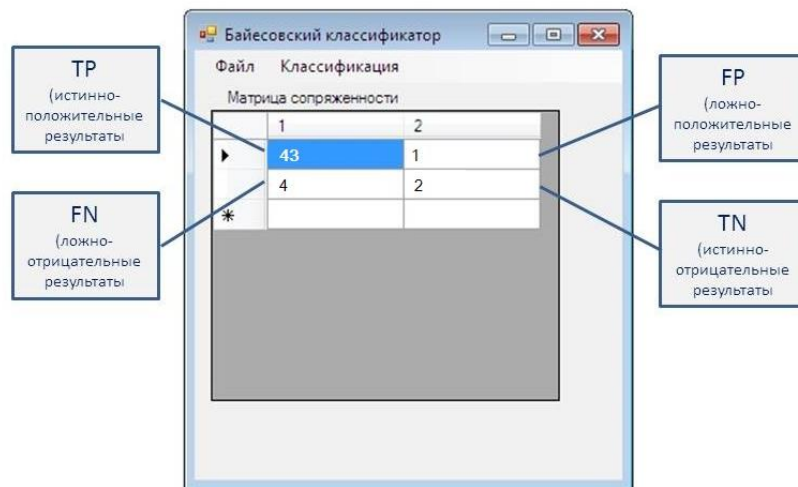


Рис. 4.3. Матрица сопряженности (обнаружения) для тестовой выборки

Из представленного Рис. 4.3 можно сделать вывод, что при классификации тестовой выборки объемом 50 случаев истинно-положительных результатов  $TP=2$ , ложно-положительных результатов  $FP=4$ , ложно-отрицательных результатов  $FN=1$ , истинно-отрицательных результатов  $TN=43$ .

9) проведение ROC-анализа для тестовой выборки Рис. 4.4.

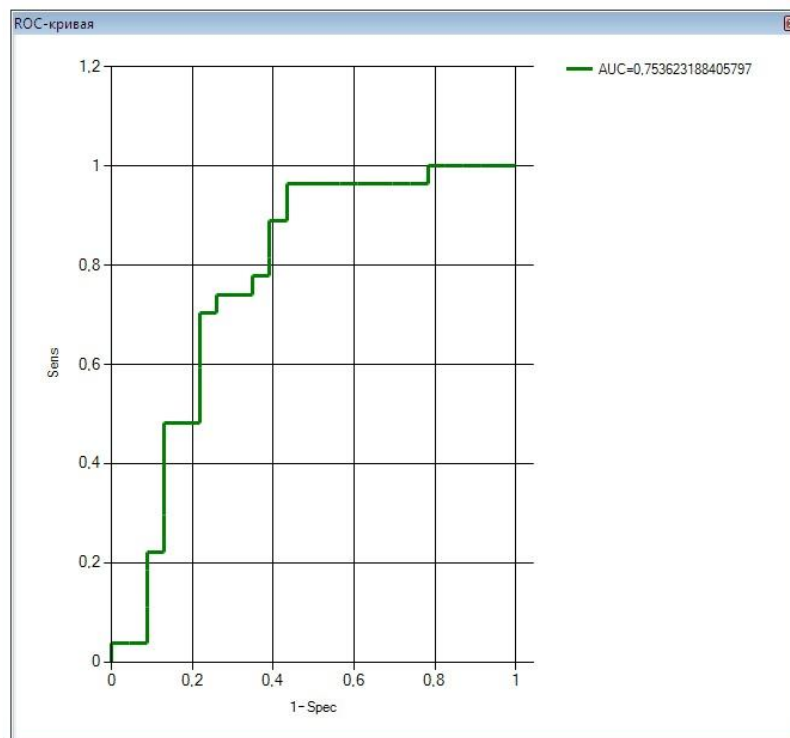


Рис. 4.4. ROC-кривая для тестовой выборки

#### 4.2. Тестирование системы поддержки принятия решений на примере расширенного перечня параметров, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы

Стоит, однако, заметить, что медицинские данные зачастую являются не количественными нормально распределенными, а могут иметь различные распределения. Также могут являться качественными данными, которые регистрируются по принципу «да – нет» или «0 – 1» или признаками, измеряемыми по порядковой шкале, когда результаты исследования оценивают в виде тестовых баллов.

В качестве исходных данных была использована выборка по сердечно-сосудистым заболеваниям из UCI Machine Learning Repository [<http://www.ics.uci.edu/~mlern/MLRepository.html>]. Irvine, CA: University of California, School of Information and Computer Science. Анализируемые данные состоят из 270 наблюдений и 13 переменных (предикторов), 14 переменная является экспертной оценкой, которая отражает экспертное мнение о наличии или отсутствии заболевания у пациента. Данная оценка имеет два значения: 1 – нет заболевания, 2 – есть заболевание. Диагностические предикторы можно интерпретировать следующим образом:

- 1) возраст;
- 2) пол;
- 3) тип боли в грудной клетке (4 значения);
- 4) систолическое давление;
- 5) значение холестерина в мг/дл;
- 6) - уровень сахара в крови натощак > 120 мг / дл;
- 7) ЭКГ в покое (значения 0,1,2);
- 8) частота сердечных сокращений;
- 9) наличие стенокардии;
- 10) депрессия сегмента ST на ЭКГ;
- 11) наклон пика сегмента ST;
- 12) количество крупных сосудов (0-3);
- 13) интегральный показатель: 3 - нормальный; 6 - зафиксированный дефект;  
7 - обратимый дефект;
- 14) 1 - нет заболевания, 2 - есть заболевание.

В представленной выборке тип данных 1, 4, 5, 8, 10, 12 – является количественным, 2, 6 9 – бинарным, 3, 7, 11, 13 – бальным.

Построение классификатора на базе дискриминантного анализа осуществляется в несколько этапов согласно Рис. 4.5.



Рис. 4.5. Этапы построения классификатора на базе дискриминантного анализа

Дискриминантный анализ доступен в программном пакете STATISTICA и выполнен в соответствии с этапностью:

1. Загрузка данных, которые представляют собой 200 случаев в качестве обучающей выборки и 70 случаев в качестве тестовой выборки для проведения кросс-валидации.
2. Анализ вклада в дискриминацию между классами выполняется с помощью вычисления дискриминантной функции. Стандартизированные коэффициенты представлены на Рис. 4.6.



Эффект	Стандартизованные коэф. канонической дискриминантной функции (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация		
	Уровень Эффект	Столбец	Функция 1
Св.член		1	0,000000
Возраст		2	-0,120145
Тип боли		3	0,258483
Систалическое давление		4	0,140221
Холестерин		5	-0,020072
ЭКГ		6	0,185759
ЧСС		7	-0,212609
Депрессия ST		8	0,162914
Кол-во сосудов		9	0,540710
Интег. показатель		10	0,411662
Пол	0	11	-0,102317
Глюкоза	0	12	-0,231588
Стенокардия	0	13	-0,184403
Наклон ST	1	14	-0,337187
Наклон ST	2	15	0,357973
Пол*Глюкоза	1	16	-0,204025
Пол*Стенокардия	1	17	0,564648
Глюкоза*Стенокардия	1	18	-0,153581
Пол*Наклон ST	1	19	-0,147425
Пол*Наклон ST	2	20	-0,109279
Глюкоза*Наклон ST	1	21	0,308866
Глюкоза*Наклон ST	2	22	-0,016475
Стенокардия*Наклон ST	1	23	0,041115
Стенокардия*Наклон ST	2	24	-0,127160
Пол*Глюкоза*Стенокардия	1	25	-0,388110
Пол*Глюкоза*Наклон ST	1	26	0,081956
Пол*Глюкоза*Наклон ST	2	27	0,186048
Пол*Стенокардия*Наклон ST	1	28	-0,083165
Пол*Стенокардия*Наклон ST	2	29	-0,512946
Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	1	30	0,294418
Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	2	31	0,025219
Пол*Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	1	32	0,029323
Пол*Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	2	33	0,000000
Собс.знач.			1,708926

Рис. 4.6. Таблица стандартизованных коэффициентов дискриминантной функции

Анализ Рис. 4.6 показывает, что наибольший вклад имеют совокупные показатели, а именно пол и наличие стенокардии – 0,57, пол, наличие стенокардии и наклон пика сегмента ST – 0,51. Среди одиночных переменных наибольший вклад дает интегральный показатель, определяющий характер заболевания и прогноз на выздоровление (его стандартизованный коэффициент равен 0,41).

Рассматривая дискриминантные переменные, необходимо представить дискриминантные функции коэффициентов в стандартной и нестандартной форме. Коэффициент в нестандартной форме дает информацию об абсолютном вкладе данной переменной в значение дискриминантной функции. Коэффициент в стандартной форме дает представление об относительном вкладе переменной. Стандартизованные коэффициенты можно вычислить по формуле (4.3) [31]:

$$c_i = u_i \sqrt{\frac{w_{ii}}{n. - g}}, \quad (4.3)$$

где  $w_{ii}$  – сумма квадратов  $i$ -й переменной, определяемая соотношением (2.5);

$n.$  – общее число наблюдений;

$u_i$  – коэффициенты приведения к стандартной форме;  
 $g$  – число групп [31].

Стандартизированные коэффициенты полезно применять при выявлении тех переменных, которые вносят наибольший вклад в значение дискриминантной функции. Абсолютная величина коэффициента анализируется в стандартной форме: чем она больше, тем больше вклад этой переменной [31].

3. Определение критерия значимости дискриминантной функции представлено на Рис. 4.7. Рассматривается способность переменных различать классы.

Критерии хи-квадрат с последовательно удаленными корнями						
Сигма-ограниченная параметризация						
Удал.	Собст-знач.	Канон. R	Уилкса Лямбда	Хи-кв.	сс	p-ур.
0	1,708926	0,794261	0,369150	181,8708	31,00000	0,00

Рис. 4.7. Остаточная дискриминантная способность и проверка значимости

$\Lambda$ -статистика Уилка – это мера различий между классами по нескольким переменным (дискриминантным переменным). Вычисляется по следующей формуле (4.4) [31]:

$$\Lambda = \prod_{i=k+1}^g \frac{1}{1 + \lambda_i}, \quad (4.4)$$

где  $k$  – число уже вычисленных функций;

$g$  – число классов;

$\lambda_i$  – собственное значение [31].

Величины  $\Lambda$ , близкие к нулю, говорят о высоком различии (т.е. центры классов хорошо разделены и сильно отличаются друг от друга по отношению к степени разброса внутри класса). Увеличение  $\Lambda$  до ее максимального значения, равного 1, приводит к постепенному ухудшению различия, так как центры групп совпадают (нет групповых различий) [31].

На основе  $\Lambda$ -статистики Уилка можно получить тест значимости, аппроксимируя распределение некоторой функции от нее либо распределением хи-квадрат, либо F-распределением. Распределение хи-квадрат можно вычислить по формуле (4.5) [31]:

$$\chi^2 = - \left[ n \cdot \left( \frac{p+g}{2} \right) - 1 \right] \ln L_k, \quad (4.5)$$

что полученное распределение и будет хи-квадрат распределением с  $(p-k)(g-k-1)$  степенями свободы [31],

где  $\chi^2$  – распределение хи-квадрат;

$n$ . –общее число наблюдений;

$g$  – число классов;

$p$  – уровень значимости.

Анализируя Рис. 4.7, дискриминантная функция статистически значима.

4. Проведение классификации. Коэффициенты построенной функции классификации представлены на Рис. 4.8.

Функции классификации для Оценка экспертов (Таблица данных1)					
Сигма-ограниченная параметризация					
Эффект	Уровень Эффект	Столбец	1 p=,5550	2 p=,4450	
Св.член		1	-121,856	-126,491	
Возраст		2	1,079	1,044	
Тип боли		3	6,296	7,055	
Систалическое давление		4	0,421	0,442	
Холестерин		5	0,032	0,031	
ЭКГ		6	-0,715	-0,222	
ЧСС		7	0,614	0,589	
Депрессия ST		8	0,746	1,156	
Кол-во сосудов		9	-2,410	-0,735	
Интег. показатель		10	0,288	0,943	
Пол	0	11	-8,557	-8,854	
Глюкоза	0	12	8,315	7,482	
Стенокардия	0	13	-0,643	-1,190	
Наклон ST	1	14	6,547	5,055	
Наклон ST	2	15	3,007	4,591	
Пол*Глюкоза	1	16	6,129	5,560	
Пол*Стенокардия	1	17	0,782	2,256	
Глюкоза*Стенокардия	1	18	1,264	0,847	
Пол*Наклон ST	1	19	6,203	5,682	
Пол*Наклон ST	2	20	1,086	0,665	
Глюкоза*Наклон ST	1	21	-8,282	-7,077	
Глюкоза*Наклон ST	2	22	-0,202	-0,271	
Стенокардия*Наклон ST	1	23	3,456	3,614	
Стенокардия*Наклон ST	2	24	4,522	4,057	
Пол*Глюкоза*Стенокардия	1	25	1,549	0,526	
Пол*Глюкоза*Наклон ST	1	26	-6,659	-6,369	
Пол*Глюкоза*Наклон ST	2	27	-5,188	-4,489	
Пол*Стенокардия*Наклон ST	1	28	1,252	0,961	
Пол*Стенокардия*Наклон ST	2	29	5,916	4,024	
Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	1	30	-2,130	-1,063	
Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	2	31	-4,830	-4,737	
Пол*Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	1	32	-2,993	-2,890	
Пол*Глюкоза*Стенокардия*Наклон ST	2	33	0,000	0,000	

Рис. 4.8. Коэффициенты функции классификации

Если учитывать только главные переменные, то функции классификации примут следующий вид:

$$h_1 = -121,856 + 1,079 * \text{возраст} + 6,296 * \text{тип боли} + 0,421 * \text{сист. дав.} + 0,032 * \text{холестерин} - 0,715 * \text{ЭКГ} + 0,614 * \text{ЧСС} + 0,746 * \text{депрессия ST} - 2,410 * \text{кол. во сосудов} + 0,288 * \text{интег. показ.} - 8,557 * \text{пол} + 8,315 * \text{глюкоза} - 0,643 * \text{стенокардия} + 6,647 * \text{наколон ST};$$

$$h_2 = -126,491 + 1,044 * \text{возраст} + 7,055 * \text{тип боли} + 0,442 * \text{сист. дав.} + 0,031 * \text{холестерин} - 0,222 * \text{ЭКГ} + 0,589 * \text{ЧСС} + 1,156 * \text{депрессия ST} - 0,735 * \text{кол. во сосудов} + 0,943 * \text{интег. показ.} - 8,854 * \text{пол} + 7,482 * \text{глюкоза} - 1,190 * \text{стенокардия} + 5,055 * \text{наколон ST}.$$

Классификация новых данных, поступающих в обученную модель, будет проводиться следующим образом: вычисляются все функции классификации для каждого наблюдения (в текущем случае две функции); наблюдение будет отнесено к тому классу, для которого значение функции классификации будет больше.

5. Для оценки качества классификации, необходимо построить матрицу классификации (по аналогии с матрицей обнаружения для БК), которая представлена на Рис. 4.9.

		Матрица классификации (Таблица данных1)	
		Строки: Наблюдаемые	
		Столбцы: Предсказанные	
		Доля Правил.	
Класс		1	2
1		p=,5550	p=,4450
1		89,18919	12,00000
2		13,0000	76,00000
Всего		112,0000	88,00000

Рис. 4.9. Матрица классификации для обучающей выборки

Текущая модель определяет экспертную оценку с точностью 87,5%, причем принадлежность к 1-му классу модель определяет с точностью 89,2%, ко 2-му классу – 85,4%.

6. Однако на учебной выборке часто встречается явление переобучения и улучшенные результаты, поэтому для объективности качества классификации необходимо построить матрицу классификации для тестовой выборки, которая представлена на Рис. 4.10.

Матрица классификации (Таблица данных1)			
Строки: Наблюдаемые			
Столбцы: Предсказанные			
Класс	Доля Правил.	1 p=,5550	2 p=,4450
1	84,61538	33,00000	6,00000
2	80,64516	6,00000	25,00000
Всего	82,85714	39,00000	31,00000

Рис. 4.10. Матрица классификации для тестовой выборки

Построенная модель определяет экспертную оценку с точностью 82,9%, причем принадлежность к 1-му классу модель определяет с точностью 84,6%, ко 2-му классу – 80,9%, что является очень хорошим результатом для классификации.

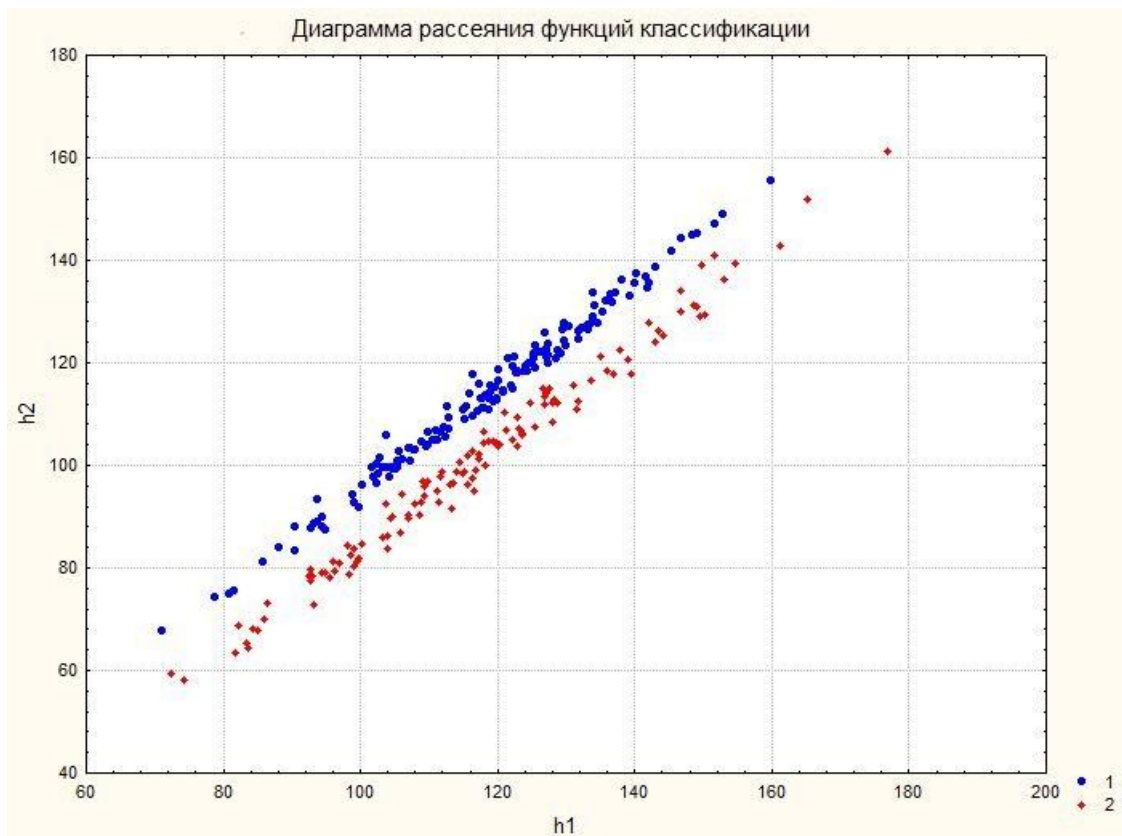


Рис. 4.11. Диаграмма рассеяния функций классификации

На Рис. 4.11 представлена графическая визуализация классифицирующей способности для описанной выше задачи. Очевидно, что два класса фактически не имеют пересечений, следовательно, предсказательная способность классификатора достаточно высока.

### **4.3. Тестирование системы поддержки принятия решений на примере амплитудно-частотных параметров речи человека, характеризующих психофизиологический статус и качество работы человека-оператора**

Для проведения корректного тестирования СППР для применения на борту космического аппарата, используя психофизиологические данные участников эксперимента «Марс-500» априорную вероятность  $P(S)$  наступления стрессового состояния необходимо принять равной пропорционально в соответствии с выборкой. Такой подход обоснован тем, что во время эксперимента «Марс-500» строго моделировалась и воссоздавалась полетная программа длительного пилотируемого космического полета к Марсу, включая длительность проведения эксперимента и имитацию операторской исследовательской деятельности.

Для решения задачи предотвращения чрезвычайной ситуации на борту космического аппарата при ДКП к другим планетам необходимо создание системы прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций. При рассмотрении безопасности полетов с точки зрения медицинского контроля необходима разработка комплекса мероприятий по мониторингу отклонений значимых параметров от предельно допустимого значения и оценки степени опасности состояния здоровья членов экипажа, на основе которых будет производиться прогноз наступления чрезвычайной ситуации. Так как в случае, если у одного из космонавтов разовьется критическое состояние, это приведет к срыву программы полета и экспедиции в целом. В предыдущих параграфах описана достаточно узкая предметная область для подобной системы, однако ее можно существенно расширить и применить в более широком спектре диагностируемых заболеваний и состояний следующими путями:

- 1) увеличение количества регистрируемых значимых параметров мониторинга и как следствие расширение перечня опасных состояний;
- 2) использование разработанного программного модуля в качестве составного элемента бортового многофункционального медицинского центра.

Критические состояния – это в основном патологии сердечно-сосудистой и выделительной систем. Необходимо составить оптимальный перечень значимых параметров состояния организма, учитывая диагностические возможности на борту космического аппарата. Очевидно, что обучение и тестирование системы будет проходить в наземных условиях. В

космическом полете регистрируемые параметры в систему поддержки принятия решения будут поступать из многофункционального медицинского центра, который оснащен необходимым измерительным оборудованием. Процесс конечного принятия решения бортовым специалистом об опасности состояния космонавта представлен на Рис. 4.12.

Процесс принятия решения бортовым специалистом при помощи СППР происходит следующим образом:

- 1) бортовой специалист с помощью измерительного оборудования, включенного в состав многофункционального медицинского центра на борту космического корабля, проводит мониторинг состояния космонавта;
- 2) регистрируемые параметры об опасности состоянии поступают в информационную систему корабля, частью которой является модуль поддержки принятия решения;
- 3) модуль поддержки принятия решения обрабатывает входные данные и на выходе формирует результат классификации;
- 4) после чего бортовой специалист, основываясь на собственном опыте и результате машинной классификации, принимает финальное решение об опасности состояния космонавта.

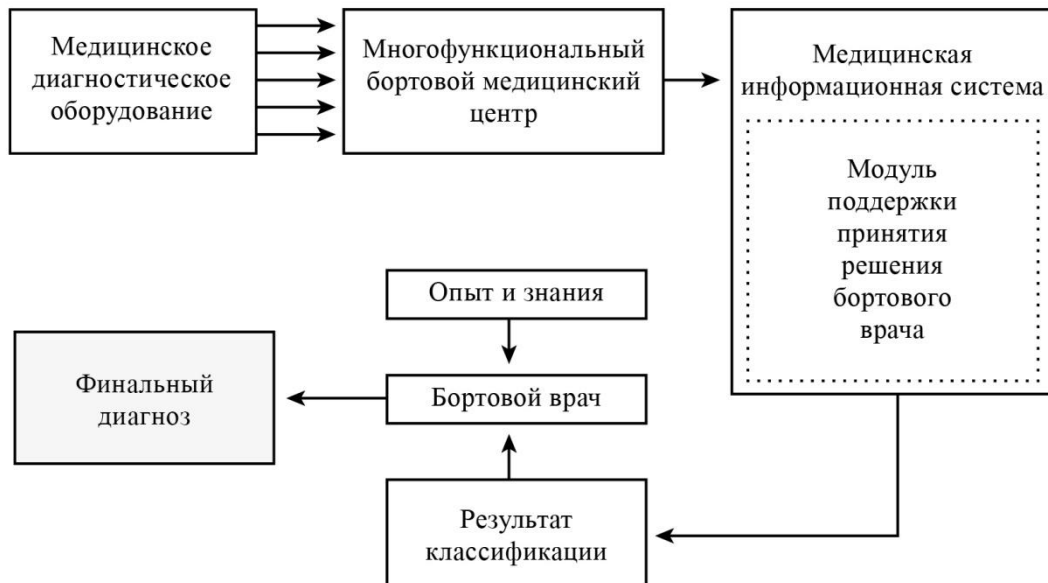


Рис. 4.12. Схема принятия решения о постановке диагноза бортовым врачом в автономных условиях ДКП

При применении модуля поддержки принятия решений для разнородных данных оправданно использование гибридного алгоритма, что способствует повышению точности классификации. Схема гибридного алгоритма представлена на Рис. 4.13.

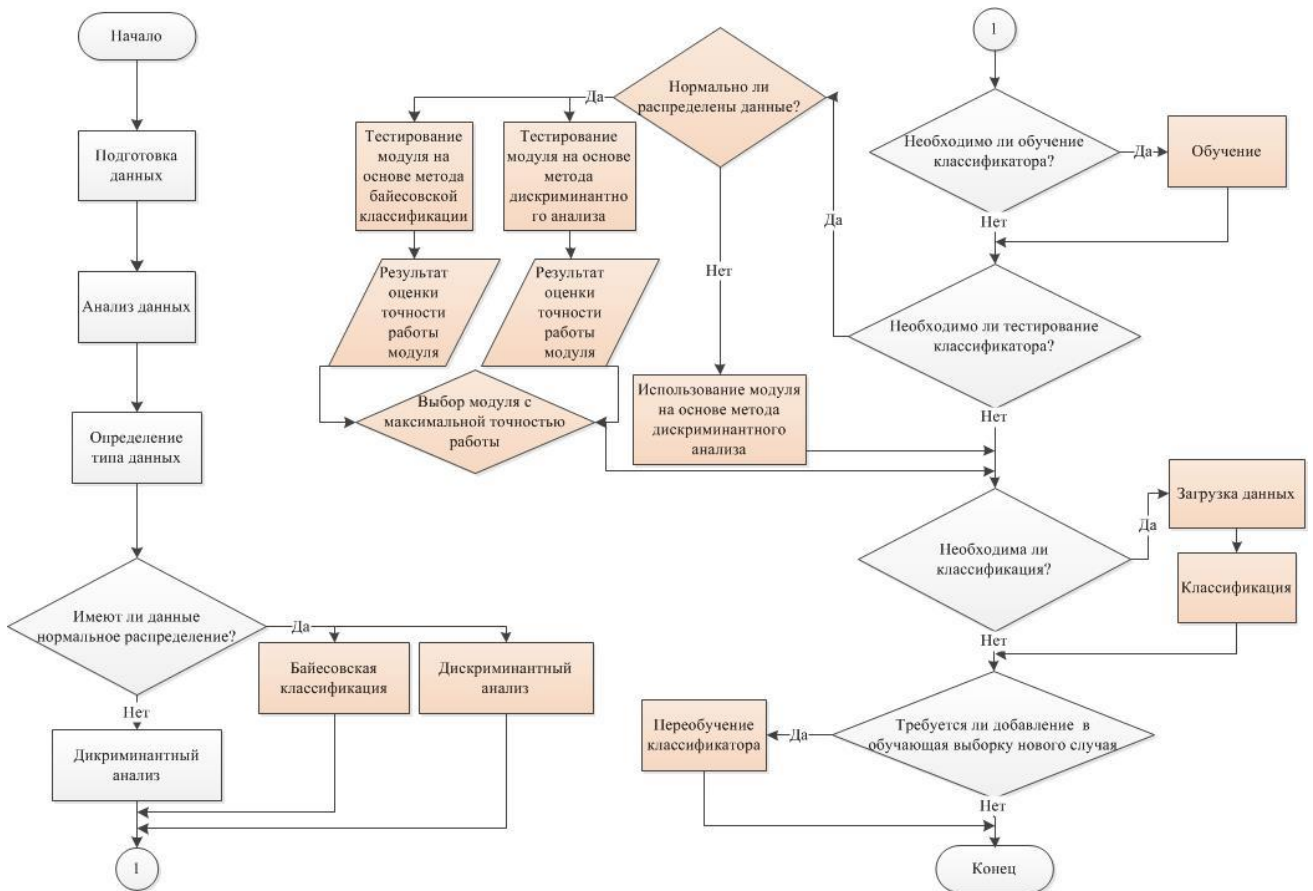


Рис. 4.13. Схема гибридного алгоритма модуля поддержки принятия решений

На Рис. 4.13 видно, 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 данных. Комбинация байесовской классификации и дискриминантного анализа позволит повысить эффективность и точность работы системы.

Из Рис. 2.9 следует, что исходные данные имеют распределения, близкие к нормальному, поэтому возможно использование текущей реализации БК и проверить эффективность программы для параметров, имеющих психофизиологическую природу. Алгоритм работы пользовательской программы имеет следующую последовательность:

- 1) загрузка обучающей выборки, состоящей из 2200 наблюдений и визуализация выборки, представленная в виде таблицы, выбор столбца класса;



- 2) проведение обучения бинарного классификатора;
- 3) проведение процедуры кросс-валидации, выполнение 10-фолдовой кросс-валидации, расчет матрицы обнаружения для каждого фолда, расчет AUC для каждого фолда;
- 4) визуализация расчета чувствительности и специфичности для построения ROC-кривой. Шаг порога отсечения задается произвольно, определение оптимального порога отсечения представлено в табл. 4.2:

табл. 4.2

Значение порога ( $\eta$ )	Sens ( $S_e$ )	1-Spec ( $1-S_p$ )	Spec ( $S_p$ )	Sens+Spec ( $S_e+S_p$ )	Sens-Spec  ( $ S_e-S_p $ )
0,1	1	1	0	1	1
0,2	1	1	0	1	1
0,3	1	1	0	1	1
0,4	1	1	0	1	1
0,5	1	1	0	1	1
0,6	1	1	0	1	1
0,7	1	1	0	1	1
0,8	1	1	0	1	1
0,9	0,96	0,94	0,06	<b>1,02</b>	0,9
1	0	0	1	1	1

Анализируя табл. 4.2, используя критерии нахождения оптимального порога отсечения, определено, что максимальная чувствительность и специфичность (минимум ошибок I и II рода) достигается при значении порога 0.9. В данной точке чувствительность равна 96% – значит результаты автоматизированной классификации в 96% случаев у людей с наличием психофизиологического стресса будут положительными. Специфичность равна 94%, следовательно, в 94% случаев у людей без стресса результаты классификации будут отрицательными;

- 5) построение ROC-кривых на Рис. 4.14;

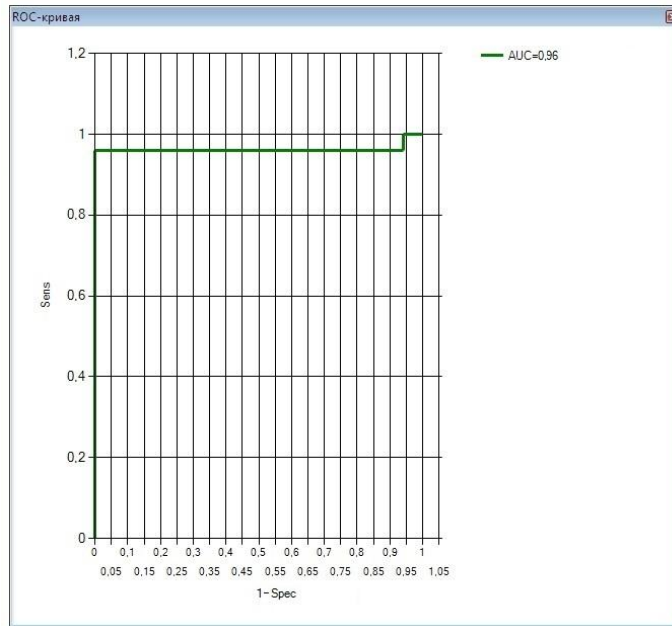


Рис. 4.14. Построение ROC-кривой, определение AUC

б) выполнение тестирования классификатора. Загрузка тестовой выборки, состоящей из 500 наблюдений. Вычисление матрицы обнаружения на Рис. 4.15;

Из представленного Рис. 4.15а можно сделать вывод, что при классификации тестовой выборки объемом 500 случаев истинно-положительных результатов  $TP=473$ , ложно-положительных результатов  $FP=0$ , ложно-отрицательных результатов  $FN=4$ , истинно-отрицательных результатов  $TN=8$ .

7) проведение ROC-анализа для тестовой выборки Рис. 4.15б.

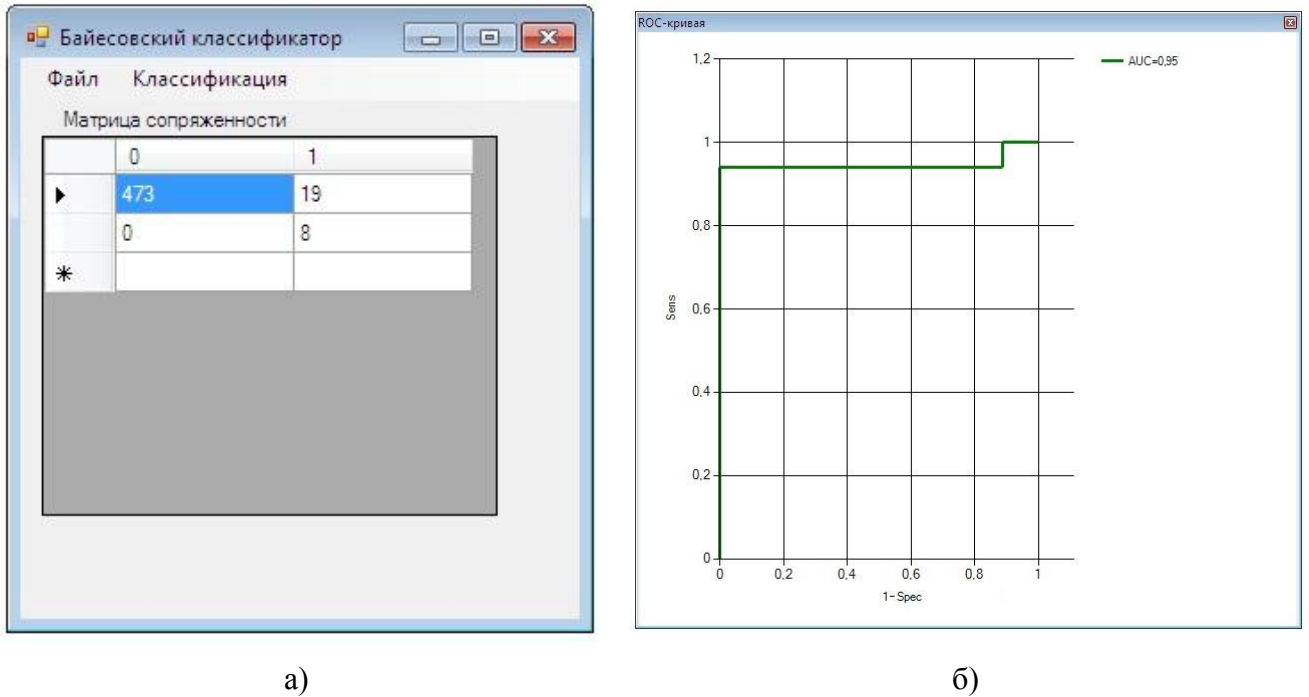


Рис. 4.15. Валидационные мероприятия:

- а) Матрица обнаружения для тестовой выборки;
- б) ROC-кривая для тестовой выборки.

Эффективность работы классификатора является очень высокой.

С целью проведения сравнения был построен классификатор на базе дискриминантного анализа в программном пакете STATISTICA в соответствии с методикой, приведенной в предыдущей главе:

1. Загрузка данных, представляющих собой 2200 случаев в качестве обучающей выборки и 500 случаев в качестве тестовой выборки для проведения кросс-валидации.
2. Анализ вклада в дискриминацию между классами выполняется с помощью вычисления дискриминантной функции. Стандартизированные коэффициенты представлены на Рис. 4.16.

Стандартизованные коэф. канонической дискриминантной функции (Таблица данных3)	
Сигма-ограниченная параметризация	
Эффект	Функция 1
Св.член	0,00000
FXMEDIAN	0,40127
FXMEAN	-0,66594
FXSD	0,27858
FXSKEW	-0,03411
FXKURT	-0,05615
VFERMEDIAN	0,03447
VFERMEAN	0,11005
VFERSD	0,23354
VFERSKEW	0,12370
VFERKURT	0,53773
HNRMEDIAN	0,42217
HNRMEAN	-0,59883
HNRSD	-0,06884
HNRSKEW	0,24825
HNRKURT	0,51134
PPQ5MEDIAN	-1,36971
"PPQ5MEAN"	5,58518
"PPQ5SD"	-3,82323
"PPQ5SKEW"	-0,01878
"PPQ5KURT"	1,21392
LTAS	0,04948
EMSALL	0,02365
Собс.знач.	0,60781
Кум.Проп.	1,00000

Рис. 4.16. Таблица стандартизованных коэффициентов дискриминантной функции

Анализ Рис. 4.16 показывает, что наибольший вклад имеют переменные PPQ5MEAN и PPQ5SD, равные 5,59 и -3,82 соответственно.

3. Определение критерия значимости построенной дискриминантной функции представлено на Рис. 4.17. Рассматривается способность переменных различать классы.

Критерии хи-квадрат с последовательно удаленными корнями (Таблица данных3)						
Сигма-ограниченная параметризация						
Удал.	Собст-знач.	Канон. R	Уилкса Лямбда	Хи-кв.	сс	p-ур.
0	0,607811	0,614847	0,621964	1275,985	22,00000	0,00

Рис. 4.17. Остаточная дискриминантная способность и проверка значимости

Анализируя Рис. 4.17, дискриминантная функция статистически значима.

4. Проведение классификации. Коэффициенты построенной функции классификации представлены на Рис. 4.18.

Функции классификации для Оценка экспертов (Таблица данных3)		
Сигма-ограниченная параметризация		
	0	1
Эффект	<b>p=,9832</b>	p=,0168
<b>Св.член</b>	<b>-1513,58</b>	-1579,72
FXMEDIAN	-2,26	-2,08
FXMEAN	4,59	4,30
FXSD	-4,70	-4,53
FXSKEW	38,03	38,16
FXKURT	-1,90	-1,98
VFERMEDIAN	1969,55	1981,47
VFERMEAN	625,40	635,18
VFERSD	4142,32	4214,89
VFERSKEW	146,66	148,87
VFERKURT	44,49	48,41
HNRMEDIAN	5,51	7,06
HNRMEAN	2,09	-0,72
HNRSD	17,82	16,99
HNRSKEW	83,29	86,98
HNRKURT	33,17	37,35
PPQ5MEDIAN	1,98	0,23
"PPQ5MEAN"	-5,96	0,68
"PPQ5SD"	8,21	4,32
"PPQ5SKEW"	-58,95	-58,84
"PPQ5KURT"	9,71	13,27
LTAS	-0,85	-0,64
EMSALL	5,29	5,63

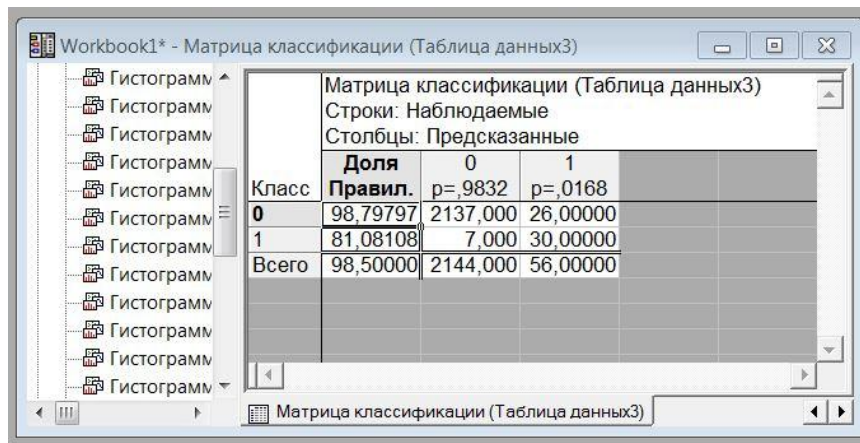
Рис. 4.18. Коэффициенты функции классификации

Функции классификации примут следующий вид:

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

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

5. Для оценки качества классификации необходимо построить матрицу классификации, которая представлена на Рис. 4.19.

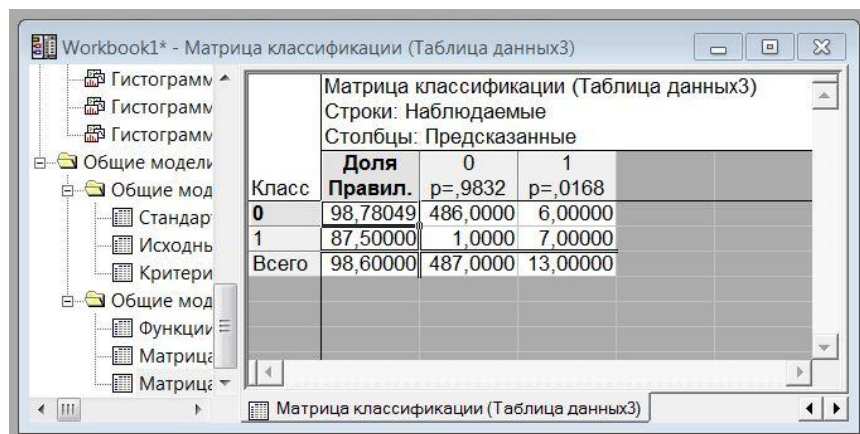


		Матрица классификации (Таблица данных3)	
		Строки: Наблюдаемые	
		Столбцы: Предсказанные	
Класс	Доля	0	1
	Правил.	p=,9832	p=,0168
0	98,79797	2137,000	26,00000
1	81,08108	7,000	30,00000
Всего	98,50000	2144,000	56,00000

Рис. 4.19. Матрица классификации для обучающей выборки

Текущая модель определяет экспертную оценку с точностью 98,5%, причем принадлежность к 0-му классу модель определяет с точностью 98,8%, к 1-му классу – 81,1%.

6. При проверке эффективности работы классификатора на обучающей выборке часто возникают явление переобучения; для объективности необходимо построить матрицу классификации тестовой выборки, представленной на Рис. 4.20.



		Матрица классификации (Таблица данных3)	
		Строки: Наблюдаемые	
		Столбцы: Предсказанные	
Класс	Доля	0	1
	Правил.	p=,9832	p=,0168
0	98,78049	486,0000	6,00000
1	87,50000	1,0000	7,00000
Всего	98,60000	487,0000	13,00000

Рис. 4.20. Матрица классификации для тестовой выборки

Построенная модель определяет экспертную оценку с точностью 98,6%. Причем принадлежность к 0-му классу модель определяет с точностью 98,8%, к 1-му классу – 87,5%, что является чрезвычайно высоким процентом точности для классификации.

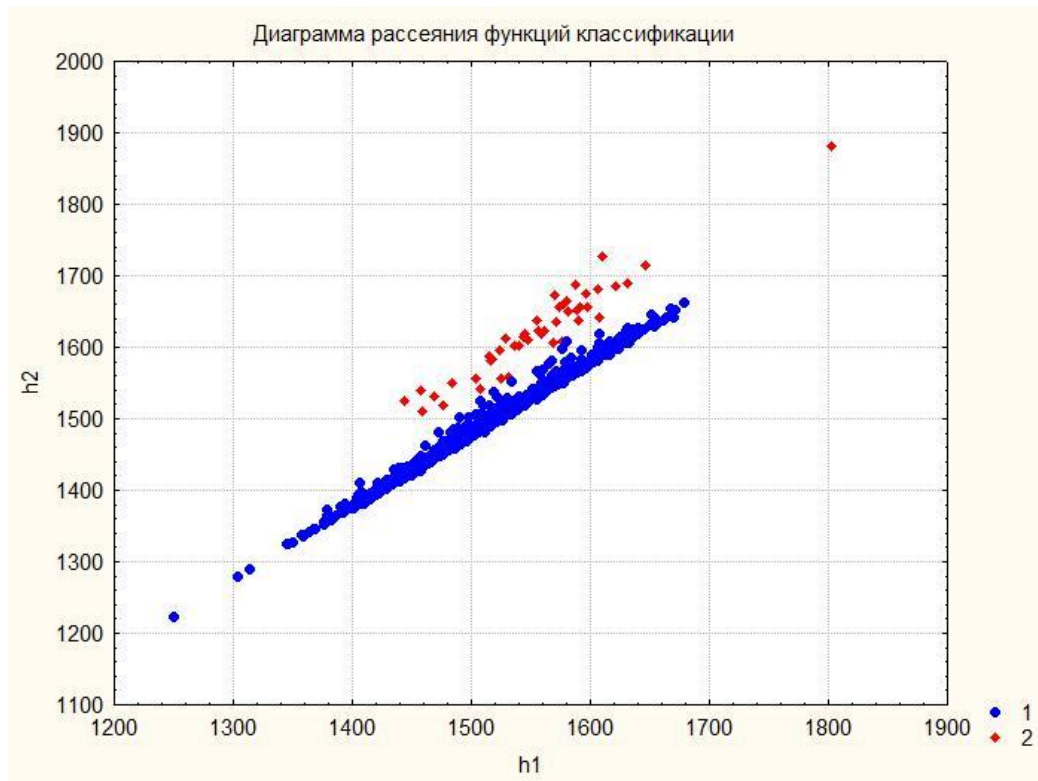


Рис. 4.21. Диаграмма рассеяния функций классификации

На Рис. 4.21 представлена графическая визуализация классифицирующей способности построенного классификатора. Очевидно, что два класса фактически не имеют пересечений. Следовательно, предсказательная способность достаточно высока.

#### **4.4. Возможность применение системы поддержки принятия решений для предупреждения чрезвычайных ситуаций в экстремальных условиях профессиональной деятельности на наземных объектах**

Экстремальная деятельность – это деятельность человека, которая является для него трудно выполнимой или в данный момент невыполнимой и требует готовности к предельному или околопредельному напряжению психических и психофизиологических сил [42].

Экстремальная ситуация – это актуальная ситуация, требующая максимальной мобилизации психических и физических сил человека [42].

К числу факторов, превращающих ситуацию в экстремальную, относятся следующие [42]:

- дефицит времени;
- опасность для жизни, здоровья;
- информационная перегрузка в условиях дефицита времени;
- монотонность и однообразие выполняемых действий;
- внезапность возникновения экстремальной ситуации и как следствие информационный дефицит, смысловая неопределенность [42].

Наиболее характерным психическим состоянием, развивающимся под влиянием экстремальных условий жизнедеятельности, является стресс. Термином «стресс» объединяют большой круг факторов, связанных с последствиями экстремальных воздействий внешней среды, конфликтами, сложными и ответственными производственными задачами, опасными или рискованными ситуациями и т.д. [42].

Возникновение физиологического стресса обусловлено воздействием неблагоприятного стимула непосредственно на организм человека. В процессе таких воздействий происходит перестройка нейрогуморальных и висцеральных реакций, в результате чего восстанавливается гомеостатическая устойчивость организма. Данные механизмы и обуславливают стереотипный характер реакций при физиологическом стрессе [42].

Результаты обследований свидетельствуют о значительных изменениях, происходящих в состоянии исследуемых: уменьшается частота альфа-ритма, снижается эффективность мыслительных процессов, появляется чувство беспокойства, тревоги, депрессия, отказ от выполняемой деятельности, изменяется самооценка, возникают зрительные, слуховые и тактильные галлюцинации, теряется чувство времени, появляется гипокинезия [32].

Эти изменения возникают в условиях влияния внешних раздражителей, воздействующих на сенсорные или метаболические процессы, и являются ответом организма на физический стресс. Его основным пусковым механизмом (стрессором) является недостаточная афферентация анализаторов человека, связанная со скудностью окружающей обстановки, ведущей к снижению активности головного мозга [32].

В условиях сенсорной депривации (в космосе, Арктике, Антарктике, подводном плавании и т.д.) стрессовое воздействие оказывает недостаток сенсорной аффертации (стимуляции) органов чувств, в то время как в обычных условиях на них действует мощный поток внешних раздражителей [32].



К экстремальным видам деятельности можно отнести профессии, в которых человек подвергается различного рода стрессовым факторам, приводящим к сложностям в выполнении деятельности. Это профессии летчика, космонавта, подводника, исследователя на северных станциях и т.д., чья деятельность связана с измененными условиями труда, оказывающими воздействие на зрительные, слуховые, тактильные анализаторы и вестибулярный аппарат. Находясь в условиях частичной или полной изоляции, человек подвергается воздействию определенных факторов, вызывающих состояние напряженности, а при интенсивном или длительном влиянии приводящих к стрессу. Эти факторы связаны [32]:

- с сенсорной депривацией (уменьшением интенсивности и разнообразия притока раздражителей одной или более модальностей);
- социальной депривацией (отсутствием возможности общения с другими людьми, получения социально содержательной информации, реализации целого ряда прав и обязанностей);
- фактором «заключения» (связан с лишением возможности свободного передвижения и вынужденным нахождением в ограниченном пространстве) [32].

Российский Север занимает 2/3 территории страны и дает 60% отечественных валютных поступлений. Только разведанные запасы шельфа Северного Ледовитого океана составляют 25% мировых ресурсов углеводородного сырья. Отечественный арктический морской шельф из привычного географического понятия стремительно превращается в крупнейший район долгосрочного и планомерного освоения [15].

В сложных, суровых климатогеографических условиях Арктики существует множество нюансов организации медицинской помощи. Они касаются как непосредственно самих манипуляций с пациентом, так и вопросов логистики (доставки пострадавших), телемедицинских консультаций и так далее. На Западе все это регламентируется международным стандартом ОПТО (Offshore Petroleum Industry Training). Однако в отличие от других стран в РФ по-прежнему нет своей технологии для медицинского сопровождения такого рода работ, нет никаких медицинских стандартов. В связи с этим крупные холдинги в области нефтегазодобычи (Роснефть, Газпром, Лукойл) имеют огромную потребность в подобных услугах [50].

Острейший вопрос – транспортировка нуждающихся в оказании медицинской помощи в лечебные учреждения Арктического бассейна. Сегодня только на единичных судах в Арктике можно встретить на борту судна врача. Даже ледоколы, обеспечивающие проводку судов во льдах и имеющие государственный статус, работающие круглогодично на трассе, в редких случаях берут в рейс судового врача [15].

В XX веке сформировалась клинико-организационная модель предоставления телемедицинской помощи на полярных территориях. В СССР в 1970 г., в период работы 15-й антарктической экспедиции, произошло знаменательное событие – была осуществлена первая опытная передача серии электрокардиограмм из обсерватории «Мирный» в г. Ленинград. Этот год можно считать началом внедрения средств и методов телемедицины в практику полярных исследований в Антарктике. В следующем году (16-я экспедиция) врачи станции «Молодежная» установили связь по фототелеграфу с отделом полярной медицины ААНИИ в г. Ленинграде. Трижды экспедиционные врачи получали квалифицированные радиоконсультации на основе присланных из Антарктиды электрокардиограмм больного с острым инфарктом миокарда. Британская антарктическая экспедиция использует различные виды телекоммуникаций для решения задач обеспечения безопасности более 60 лет; в частности телемедицинские консультации для полярников проводили сотрудники больницы Деррифорд (г. Плимут, Великобритания). Более широко телемедицина для поддержки полярников Европы и Северной Америки начала применяться в середине 1990-х гг. и позднее. Десятилетиями именно радиосвязь оставалась ключевым инструментом телемедицины в полярных районах [18].

Проблемы обеспечения безопасности для экипажей подводных лодок и работников, занятых в экстремальных условиях Арктики и Антарктики, очень схожи с особенностями космической медицины. На них действуют следующие негативные факторы: сенсорная депривация, монотония, рассогласование режима сна и бодрствования, изоляция, ограниченность возможностей оказания помощи.

Поэтому подходы, которые предлагаются к совершенствованию системы медицинского обеспечения для космической отрасли, возможно эффективно применять для этих категорий служащих. Разработанная система для прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций для ДКП может применяться в ходе профессиональной деятельности в экстремальных условиях на Земле при незначительной модификации, которая будет заключаться в корректировке начальных условий, формирующих возможности системы в целом, то есть структура системы остается без изменений.

В данном случае под чрезвычайной ситуацией понимается серьезное заболевание одного из членов экипажа или экспедиции, которое может привести к тому, что он не сможет больше корректно выполнять свои профессиональные обязанности в зависимости от тяжести состояния, возможно, и не сможет этого делать вовсе. Соответственно оставшиеся коллеги вынуждены будут взять на себя профессиональный функционал пострадавшего, а также, возможно, часть их усилий будет затрачена на то, чтобы оказывать помощь заболевшему на

месте. Экстренная эвакуация пострадавшего, как правило, невозможна, поэтому возникает необходимость сохранить жизнеспособность пациента и не допустить летального исхода до момента транспортировки его в лечебно-профилактическое учреждение. Сложившаяся ситуация может привести к срыву экспедиции в целом, а также к существенным негативным изменениям в ходе выполнения профессиональных задач. Для предотвращения чрезвычайной ситуации и минимизации рисков предлагается внедрение системы обеспечения безопасности профессиональной деятельности в экстремальных условиях систему прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Различия в модификации систем будут зависеть от области применения:

- полярные экспедиции;
- суда северного морского флота;
- полярные станции и иные изолированные объекты;
- атомные подводные лодки.

На Рис. 4.22 представлены различные особенности, присущие той или иной области приложения и использования системы прогнозирования и предупреждения ЧС. Как и для применения в космической отрасли, построение системы имеет аналогичную последовательность: на первом этапе определяется наличие профильных специалистов на объекте и его квалификация. Исходя из этого можно составить перечень диагностического специализированного измерительного оборудования, которое будет доступно. Учитывая ресурсы, возможно, сформировать начальные граничные условия, состоящие из значимых параметров, в соответствии с перечнем критических состояний. Дальнейшая схема реализации, представленная на Рис. 4.13, останется такой же, как и для космического применения. Изменения коснутся только этапа обучения, на котором будут собраны актуальные решения для конкретной прикладной задачи, в зависимости от условий эксплуатации. Унификация данных особенностей не представляется возможной, так как имеет разную природу: так, например, для атомных подводных лодок необходимо контролировать биологические изменения, связанные с радиационной обстановкой на борту судна.

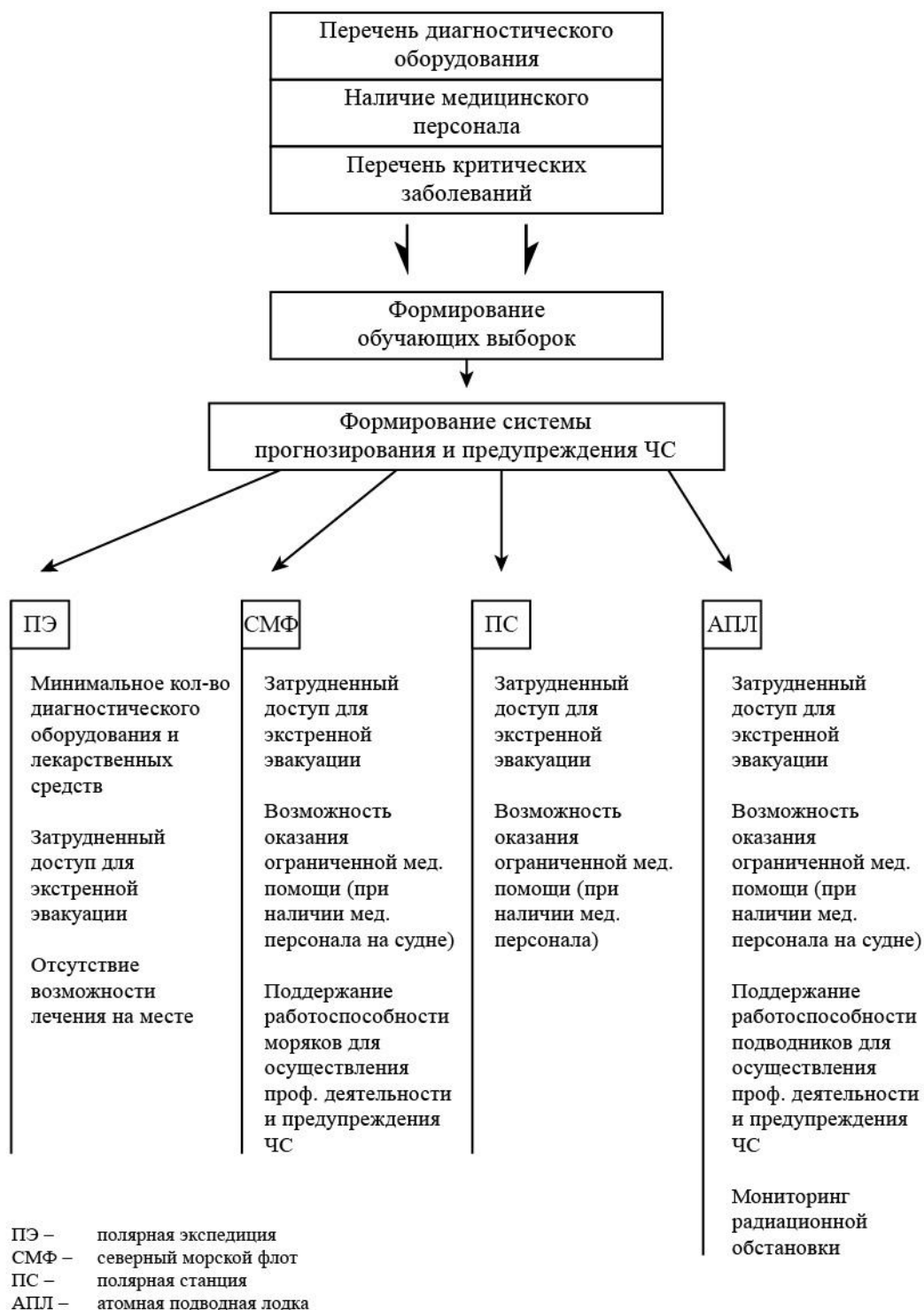


Рис. 4.22. Формирование систем прогнозирования и предупреждения ЧС с учетом особенностей различных прикладных областей

#### 4.4. Выводы по главе 4

1. Проведена оценка работы программно-математического обеспечения с возможностью тестирования на различных исходных данных, доказывая универсальность системы.
2. Результаты эффективности работы системы поддержки принятия решений показывают следующие результаты:
  - достоверность оценки риска возникновения нарушений в функционировании сердечно-сосудистой системы составляет не менее 75%;
  - достоверность оценки риска наличия психо-эмоционального стресса у членов экипажа, влияющего на качество операторской деятельности, составляет не менее 95%.

## 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 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.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

AUC	- area under ROC-curve
ROC	- receiver operating characteristic
БК	- байесовская классификация
БТС	- биотехническая система
ДКП	- длительный космический полет
ИМ	- инфаркт миокарда
КА	- космический аппарат
КСОЖ	- комплекс систем обеспечения жизнедеятельности
МК	- медицинский контроль
ОКС	- острый коронарный синдром
СМК	- средства медицинского контроля
СМО	- система медицинского обеспечения
СППР	- система поддержки принятия решения
ССС	- сердечно-сосудистая система
ЧС	- чрезвычайная ситуация

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Al-Aidaros, K.M. Medical Data Classification with Naive Bayes Approach / K.M. Al-Aidaros, A.A. Bakar and Z. Othman // *Information Technology Journal*. – 2012. – №11. – P. 1166–1174.
2. Blecha, M.J. Predictors of electrocardiographic change, cardiac troponin elevation, and survival after major vascular surgery: a community hospital experience / M.J. Blecha, E.T. Clark, T.A. Worley et al. // *Am. Surg.* – 2007. – 73. – P. 697–702.
3. Bramer, M.A. Knowledge discovery and data mining (Ed.) / M.A. Bramer. – The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1999. – 342 p.
4. Bursi, F. Vascular surgery patients: perioperative and long-term risk according to the ACC/AHA guidelines, the additive role of post-operative troponin elevation / F. Bursi, L. Babuin, A. Barbieri et al. // *Eur. Heart. J.* – 2005. – №26. – P. 2448–2456.
5. Caldwell, B.S. Information and communication technology needs for distributed communication and coordination during expedition-class spaceflight / B.S. Caldwell // *Aviation, space, and environmental medicine*. – 2000. – №71. – P. 6–10.
6. Gushin, V.I. Problems of psychological control in prolonged space flights / V.I. Gushin // *Earth Space Rev.* – 1995. – №4(1). – P. 28–31.
7. Higham, H. Perioperative troponin I concentration as a marker of long-term postoperative adverse cardiac outcomes: a study in high-risk surgical patients / H. Higham, J.W. Sear, Y.M. Sear et al. // *Anaesthesia*. – 2004. – №59. – P. 318–323.
8. Kelly, A.D. Communication between space crews and ground personnel: a survey of astronauts and cosmonauts / A.D. Kelly, N. Kanas // *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. – 1993. – № 64. – P. 795–800.
9. Kertai, M.D. A combination of statins and betablockers is independently associated with a reduction in the incidence of perioperative mortality and nonfatal myocardial infarction in patients undergoing abdominal aortic aneurysm surgery / M.D. Kertai, E. Boersma, C.M. Westerhout et al. // *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* – 2004. – №28. – P. 343–352.
10. Lopez-Jimenez, F., Prognostic value of cardiac troponin T after noncardiac surgery: 6-month follow-up data / F. Lopez-Jimenez, L. Goldman, D.B. Sacks et al. // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 1997. – №29. – P. 1241–1245.
11. Osgood, Ch.E. Motivation and language behavior: a content analysis of suicide notes / Ch.E. Osgood, E.G. Walker // *Journal of Abnormal and Social Psychology*. – 1959. – №59.



12. Акулов, С.А. Основы теории биотехнических систем / С.А. Акулов, А.А. Федотов. – Москва: Физматлит, 2014. – 259 с.
13. Баевский, Р.М. Теоретические и прикладные аспекты оценки и прогнозирования функционального состояния организма при действии факторов длительного космического полета: актовая речь [Электронный ресурс] / Р.М. Баевский. – Москва: Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем, 2005. – Режим доступа: [http://www.imbp.ru/WebPages/win1251/Science/UchSov/Doc1/2005/Baevski\\_speach.html](http://www.imbp.ru/WebPages/win1251/Science/UchSov/Doc1/2005/Baevski_speach.html).
14. Береговой, Г.Т. Справочник по безопасности космических полетов / Г.Т. Береговой, В.И. Ярополов, И.И. Баранецкий, В.А. Высоканов, Я.Т. Шатров. – Москва: Машиностроение, 1989. - 336 с.
15. Будиев, А.Ю. Медицинские проблемы Арктики / А.Ю. Будиев, В.В. Лупачев, К.В. Логунов // Вестник Северного (Арктического) федерального университета: Естественные науки. – 2013. – №3. – С. 163–165.
16. Вапник, В.Н. Теория распознавания образов. Статистические проблемы обучения / В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис. – Москва: Наука, 1974. – 416 с.
17. Вельков, В.В. Новое универсальное определение инфаркта миокарда: решающее значение высокочувствительных тропонинов – актуальность для кардиологии и кардиохирургии / В.В. Вельков. – Москва: ЗАО «ДИАКОН», 2014. – 91 с.
18. Владзимирский, А.В. Телемедицина: Curatio Sine Tempora et Distantia / А.В. Владзимирский. – М. - 2016. – 662 с.
19. Вьюгин, В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования / В.В. Вьюгин. – М., 2013. – 387 с.
20. Газенко, О.Г. Обитаемость и биологические системы жизнеобеспечения / О.Г. Газенко, А.И. Григорьев, Г.И. Мелешко, Е.Я. Шепелев // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1990. – №3. – С. 12–17.
21. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. Общие медико-технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. – 121 с.
22. Григорьев, А.И. Основные операционные подходы к наземному моделированию пилотируемого полета на Марс / А.И. Григорьев, И.Б. Ушаков, Б.В. Моруков, Ю.А. Бубеев, Я.С. Боритко, Д.М. Швед, В.И. Гущин, Е.Л. Черняков // Биотехносфера. – 2013. – №4(28). – С. 11–17.

23. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
24. Гушин, В.И. Закономерности дистанционного общения малых групп в долговременной изоляции: автореф. дис. д-ра мед. наук: 14.00.32 / Гушин Вадим Игоревич. – Москва, 2003, 50 с.
25. Джанаева, Э.Ф. Современные возможности донозологической диагностики сердечно-сосудистой патологии [Электронный ресурс] / Э.Ф. Джанаева, Г.Н. Шеметова, Н.Б. Захарова // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №4. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6763>.
26. Дистанционное наблюдение и экспертная оценка: общение и коммуникация в задачах медицинского контроля / Ф.Н. Усков, О.В. Кушнерева, Б.А. Попов и др.; Отв. ред. П.В. Симонов, В.И. Мясников. – М.: Наука, 1982. – С. 107.
27. Дуда, Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – Перевод с англ. Г.Г. Вайштейн, А.М. Васьковского, под ред. В.Л. Стефанюка. – Москва: Изд-во МИР, 1976. – 509 с.
28. Евдокименков, В.Н. Компьютерные технологии сбора, обработки и анализа данных медико-биологических исследований / В.Н. Евдокименков. – Москва: Изд-во МАИ, 2005. – 435 с.
29. Егоров, А.Д. Теория и методологии медицинского контроля в длительных космических полетах: актовая речь [Электронный ресурс] / А.Д. Егоров. – Москва: Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем, 2001. – Режим доступа: [http://www.imbp.ru/webpages/win1251/Science/UchSov/Docl/2001/Egorov\\_actsp.html](http://www.imbp.ru/webpages/win1251/Science/UchSov/Docl/2001/Egorov_actsp.html).
30. Завалко, И.М. Изменения структуры ночного сна при наземном моделировании межпланетного полета: дис. кан. мед. наук: 14.03.08 / Завалко Ирина Михайловна. – Москва, 2014. – 122 с.
31. Ким, Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка, М.С. Олдендерфер, Р.К. Блэшфилд. – Москва: Финансы и статистика, 1989. – 216 с.
32. Краткий курс лекций по дисциплине «Психология труда» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://studme.org/1860072225480/psihologiya/professionalnaya\\_deyatelnost\\_ekstremalnyh\\_usloviyah\\_factory\\_vliyayuschie\\_vozniknovenie\\_napryazhennosti\\_tr](http://studme.org/1860072225480/psihologiya/professionalnaya_deyatelnost_ekstremalnyh_usloviyah_factory_vliyayuschie_vozniknovenie_napryazhennosti_tr).

33. Крылова, Н.В. Роль речи в деятельности оператора в экспериментальных условиях / Н.В. Крылова // Психологический журнал / Ред. Б.Ф. Ломов, Л.И. Анцыферова. – 1981. – Том 2. – №3, май-июнь 1981. – С. 100–104.
34. Лебедев, В.И. Личность в экстремальных условиях / В.И. Лебедев. – М.: Политиздат, 1989. – 303 с.
35. Леонов, А.А. Психологические проблемы межпланетного полета / А.А. Леонов, В.И. Лебедев. – М: Наука, 1975. – 248 с.
36. Литвина, Д.В. Вопросы качества обработки и анализа психофизиологических исследований для предупреждения чрезвычайных ситуаций в условиях моделирования длительных космических полетов / Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова, В.И. Гуцин // Качество жизни. – 2016. – №3(11). – С. 37–39.
37. Литвина, Д.В. Некоторые аспекты обеспечения безопасности длительных космических полетов / Д.В. Литвина // МНИ «СФИПИ», 2016. – №4(23). – С. 88–94.
38. Лукьященко, В.И. Концепция развития пилотируемой космонавтики России на период до 2040–2050 гг. / В.И. Лукьященко, В.В. Борисов, В.В. Суворов // Шестая международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос», сборник тезисов. – Звездный городок, Московская обл., РФ. – 2005. – С. 7–8.
39. Математические методы. Распознавание образов: курс лекций / А.Е. Лепский, А.Г. Броневиц. – Таганрог, 2009. – 155 с.
40. Мясников, В.И. Предварительные результаты психического анализа коммуникаций экипажей международной космической станции / В.И. Мясников, В.И. Гуцин, А.К. Юсупова // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2005. – №1. – С. 112–118.
41. Мясников, В.И. Проблема психической астенизации в длительном космическом полете / В.И. Мясников, С.И. Степанова, В.П. Сальницкий и др. – М.: Слово, 2000. – 224 с.
42. Непопалов, В.Н. Психология деятельности в экстремальных условиях / В.Н. Непопалов, В.Ф. Сопов, А.В. Родионов и др. – Под ред. Блеер А.Н. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 256 с.
43. Новиков, Д.Б. Роль системы поддержки принятия решений «Медицинские параметры человека в условиях длительной изоляции» в определении качества жизни на изолированных объектах / Д.Б. Новиков // Качество и жизнь. – 2007. – Альманах. – С. 526–530.
44. Общая психология: Учебник / под общ. ред. проф. Л.В. Карпова. – М.: Гардарики, 2005. – 232 с.

45. Овчаров, В.Е. «Человеческий фактор» в авиационных происшествиях: методические материалы / В.Е. Овчаров. – Москва: ООО «Полиграф», 2005. – 79 с.
46. Орлов, А.И. Прикладная статистика / А.И. Орлов. – М.: Издательство «Экзамен», 2004. – 656 с.
47. Островский, О.В. Лабораторные маркеры повреждения миокарда в современной кардиологии / О.В. Островский, В.В. Ткачева, В.О. Островская // Спецвыпуск ЛАБОРАТОРИЯ, 2013. – №2. – С. 31–36.
48. Парин, В.В. Космическая кардиология / В.В. Парин, Р.М. Баевский, Ю.Н. Волков. – Л.: Медицина, 1967. – 206 с.
49. Парин, В.В., Космическая биология и медицина / В.В. Парин, Ф.П. Космолинский, Б.А. Душков. – 2-е изд., исправ. и доп. – Москва: Просвещение, 1975. – 223 с.
50. Пономарева, Н. Врачи для Арктики [Электронный ресурс] / Н. Пономарева // 06.02.2015 17:50, Интерфакс Россия. – Режим доступа: <http://www.interfax-russia.ru/Siberia/view.asp?id=580496>.
51. Романенко, А.В. Логистическая регрессия, Молодежь и наука: сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского [Электронный ресурс] – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2012. – Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section21.html>.
52. Спиридонов, И.Н. Методы и алгоритмы вычислительной диагностики: учебное пособие по курсу «Автоматизированная обработка экспериментальных данных» / И.Н. Спиридонов, А.В. Самородов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 50 с.
53. Строгонова, Л.Б. Лунная база, проблемы обитаемости [Электронный ресурс] / Л.Б. Строгонова, В.А. Столярчук, С.М. Макарова, Ю.А. Васин // Труды МАИ. – 2013. – №67. – Режим доступа: <https://www.mai.ru/upload/iblock/9bc/9bc8fbdeef4397473356e68893bbaf68.pdf>.
54. Строгонова, Л.Б. Медицинский контроль состояния жидких сред организма человека в экстремальных условиях космического полета: автореф. дис. д-ра тех. наук: 05.26.02, 14.00.32. / Строгонова Любовь Борисовна. – Москва, 2002. – 50 с.
55. Ушаков, И.Б. Основные результаты психофизиологических исследований в эксперименте «Марс-500» / И.Б. Ушаков, Б.В. Моруков, Ю.А. Бубеев, В.И. Гуцин, Г.Ю. Васильева, А.Г. Виноходова, Д.М. Швед // Вестник российской академии наук. – 2014. – Том 84, №3. – С. 18–27.

56. Ушакова, Т.Н. Речь человека в общении / Т.Н. Ушакова, Н.Д. Павлова, И.А. Зачесова. – М.: Наука, 1989. – 192 с.
57. Факторы космического полета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gctc.ru/main.php?id=940>.
58. Шитиков, В.К. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг, Т.Д. Зинченко. – Тольятти: ИЮВБ РАН, 2003. – 463 с.