

УДК 629.78,614.7

МОНИТОРИНГ СОСТАВА ВОЗДУХА И ВОДЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ

© 2020 г. Г. Ю. Григорьев¹, А. С. Лагутин¹, *, Ш. Ш. Набиев¹, А. А. Васильев¹, О. И. Орлов²,
Л. Н. Мухамедиева², Ю. Е. Синяк², А. А. Пахомова², А. В. Родин³, В. М. Семенов^{1,3},
С. В. Малашевич³, Б. К. Зуев⁴, В. А. Филоненко⁴, Д. О. Кирсанов⁵, Д. Б. Ставровский^{1,6}

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия

²Институт медико-биологических проблем РАН, г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

⁴Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

⁶Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия

*Lagutin_AS@nrcki.ru

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

После доработки 18.06.2018 г.

Принята к публикации 20.09.2018 г.

Обоснованы концепция и стратегия мониторинга химического состава атмосферы и качества оборотной воды пилотируемых космических аппаратов, которая может быть использована при осуществлении длительных и межпланетных полетов. Сформулированы основные факторы риска изменения состава атмосферы и состава оборотной воды при межпланетных космических полетах. Описан перспективный вариант аналитического комплекса для оперативного контроля качества воздуха и воды на пилотируемых космических аппаратах, учитывающий эти факторы риска. Предложено одновременное использование в этом комплексе нескольких методов газового анализа с целью обеспечить частичное перекрытие номенклатуры детектируемых веществ по особо важным (критичным) веществам. Мониторинг качества оборотной воды в комплексе осуществляется двумя приборами: для измерения содержания суммарного углерода и анализа ионного состава воды.

DOI: 10.31857/S0023420620010021

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время основной долгосрочной целью NASA в области изучения и освоения дальнего космоса является осуществление пилотируемых экспедиций на Марс. Роскосмос на ближайшие 10–15 лет пилотируемые полеты на Марс не планирует, рассматривая в качестве основной цели пилотируемые миссии на поверхность Луны: вначале это будет околорунная станция на низкой орбите, а потом станция на Луне.

Несмотря на различие приоритетов, большое внимание следует уделить работам в области создания автоматической системы оперативного контроля и управления качеством среды обитания. На борту будущих обитаемых объектов необходимо создать систему анализа физико-химических показателей атмосферы, воды, пищи, интерьера, а также технического состояния технологических узлов и агрегатов, составляющих общую систему жизнеобеспечения.¹ В настоящее время разработка вари-

антов построения систем экологического контроля и жизнеобеспечения на пилотируемых космических кораблях проводится очень интенсивно [1–8].

В частности, НАСА в рамках государственно-частного партнерства успешно реализует программу Next Space Technologies for Exploration Partnerships (NextSTEP), нацеленную на поэтапную разработку систем жизнеобеспечения для дальних космических полетов. Компания UTC Aerospace Systems завершила первую фазу NextSTEP, проведя предварительные исследования по разработке системы универсального экологического контроля и системы жизнеобеспечения (ECLSS) для проектирования среды обитания при длительных космических полетах [9]. Ключевыми результатами первой фазы стали предложения по базовым технологиям NextSTEP, разработка исходных требований безопасности, а также проработка модульного (паллетного) построения системы жизнеобеспечения (СЖО) с определением возможности по ее техническому обслуживанию в полете.

Вторая фаза реализации программы NextSTEP, началась в мае 2017 г. Она представляет со-

¹Синяк Ю.Е. Системы жизнеобеспечения обитаемых космических объектов // www.imbp.ru/webpages/win1251/Science/UchSov/Docl/2008/Sinjak_speech.html

бой, по сути, резкий поворот от разработки систем контроля за состоянием окружающей среды и жизнеобеспечения в глубоком космосе (ECLS) к начальному дизайну СЖО (ECLSS) для окололунных миссий. Это предполагает переход к разработке интегрированной архитектуры управления, разработке стандартов СЖО и интерфейса среды обитания, создание прототипа действующей системы регенерации воздуха. В завершение запланировано создание полного комплекта ECLS, включающего демонстрационные паллеты СЖО и интеллектуальную систему прогностического управления здоровьем экипажа.

Существующий комплекс систем жизнеобеспечения Российского сегмента *МКС* обеспечивает только частичную регенерацию воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности человека. В работе [10] обоснован метод выбора комплекса систем жизнеобеспечения с повышенной степенью регенерации воды и кислорода из продуктов жизнедеятельности космонавтов на основе переменной массы доставляемого оборудования для последующей стадии развития *МКС*.

Целями настоящей работы является определение основных факторов риска, влияющих на номенклатуру и количественный состав химических веществ, загрязняющих воздушную среду пилотируемых космических аппаратов (ПКА), состав оборотной воды при межпланетных космических полетах и описание перспективного варианта модулей СЖО для мониторинга газовой среды и качества оборотной воды. Исследования по данным направлениям были начаты авторами работы в начале 2016 г. в инициативном порядке и базируются на оригинальных российских разработках.

КОНЦЕПЦИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ВОЗДУХА

Теоретическую основу концепции санитарно-гигиенического обеспечения безопасности человека при освоении дальнего космоса в системе “здоровье космонавта—среда обитания” составляет определение факторов, негативно влияющих на формирование многокомпонентного химического состава воздушной среды, и причинно-следственных связей, определяющих риск причинения ущерба здоровью космонавтов. Выделение летучих органических соединений (ЛОС) происходит на ПКА вследствие процессов деструкции и старения полимеров при воздействии термических, световых, радиационных и других факторов среды. Поэтому одним из приоритетных направлений является создание медицинской технологии оперативного управления качеством воздуха ПКА по химическому фактору, объединяющей методологию оценки рисков интоксикации для человека и режимы эффективной

работы систем очистки и регенерации воздушной среды ПКА [11, 12]. Важным этапом решения проблемы является определение стратегии мониторинга и разработка средств анализа химического состава воздушной среды ПКА для получения фактических данных мониторинга в режиме реального времени [13].

Основные факторы, определяющие химический состав воздушной среды ПКА:

1. Полимерные конструкционные материалы, санитарно-гигиенические мероприятия.

2. Старение (деструкция) матрицы полимерных материалов с выделением в воздушную среду ПКА высокотоксичных мономерных остатков макромолекул (цианиды, амиды, фураны, полиароматические углеводороды), либо веществ, имеющих ненасыщенные связи — диолефины, низкомолекулярные жирные кислоты и насыщенные альдегиды.

3. Трансформация химических соединений с образованием вторичных, в основном более токсичных, летучих органических соединений вследствие процессов каталитического окисления в системах очистки и регенерации воздушной среды.

4. Метаболизм человека и организмов, входящих в экологическую замкнутую систему (человек—микроорганизмы—растения).

Следует отметить, что роль человека в загрязнении воздушной среды ПКА, определяется, в основном, накоплением диоксида углерода и метана, поддержание концентраций которых в пределах нормативных требований эффективно осуществляется системами очистки и регенерации воздушной среды [12, 14].

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПКА

Многолетняя эксплуатация *МКС* дала возможность установить основные закономерности формирования динамичной и многокомпонентной по номенклатуре и концентрациям ЛОС воздушной среды долговременных орбитальных станций (рис. 1 и 2) [15]. Мониторинг химического состава воздушной среды орбитальных станций *Мир* и *МКС* показал, что по мере увеличения длительности эксплуатации наблюдается расширение спектра токсикологически значимых ЛОС, что обусловлено увеличением насыщенности станций полимерами [12, 15, 16].

Летучие и среднелетучие органические соединения формируют сложную многокомпонентную смесь, представленную различными классами химических соединений, в составе которой лидирующая роль принадлежит предельным, непредельным и ароматическим углеводородам, спиртам, альдегидам, фталатам, кетонам, эфирам, кремнийорганическим соединениям. Анализ взаимо-

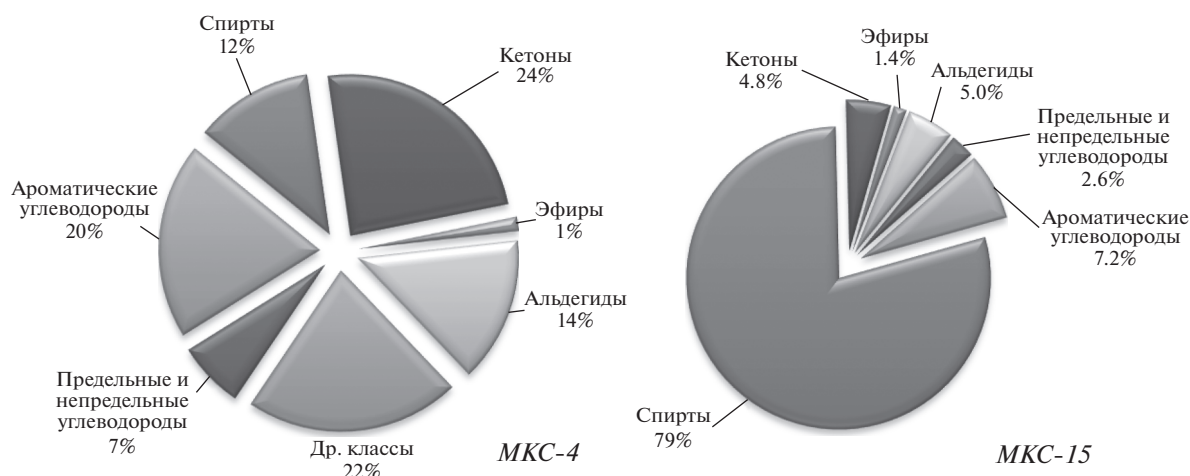


Рис. 1. Динамика химического состава воздуха на начальных этапах эксплуатации МКС (экспедиция МКС-4: 5.XII.2001–19.VI.2002, экспедиция МКС-15: 7.IV–21.X.2007 г.).

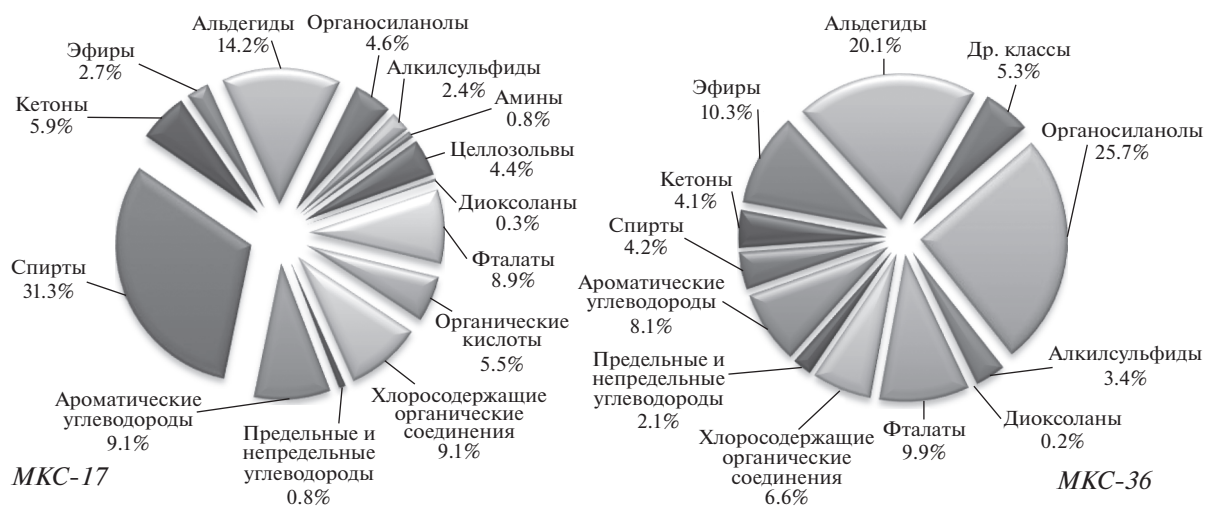


Рис. 2. Динамика химического состава воздуха на промежуточных этапах эксплуатации МКС (экспедиция МКС-17: 8.IV–24.X.2008 г., экспедиция МКС-36: 14.V–11.IX.2013 г.).

связи ЛОС в воздушной среде и длительности эксплуатации МКС показал статистически значимую положительную связь (коэффициент Спирмена $r = 0.89$ при $p < 0.01$), что позволило спрогнозировать дальнейшее расширение спектра загрязняющих веществ по мере увеличения длительности полета МКС [14, 15].

Другим неблагоприятным фактором является увеличение концентрации водорастворимых соединений, в частности, кремнийорганических веществ, таких как диметилсиландиол, степень поглощения которого конденсатом атмосферной влаги достигает до 96%, а также спиртов. Водорастворимые соединения в конденсате атмосферной

влаги были обнаружены при проведении ремонтных работ в американском сегменте (АС), когда концентрации полисилоксанов в воздухе станции возросли значительно (см. рис. 3).

СТРАТЕГИЯ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА

В настоящее время стратегия мониторинга химического состава воздушной среды МКС предусматривает получение максимально возможного объема информации в режиме реального времени по телеметрии с использованием автоматических электрохимических и фотоколориметрических газоанализаторов. Существующими средствами мо-

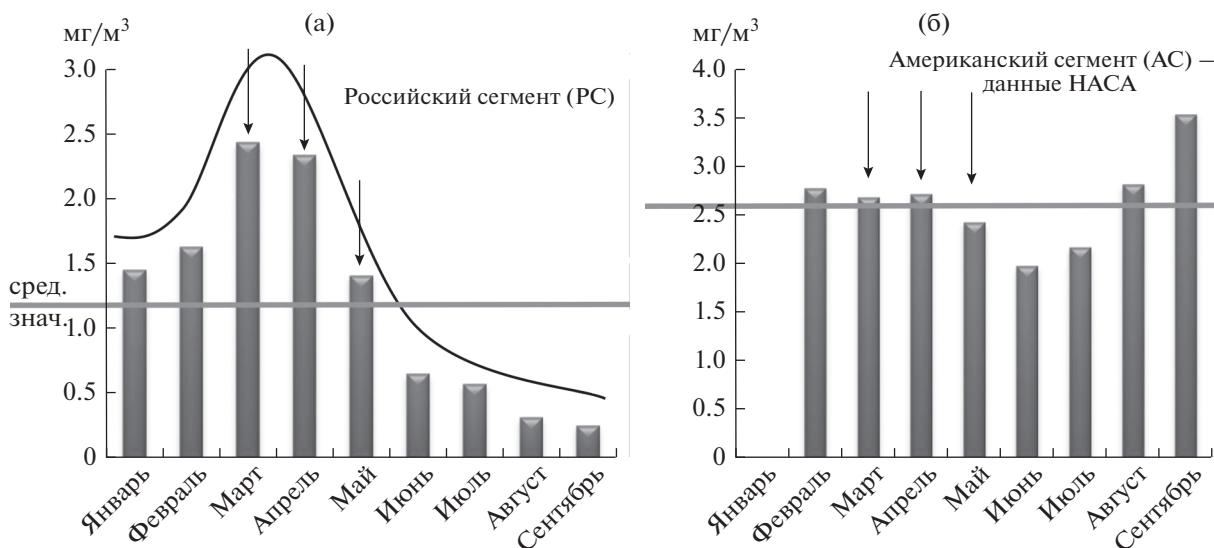


Рис. 3. Динамика концентраций полисилоксанов в воздушной среде в период ремонтных работ американской системы удаления CO₂ (CDRA) (2013 г.). Стрелками указаны моменты проведения ремонтных работ на CDRA.

мониторинга обеспечивается идентификация спектра химических веществ, необходимого для оценки качества воздушной среды МКС согласно требованиям нормативных документов [17, 18] и SSP50260 ISS MORD (Medical Operations Requirements Document for International Space Station, NASA, ISSP Johnson Space Center, USA, 2006).

Периодический наземный контроль летучих органических соединений при орбитальных полетах проводится путем анализа проб воздуха, доставляемых в сорбентных пробозаборниках на Землю, с последующим анализом методом хромато-масс-спектрометрии – ХМС (отсроченные данные). Анализ отсроченных данных методом ХМС дает необходимую информацию о количественном и качественном составе ЛОС, уровне суммарной загрязненности воздушной среды, но не позволяет оперативно в реальном времени проводить токсиколого-гигиеническую оценку риска для здоровья человека воздействия химических веществ при штатном функционировании СЖО и уровне загрязнения среды ЛОС при возникновении нештатных ситуаций [19].

Стратегия мониторинга химического состава воздушной среды длительных и межпланетных экспедиций определяет необходимость осуществления непрерывного, динамического контроля содержания ЛОС и неорганических веществ в воздушной среде ПКА в реальном масштабе времени. Это необходимо для принятия оптимальных медико-технических управленческих решений, направленных на контроль безопасности среды и обеспечение сохранения работоспособности экипажа и корректировку эффективности работы систем жизнеобеспечения.

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ОРБИТАЛЬНЫХ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПОЛЕТАХ

В условиях длительных орбитальных и межпланетных полетах водообеспечение экипажей будет осуществляться в основном на процессах регенерации воды из влагосодержащих продуктов жизнедеятельности космонавтов: мочи, конденсата атмосферной влаги, санитарно-гигиенических, а также технологических вод и отходов биологических систем жизнеобеспечения.

Впервые полный круговорот воды в ограниченном замкнутом пространстве был реализован в годовом медико-техническом эксперименте в ИМБП РАН в 1967 г., в котором трое испытателей врач Г.А. Мановцев, биолог А.Н. Божко и техник Б.Н. Улыбышев в течение года употребляли воду, регенерированную из их продуктов жизнедеятельности [20].

На космической станции *Мир* функционировали системы регенерации воды из мочи (“СРВ-У”) и конденсата атмосферной влаги (“СРВ-К”). Качество регенерированной воды оценивалось в земных лабораториях, используя пробы воды, доставленные с борта космической станции. Аналитическая автоматическая аппаратура для мониторинга в реальном времени качества питьевой воды из запаса и питьевой регенерированной воды, включая микробиологический анализ, требует разработки.

Следует подчеркнуть, что необходимость внедрения средств мониторинга качества воды при длительных орбитальных полетах диктуется тем, что время от отбора проб воды космонавтами до проведения анализов в земных условиях составляет до двух недель и более, тогда как применение

данной технологии для межпланетных полетов практически исключает проведение оперативного контроля качества воды.

При создании системы мониторинга качества воды при длительных орбитальных и межпланетных полетах необходимо ориентироваться на рекомендации, представленные в документе [17], где даны показатели оперативного контроля качества воды на борту ПКА. Важнейшими из них являются:

1. содержание органического углерода, азота аммиака, ионного серебра, микроорганизмов, обладающих признаками патогенности, этанола;

2. удельная электропроводность, водородный показатель (рН), запах и привкус. Средства контроля качества воды на ПКА, рассмотренные ниже, охватывают, в основном, только первую группу показателей.

ОБОСНОВАНИЕ И СОСТАВ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА

Авторским коллективом данной работы был проведен анализ научной литературы, касающейся современных разработок и испытаний в летных условиях газоаналитической аппаратуры ПКА. В частности, были изучены все материалы конференций серии International Conference on Environmental Systems за период 2013–2017 гг., поскольку именно на данных форумах обсуждались новейшие разработки газоанализаторов, применимых в условиях космических полетов.

Критическая оценка уровня имеющихся современных зарубежных разработок позволила обосновать выбор направлений для перспективных отечественных разработок, научно-технический задел по которым не уступает, а по некоторым направлениям и превосходит зарубежные достижения. Основные положения обоснования состава средств мониторинга:

1. Использование фурье-спектрометра для анализа состава атмосферы космического аппарата [8] не является рациональным. Имеющиеся ограничения по массе и габаритам такого прибора не позволяют обеспечить спектральное разрешение $<0.1 \text{ см}^{-1}$, что необходимо для выявления особенностей в спектрах веществ, которые надо регистрировать в воздушной среде ПКА.

2. Не менее существенным ограничением метода фурье-спектроскопии являются высокие требования к механической стабильности интерферометра прибора. Эта причина, по всей видимости, обуславливает такие проблемы прибора АНПА как неожиданно высокий уровень шумов, наличие спектральных артефактов, а также деградацию аппаратной функции прибора [21]. Помимо этого, согласно нашим оценкам, с помощью фурье-спектрометра невозможно достигнуть не-

обходимого уровня пределов обнаружения многих газов-аналитов (см. рис. 4).

3. Для корректного решения обратной задачи – определения вкладов компонентов в газовой смеси в получаемый спектр поглощения – предусматривается использование двух лазерных спектрометров ближнего и среднего ИК диапазонов с целью охвата до 30 газовых компонент не одним, а двумя приборами.

4. Использование спектрометров на основе диодных лазеров позволит на 2–3 порядка увеличить спектральное разрешение при регистрации отдельных компонент внутренней атмосферы ПКА при более выгодных массогабаритных параметрах прибора. Кроме того, лазерные спектрометры значительно более устойчивы к вибрациям, что подтверждается их успешной эксплуатацией, например, в ходе работы марсохода Curiosity [22].

5. Контроль оборотной воды на содержание суммарного углерода целесообразно проводить с помощью окситермографа, являющегося оригинальной отечественной разработкой [23].

6. Наиболее привлекательным вариантом для контроля ионного состава оборотной воды является использование потенциометрических мультисенсорных систем типа “электронный язык”. В этой области аналитической химии российские ученые занимают лидирующие позиции [24, 25].

7. Постоянный мониторинг состава атмосферы в штатных и нештатных ситуациях, что необходимо для оперативного принятия медико-технических мероприятий для обеспечения безопасности экипажа, лучше всего проводить с помощью химических интеллектуальных сенсоров. Эти устройства представляют собой законченные газоаналитические приборы с цифровым выходом, а также с самоконтролем функционирования и не требующие “перекалибровки”, что очень важно в условиях ПКА.

Предлагаемые к разработке средства мониторинга химического состава атмосферы и воды на борту ПКА содержат следующие компоненты: анализатор органических примесей в воде; анализатор неорганических примесей в воде; лазерный газоанализатор среднего ИК-диапазона для детектирования тяжелых микропримесей; лазерный газоанализатор ближнего ИК-диапазона для детектирования легких микропримесей (для штатной и нештатной ситуаций); портативный сенсорный анализатор основных газов для штатной ситуации; портативный сенсорный анализатор для нештатных ситуаций; информационная система, позволяющая контролировать работу всех составляющих комплекса, как в постоянном режиме, так и в режиме срочного оповещения (alarm system).

Определение содержания суммарного углерода. В институте геохимии и аналитической химии

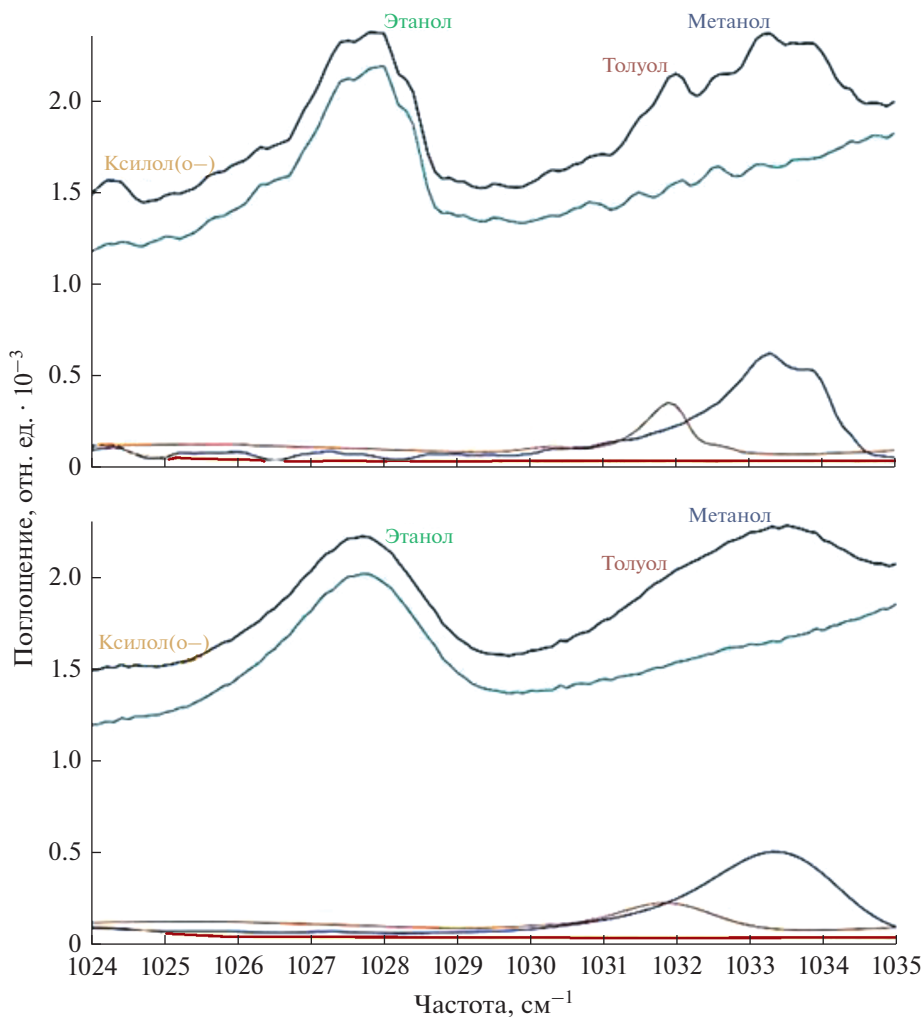


Рис. 4. Модельные спектры этанола, метанола, ксилола и толуола, а также результирующий спектр их смеси на уровне ПДК. Сверху – спектры, полученные при высоком спектральном разрешении ($<0.1 \text{ см}^{-1}$), снизу – спектры, полученные с низким спектральным разрешением. Регистрация паров ксилола и толуола в последнем случае существенно затруднена.

РАН им. В.И. Вернадского предложен и разработан новый метод анализа – окситермография, основанный на программированном нагреве анализируемого образца в потоке газа (кислород-инертный газ) и регистрации прореагировавшего или выделенного кислорода, а также других газообразных продуктов, в процессе нагрева [23, 26]. Данный метод позволяет быстро (в течение 1–2 мин) определять наличие органического вещества в водных средах (аналог ХПК – химического поглощения кислорода), определять состав пленок нефти и нефтепродуктов на поверхности воды, содержание органики в грунтах, оценивать “жирность кожи” человека и др. [27].

В приборе, использующим такой метод анализа – окситермографе, определение термического потребления кислорода происходит путем окисления пробы в потоке воздуха или инертного газа

с контролируемой концентрацией кислорода. Анализируемый образец подается в высокотемпературный реактор, через который прокачивается смесь газа с заранее заданным парциальным давлением кислорода. На выходе из реактора ставится датчик (сенсор) кислорода, который непрерывно контролирует содержание кислорода, выходящего из реактора. На графике зависимости концентрации кислорода от времени появляется отрицательный пик, который характеризует количество кислорода, затраченного на окисление веществ, находящихся в образце. Дооснащение окситермографа датчиком CO_2 дает возможность проводить и измерения общего углерода, а надлежащий выбор диапазона температурного сканирования позволяет определять содержание определенных органических примесей в воде (например, этанола).

Определение ионного состава оборотной воды.

Мультисенсорные системы типа “электронный язык” на основе потенциометрических сенсоров с различными типами чувствительных мембран активно разрабатываются и исследуются уже более 15 лет в Лаборатории химических сенсоров СПбГУ [28].

Мультисенсорная система представляет собой аналитическое устройство, включающее в себя массив (набор) химических сенсоров с относительно невысокой селективностью, обладающих чувствительностью к нескольким компонентам анализируемого раствора одновременно (перекрестной чувствительностью), и использующее соответствующие методы обработки многомерных данных, получаемых от массива сенсоров (методы хемометрики). Такая система при воспроизводимом аналитическом поведении сенсоров и применении адекватного метода многомерной градуировки способна выполнять функции распознавания (идентификации, классификации) разнообразных жидких сред и многокомпонентного количественного определения в этих средах различных неорганических и органических компонентов. Отклик набора перекрестно-чувствительных сенсоров в сложном многокомпонентном растворе представляет собой аналог неразрешенного “электрохимического спектра” образца, в котором присутствует информация о большом числе соединений, содержащихся в анализируемом растворе. Современные методы машинного обучения позволяют эффективно обрабатывать такой отклик и извлекать из него как информацию о количественном содержании отдельных веществ, так и более сложные интегральные характеристики образца, такие, например, как токсичность в шкалах биотестирования [29].

Кроме того, при условиях адекватной градуировки мультисенсорные системы способны прогнозировать ряд органолептических характеристик (вкус и запахи) сложных по составу образцов [30], что открывает возможность заполнения пробела в анализируемых параметрах.

Разработки, проведенные за последнее десятилетие, показали, что при определении индивидуальных ионов в чистых водных растворах с помощью отдельных селективных сенсоров возможно получение надежных данных по концентрациям ионов NH_4^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Ag^+ в рабочем диапазоне ($5 \cdot 10^{-5}$ – 0.1) моль/л.

Газовый мониторинг должен проводиться набором газоанализаторов, использующих различные физические принципы: на лазерах среднего ИК-диапазона — для измерения концентраций тяжелых микропримесей; на лазерах ближнего ИК-диапазона — для измерения концентраций легких микропримесей, паров воды и основных газов при штатных и нештатных ситуациях; хи-

мические сенсорные анализаторы — для измерения легких микропримесей в штатной ситуации и основных газов при нештатных ситуациях (прежде всего, задымлений и пожаров).

Спектрометр среднего ИК-диапазона. Работа прибора основана на принципах лазерной абсорбционной спектроскопии. Основным элементом прибора является перестраиваемый по частоте полупроводниковый квантово-каскадный лазер. Излучение лазера поступает в аналитическую оптическую кювету, содержащую анализируемую газовую смесь. Прошедшее излучение регистрируется фотодетектором. Таким образом, осуществляя сканирование частоты лазера, можно зарегистрировать спектр поглощения с разрешением, определяемым шириной линии генерации лазера, которая существенно меньше 0.1 см^{-1} . С целью снижения пределов обнаружения определяемых веществ целесообразно применение многопроходных оптических кювет.

Спектры поглощения большинства тяжелых органических соединений, имеют интенсивные фундаментальные полосы поглощения в среднем ИК-диапазоне (7–12 мкм), который долгое время в связи с отсутствием высокоэффективных источников и приемников излучения считался “мертвым диапазоном” и крайне редко использовался для решения прикладных задач. В настоящее время в этом диапазоне появились коммерчески доступные квантово-каскадные лазеры, генерирующие излучение мощностью в десятки и сотни мВт и функционирующие при комнатной температуре. Большой прогресс произошел и в технологии получения полупроводниковых детекторов излучения, например, на основе соединений кадмий–ртуть–теллур, что позволило создавать компактные приемные модули с термоэлектрическим охлаждением. Перечисленные особенности позволяют создавать компактные спектрометры весом не более 10 кг и энергопотреблением в несколько десятков Вт, что является важным аргументом в пользу применения их на ПКА.

Регистрация тяжелых органических соединений требует широкой области частотной перестройки лазера. Для обеспечения перестройки в широком диапазоне спектра частот (до 400 см^{-1}) в настоящее время применяются квантово-каскадные лазеры с внешним резонатором, вторым зеркалом которой является дифракционная решетка. Поворот дифракционной решетки позволяет сканировать частоту генерации лазера в пределах контура усиления.

Примерный набор веществ, детектируемых лазерным спектрометром среднего ИК-диапазона таков: ксилолы, стирол, изопропилбензол, этилацетат, полиметилсилоксаны, дихлорметан, 1,2-дихлорэтан, метилэтилкетон, 2-пропанол, 1-бутанол, ацетальдегид, бензальдегид, бензол, толуол, аце-

тон. Следует отметить, что использование лазерной спектроскопии на основе квантово-каскадных лазеров для мониторинга внутренней атмосферы космического аппарата уже предлагалось ранее [31, 32]. Использование метода лазерной оптико-акустической спектроскопии в данном приборе позволяет достичь исключительно высокой чувствительности по концентрации. Однако это создает проблемы при регистрации соединений в сложной газовой смеси из-за нелинейности процессов релаксации возбужденных лазером молекул, и, как следствие, представляет препятствие для точного определения концентрации отдельных компонент. На наш взгляд, использование методов прямого поглощения более предпочтительно для решения поставленной задачи.

Лазерный спектрометр ближнего ИК-диапазона. Создание малогабаритных источников излучения с низким энергопотреблением (диодных лазеров с волоконным выводом излучения) позволило вывести решение проблемы измерения концентрации легких газов в атмосфере методами диодной лазерной спектроскопии^{2, 3, 4} на качественно новый уровень [33–37].

Предлагаемая к разработке газоаналитическая система с использованием диодных лазеров (ДЛ) обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с существующими международными аналогами. Система многокомпонентная, она включает в себя несколько ДЛ (более 4 источников), работающих на длинах волн, оптимальных для регистрации выбранных газов. Измерения могут производиться как одновременно всеми лазерами, так и последовательно (мультиплексно), обеспечивая минимальный уровень энергопотребления.

Газовая кювета, где производятся измерения – это многопроходная кювета Эррио, наиболее помехо- и виброустойчивая среди известных многоходовых оптических систем [36, 47] оптимальная по оптической длине и обеспечивающая измерение следовых количеств измеряемых газов.

Назначение лазерного спектрометра ближнего ИК-диапазона – это мониторинг основных газов штатной ситуации и пожарных маркеров. Примерный набор веществ, детектируемых таким прибором: метанол, формальдегид, аммиак, ди-

оксид углерода, пары воды, оксид углерода, метан, фтористый водород, хлористый водород, цианистый водород.

Химические сенсорные анализаторы. Портативные газоанализаторы, сконструированные на базе интеллектуальных газовых сенсоров с цифровым выходом и самоконтролем функционирования, представляют несомненный интерес для обеспечения безопасности при длительных полетах. Применение таких сенсоров, использующих различные физические принципы (каталитические, оптические, потенциометрические и т.д.) дает возможность полностью избавиться от необходимости калибровки аппаратуры на борту космических аппаратов, поскольку интеллектуальные сенсоры после калибровки на Земле не требуют дальнейшей калибровки и сами отслеживают свою работоспособность. Более того, конструкция портативных газоанализаторов позволяет оперативно осуществлять замену химических сенсоров из ЗИПа на ПКА.

В случае необходимости селективного обнаружения определенного газа в смеси различных газов в последнее время в мировой практике достаточно широко практикуется подход, основанный на применении нейросетевого программирования. В отличие от традиционных сенсорных систем, требующих высокоселективных чувствительных элементов, данный подход использует набор относительно неселективных сенсоров.

Мультисенсорная система должна быть составлена из индивидуального набора сенсоров. Сенсоры в матрице должны различаться по своим основным параметрам (чувствительность, селективность), число их может колебаться от единиц до нескольких десятков в зависимости от назначения и технических возможностей. Принцип работы системы основан на измерении электропроводности химических сенсоров при их взаимодействии с газами-аналитами. В результате адсорбции молекул исследуемого газа электропроводность чувствительных слоев сенсоров изменяется. Каждый сенсор не является строго селективным по отношению к какому-либо газу. Однако величина отклика каждого сенсора из набора индивидуальна для каждого анализируемого газа. Это может достигаться выбором материала чувствительного слоя сенсора и/или подбором его рабочей температуры.

Математическая обработка данных сенсорных откликов с использованием методов нейросетевого программирования позволяет сформировать индивидуальный “образ” анализируемого газа. Уникальный образ запаха вещества создается в результате использования отличающихся друг от друга чувствительных элементов сенсоров.

Портативный анализатор основных газов для нормальной ситуации на ПКА должен регистри-

² Picarro Inc. Measure nitrous oxide (N₂O), methane (CH₄), carbon dioxide (CO₂), ammonia (NH₃), and water (H₂O). https://www.picarro.com/products_solutions/trace_gas_analyzers/n2o_ch4_co2_nh3_h2o

³ Совместный российско-европейский проект по исследованию Марса с орбиты искусственного спутника и поверхности планеты. ИКИ РАН. <http://exomars.cosmos.ru/>.

⁴ Карабиненко А.А., Солтис С.Ю., Сторожак Г.И. и др. Многокомпонентный диодный лазерный спектроанализатор для скрининговой диагностики содержания биомаркеров в выдыхаемых компонентах воздуха. <http://www.dls.gpi.ru/rus/sem/23/2.pdf>

ровать следующие газы в атмосфере ПКА: O_2 , CO_2 , H_2 , H_2O , CH_4 , NH_3 . Различные варианты сенсоров на данную группу газов описаны во множестве работ (например, [38–44]).

Достоверным способом обнаружения пожара на ранней стадии является контроль химического состава воздуха, резко изменяющегося из-за термического разложения (пиролиза) перегретых и начинающих тлеть горючих материалов, и в большинстве случаев можно уверенно выделить основные газы-аналиты: CO , NO , HF , HCl [45]. Детектирование данных газовых компонент в атмосфере ПКА является задачей, которую должны выполнять портативные анализаторы для нештатных ситуаций.

Сравнительные испытания пожарных извещателей различного типа, проведенные в стандартных огневых камерах ВНИИПО МЧС в 2012–2014 гг. однозначно подтвердили преимущество полупроводниковых газовых пожарных детекторов по сравнению другими типами пожарных сигнализаторов [46].

Информационная система верхнего уровня. Назначением этой составляющей комплекса аналитических средств является отслеживание соответствия показаний газоаналитических измерительных систем установленным пределам, формирование сигнализации в случае выявления отклонений за эти пределы и выдача первичных рекомендаций по реакции на каждое конкретное отклонение.

Программная часть системы должна использовать кросс-платформенный, интуитивно понятный пользовательский интерфейс, позволяющий производить настройку и расширение системы. База данных информационной системы должна содержать предустановленные параметры отслеживаемых устройств и рекомендации по реакциям для персонала ПКА в случае сигнализации о выходе параметров за заданные пределы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснована концепция мониторинга химического состава атмосферы и качества оборотной воды пилотируемых космических аппаратов, которая может быть использована при длительных полетах. Сформулированы основные факторы риска изменения состава атмосферы и состава оборотной воды при межпланетных космических полетах.

Предложен примерный состав аппаратно-программного комплекса средств мониторинга качества атмосферы и оборотной воды на ПКА, использование которого в составе СЖО даст возможность оперативно применять медико-технические меры для обеспечения жизнедеятельности экипажей ПКА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stapleton T., Heldmann M., Torres M. et al. Environmental Control and Life Support System Developed for Deep Space Travel // 47th International Conference on Environmental Systems. 2017. Charleston. South Carolina. P. ICES-2017-44.
2. Detrell G., Messerschmid E., Ponsati G. ELISSA – a comprehensive software package for ECLSS technology selection, modelling and simulation for human spaceflight missions // 47th International Conference on Environmental Systems. 2017. Charleston. South Carolina. P. ICES-2017-190.
3. Anderson M., Sargus Singh M. Evolution of Environmental Control and Life Support System Requirements and Assumptions for Future Exploration Missions // 47th International Conference on Environmental Systems. 2017. Charleston. South Carolina. P. ICES-2017-271.
4. Escobar C.M., Nabity J.A. Past, Present, and Future of Closed Human Life Support Ecosystems A Review. // 47th International Conference on Environmental Systems. 2017. Charleston. South Carolina. P. ICES-2017-311.
5. Schneider W.F., Gatens R.L., Anderson M.S. et al. NASA Environmental Control and Life Support Technology Development and Maturation for Exploration: 2015 to 2016 Overview // 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. 2016. Austria. P. ICES-2016-40.
6. Detrell G., Messerschmid E., Ponsati G. ECLSS reliability analysis tool for long duration spaceflight // 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. 2016. Austria. P. ICES-2016-294.
7. Gatens R.L., Anderson M.S., Broy J.L. et al. National Aeronautics and Space Administration Environmental Control and Life Support Technology: Development and Maturation for Exploration: 2014 to 2015 Overview // 45th International Conference on Environmental Systems. 2015. Bellevue. Washington. P. ICES-2015-111.
8. Stuffer T., Hofmann P., Stettner A. et al. ANITA2 Flight Model Development – A status report of the multicomponent ISS Air Analyser // 47th International Conference on Environmental Systems. 2017. Charleston. South Carolina. P. ICES-2017-2.
9. Stapleton T.S., Heldmann M., Schneider S. et al. Environmental Control and Life Support for Deep Space Travel // 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. 2016. Austria. P. ICES-2016-450.
10. Гузенберг А.С., Железняков А.Г., Романов С.Ю. и др. Выбор комплекса жизнеобеспечения для экипажей // Космическая техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 67–80.
11. Мухамедиева Л.Н., Аксель-Рубинштейн В.З., Мукос К.Н. Санитарно-химические и токсикологические исследования воздушной среды орбитальной станции *Mir* // Орбитальная станция *Mir*. Т. 1. М.: Изд-во ООО “Аником”, 2001. С. 158–176.
12. Mukhamedieva L.N., James J.T., Aksel-Rubinstein ZV., Solomin G.I. Toxicology of the International Space Station // Atmosphere Space Biology and Medicine. 2009. V. 5. P. 249–262.

13. Мухамедиева Л.Н., Богомолов В.В. Характеристика токсических рисков загрязнения химическими примесями воздушной среды пилотируемых орбитальных станций // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2009. № 3.С. 17–23.
14. Мухамедиева Л.Н., Гузенберг А.С., Пахомова А.А. и др. Токсикологические аспекты управления качеством воздушной среды орбитальных станций // *Международная космическая станция. Российский сегмент*. Т. 1. Воронеж: Научная книга, 2011. С. 299–315.
15. Пахомова А.А., Озеров Д.С., Царьков Д.С. и др. Мониторинг, особенности формирования и гигиеническая характеристика состава химических веществ в воздушной среде международной космической станции // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 1. С. 58–64.
16. Озеров Д.С., Носовский А.М., Мухамедиева Л.Н. и др. Статистические закономерности распределения концентраций вредных веществ в воздухе пилотируемых орбитальных станций // *Космическая техника и технологии*. 2016. № 1(12). С. 104–111.
17. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. М.: Госстандарт России, 1995. С. 10–27.
18. Гузенберг А.С., Романов С.Ю., Телегин А.А., Юргин А.В. Разработка международного стандарта по системам обеспечения жизнедеятельности в космическом полете // *Космическая техника и технологии*. 2013. № 1. С. 68–80.
19. Баранов В.М., Мухамедиева Л.Н., Аксель-Рубинштейн В.З. и др. Гигиеническое сопровождение нештатных ситуаций, связанных с локальным возгоранием в условиях пилотируемых орбитальных станций // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2001. Т. 35. № 6. С. 13–18.
20. Божко А.Н., Горюшин В.С. Год в “Звездолете”. М.: Молодая гвардия, 1975. С. 40.
21. Stuffer T., Gutruf S., Nader K. et al. Progress in ANITA2, the Upcoming High Performance ISS Air Monitor for Continuous In-Orbit Operation // 44th International Conference on Environmental Systems. 2014. Tucson. Arizona. P. ICES-2014-68.
22. Mahaffy P.R., Cabane M., Webster C.R. et al. Curiosity’s Sample Analysis at Mars (SAM) Investigation: Overview of Results from the First 120 Sols on Mars // The 44th Lunar and Planetary Science Conference. 2013. The Woodlands. Texas. USA.
23. Зуев Б.К. Способ и устройство для определения концентрации органических веществ в жидкой пробе. Патент РФ № 2166753. Опубликовано 10.05.2001.
24. Задорожная О.А., Кирсанов Д.О., Власов Ю.Г. и др. Определение интегральной токсичности воды в терминах биотестирования с помощью мультисенсорной системы, чувствительной к индивидуальным токсикантам // *Журн. прикладной химии*. 2014. № 87. Вып. 4. С. 416–423.
25. Khaydukova M.M., Medina-Plaza C., Rodriguez-Mendez M.L. et al. Multivariate calibration transfer between two different types of multisensor systems // *Sensors and Actuators*. В: Chemical. 2017. № 246. P. 994–1000.
26. Зуев Б.К. Способ окситермографии. Патент РФ № 2411509. Опубликовано 10.02.2011.
27. Rogovaya I.V., Zuev B.K., Titova T.V. et al. Optimization of conditions for the determination of the organic matter content of waters by reagentless oxythermography and its applications of natural waters // *J. Analytical Chemistry*. 2016. V. 71. № 10. P. 1022–1027.
28. Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Электронный язык – системы химических сенсоров для анализа водных сред // *Российский химический журнал*. 2008. Т. LII. Вып. 2. С. 101–112.
29. Kirsanov D., Legin E., Zagrebina A. et al. Mimicking Daphnia magna bioassay performance by an electronic tongue for urban water quality control // *Analytica Chimica Acta*. 2014. № 24. P. 64–70.
30. Kirsanov D., Kilmartin P., Legin A. et al. Towards reliable estimation of an electronic tongue predictive ability from PLS regression models in wine analysis // *Talanta*. 2012. № 90. P. 109–116.
31. Zhou Jianfa, Meng Gui, Zheng Yi et al. Advanced Photoacoustic Spectrometer for Air Monitoring in Manned Spacecraft // 45th International Conference on Environmental Systems. 2015. Bellevue. Washington. P. ICES-2015-333.
32. Zhao Hanqing, Yang Xiantao, Meng Gui et al. Experimental Analysis of Multi-trace Gas Analyser based on Photoacoustic Spectroscopy for Manned Space Craft // 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. 2016. Austria. P. ICES-2016-235.
33. Григорьев Г.Ю., Набиев Ш.Ш., Надеждинский А.И. и др. Высокочувствительный метод детектирования ¹³CO₂ в атмосфере на основе принципов диодной лазерной спектроскопии и многопроходной системы Эррио // *Перспективные материалы*. 2010. С. 69–74.
34. Grigoriev G., Nabiev Sh., Malyugin S. et al. Remote detection of HF Molecules in open atmosphere with the use of tunable diode lasers // *Appl. Phys. B. Lasers and Optics*. 2010. V. 101. № 3. P. 683–688.
35. Briggs R.M., Fradet M., Frez C. et al. Compact Multi-Channel Infrared Laser Absorption Spectrometer for Spacecraft Fire Safety Monitoring // 46th International Conference on Environmental Systems. Vienna. 2016. Austria. P. ICES-2016-283.
36. Nabiev Sh.Sh., Palkina L.A. Current trends in the development of methods of remote detection of explosives and toxic chemicals. *Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Monitoring, and Ball Lightning, Physics of Earth and Space Environment* / Eds. Golubkov G.V., Nikitin A.I., Bychkov V.L. Berlin-Heidelberg: Springer, 2014. P. 113–200.
37. Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я. Работы по аналитическому использованию диодной лазерной спектроскопии в институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН // *Журн. аналитической химии*. 2018. Т. 73. № 2. С. 153–158.
38. Maksudul M., Mushfiq M., Sampathk U. et al. Detecting CO₂ Using Nanowire Chemiresistive Sensor for Monitoring Air Quality in Enclosed Space Habitat // 44th International Conference on Environmental Systems. 2014. Tucson. Arizona. P. ICES-2014-044.

39. *Johnson L.B.* Commercial Non-Dispersive Infrared Spectroscopy Sensors for Sub-Ambient Carbon Dioxide Detection // NASA Tech Briefs. October 2014. P. 6.
40. *Moos R., Noriya Izu, Rettig F. et al.* Resistive Oxygen Gas Sensors for Harsh Environments // Sensors. 2011. P. 3439–3465.
41. *M'Sadoques G., Makel D.* Flight Hydrogen Sensor for Use in the ISS Oxygen Generation Assembly // SAE Technical Paper 2005-01-2870. 2005.
42. *Samotaev N.N., Podlepetsky B.I., Vasiliev A.A. et al.* Metal-oxide gas sensor high-selective to ammonia // Automation and remote control. 2013. V. 74. № 2. P. 308–312.
43. *Samotaev N.N., Podlepetsky B.I., Vasiliev A.A. et al.* The mechanism of the formation of selective response of semiconductor gas sensor in mixture of $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{CO}$ with air // Sensors and actuators B: Chemical. 2007. V. 127. № 1. P. 342–347.
44. *Farahani H., Wagiran R., Hamidon M.N.* Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review // Sensors. 2014. P. 7881–7939.
45. *Федоров А.В., Членов А.Н., Лукьянченко А.А. и др.* Системы и технические средства раннего обнаружения пожара. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. С. 156.
46. *Vasiliev A.A., Grigoriev G.Y., Lagutin A.S. et al.* Contemporary technologies of early detection of fire in space vehicles // Acta Astronautica. 2017. V. 135. P. 76–82.
47. *Чернин С.М.* Многоходовые системы в оптике и спектроскопии. М.: Физматлит, 2010.