

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ: ТЕХНОЛОГИЯ

В.Д. БУРКОВ, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,

Е.Г. КОМАРОВ, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,

В.Ф. КРАПИВИН, проф., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, д-р физ.-мат. наук⁽²⁾,

Ф.А. МКРТЧЯН, проф. ИРЭ РАН, д-р физ.-мат. наук⁽²⁾,

В.Ю. СОЛДАТОВ, науч. сотр. ИРЭ РАН, канд. физ.-мат. наук⁽²⁾

burkov@mgul.ac.ru, vkrapivin_36@mail.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»

141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я институтская, д. 1, МГУЛ

⁽²⁾ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН; 141190 г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского 1

Рассмотрена проблема, связанная с решением многих задач оперативной диагностики жидкостей (включая питьевую воду), медицинских растворов и жидкого топлива. Эта проблема возникает в условиях, когда отсутствует специализированная лаборатория или имеющиеся средства не позволяют оперативно определить качество жидкого раствора. Такие условия могут возникать во время различных экспедиций, например на Марс. Эта статья предлагает новый метод решения этой задачи. Предлагаемый метод состоит в создании базы данных спектральных эталонов жидких растворов, полученных с помощью многоканального спектроэллипсометра и используемых для адаптивного распознавания спектральных образов.

Ключевые слова: питьевая вода, жидкое топливо, диагностика, жидкий раствор, спектроэллипсометр, спектральный образ, распознавание, марсианская миссия

Проблема оценки качества жидких растворов в оперативном режиме возникает во время длительных экспедиций в отдаленные от населенных пунктов регионы. Наиболее характерной ситуацией является планируемая экспедиция на Марс [1].

Так или иначе, полет на Марс человека требует решения многих научно-технических и медицинских задач. Безусловно, одной из важных задач является обеспечение безопасности космонавтов. Сюда входят первостепенные проблемы защиты человека от облучения и обеспечения качественным продовольствием, включая питьевую воду. Наличие пресной воды на Марсе обнаружил американский марсоход «Кьюриосити – Curiosity», который достиг поверхности Марса 6 августа 2012 г.

Добыча питьевой воды на Марсе является также пока только обсуждаемой задачей. Ведь вода здесь находится в замерзшем состоянии в виде ледников на полюсах и прямо под поверхностью. Многие эксперты полагают, что добывать воду можно будет двумя способами: либо выкапывать ее из-под поверхности, а затем вытапливать в печи, либо же подвергать облучению микроволнами почву, извлекая затем водный пар. Так или иначе, затем необходимо оценивать ее качество и определять пригодность для использования в пищу.

Проблема оперативного контроля питьевой воды неизбежно возникает и в период полета в космическом корабле. Наряду с этим в процессе экспедиции будут возникать ситуации, когда необходимо оперативно оценить качество жидких медицинских растворов и жидкого топлива, если таковое будет находиться на борту летательного аппарата. В данной работе дополнительно к уже существующим методам контроля качества жидкостей различной природы предлагается использовать разработанную в Институте радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН технологию, основанную на использовании оптических характеристик жидкости.

В последнее время интенсивно развивается спектральная поляризационно-оптическая аппаратура для исследований характеристик различных жидких и твердых сред в реальном масштабе времени – многоканальные поляризационные спектрофотометры, спектрополяриметры, спектральные эллипсометры и дихрометры, нефелометры, и рефрактометры. Использование в современных поляризационно-оптических приборах эффективных модуляторов состояния поляризации и многоканальных анализаторов совместно с развитыми компьютерными технологиями сбора и обработки данных измерений определяют их высокие технические

и функционально-информационные характеристики. Так, современные спектрофотометры обеспечивают измерение нескольких спектров в секунду с точностью и чувствительностью на уровне 1 % и 0,01 % соответственно, а измерения спектров вращения плоскости поляризации в реальном масштабе времени на спектрополяриметрах выполняются с высокой точностью (более 0,001 %).

В настоящее время совместное применение технических средств и software для оперативного мониторинга водной среды даже на Земле развито недостаточно из-за сложности синтеза комплексной системы мониторинга. Особенно сложны задачи сочетания алгоритмического набора с уровнем информационного обеспечения системы мониторинга. Актуальная задача экологического мониторинга требует разработки компактных прецизионных поляризационно-оптических приборов для экспресс-анализа жидких сред. При этом эффективность решения многопараметрических задач в большой мере определяют чувствительность и точность приборов, их универсальность, возможность использования широкого спектрального диапазона.

Адаптивные идентификаторы жидких растворов

Спектральные измерения в водной среде дают информативную базу для применения современных методов и алгоритмов распознавания и идентификации загрязнителей этой среды. Совместное использование оперативных измерений спектрометрии и методов обработки данных впервые реализовано в адаптивном идентификаторе, принципиальная схема и общий вид трех его модификаций представлены на рис. 1–3, а характеристики указаны в табл. 1.

Традиционно оптические методы исследования жидкостей являются одними из наиболее информативных. В частности, в условиях Земли поляризационно-оптические спектральные измерения позволяют решить широкий круг сложных задач экологического мониторинга водных сред. Задача определения концентрации различных веществ в многокомпонентных растворах по спектрам оптического пропускания и отражения, линейного и цирку-

лярного двулучепреломления и дихроизма и по спектрам нарушенного полного внутреннего отражения успешно решается только с помощью развитого программного обеспечения.

Одно из перспективных направлений анализа растворов – жидкостная хроматография с прецизионными поляриметрическими устройствами. Следует отметить определенные трудности при создании компактных многоканальных поляризационно-оптических приборов. Как правило, ключевым элементом поляризационно-оптических приборов является модулятор состояния поляризации излучения. Это либо вращающийся поляризационный элемент (поляризатор, анализатор или компенсатор), ограничивающий частоту модуляции и значительно повышающий уровень помех, либо дорогостоящий фотоупругий модулятор, требующий совершенной термостабилизации. Используются в основном ПЗС линейки и матрицы фотодетекторов, имеющие недостаточно высокие фотометрические характеристики: малый динамический диапазон, недостаточная линейность, отсутствие доступа к отдельным пикселям, последовательное считывание фотоприемных элементов, приводящее к неэквивалентности измерительных промежутков на всех фотоприемниках.

Создание адаптивного идентификатора оказалось возможным благодаря развитию нового подхода в области поляризационной оптики. Разработана эффективная элементная база поляризационной оптики, развит метод дискретной модуляции состояния поляризации, и на их основе созданы высокоточные

Т а б л и ц а 1

Средние характеристики адаптивного идентификатора **Average characteristics of the adaptive identifier**

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон	380–930 нм
Время регистрации сигнала	менее 0,5 с
Поляризационный угол вращения	0,001 градус
Точность измерения эллипсометрических углов смещения поляризаций: Ψ Δ	0,003 градус 0,01 градус
Тип галогенной лампы	KGM-9-70
Долговременная стабильность	0,01 градус
Вес измерительного устройства	менее 4 кг.

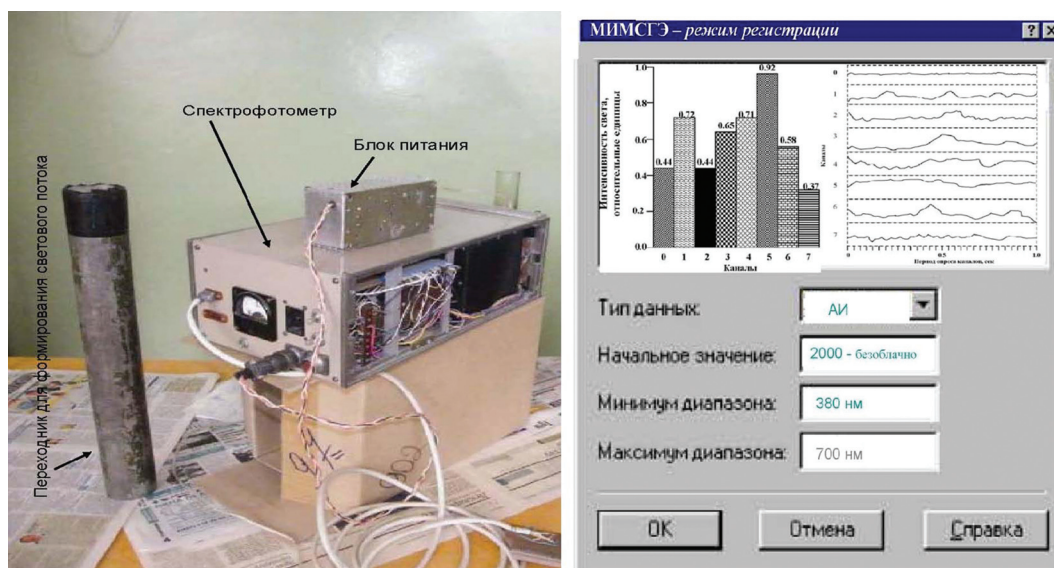


Рис. 1. Адаптивный идентификатор-спектрофотометр и фрагмент его интерфейса для изучения характеристик водной среды в лабораторных и полевых условиях в реальном масштабе времени

Fig. 1. Adaptive identifier spectrophotometer and its interface fragment to study the characteristics of the aqueous medium in the laboratory and field conditions in real time



Рис. 2. Адаптивный идентификатор – 35-канальный спектроэллипсометр для использования в лабораторных условиях или в полевых условиях путем взятия образца жидкости

Fig. 2. Adaptive identifier – 35-channel spectroellipsometer for use in the laboratory or in the field by obtaining a fluid sample



Рис. 3. Адаптивный идентификатор – информационно-моделирующая система

Fig. 3. Adaptive identifier – information-modeling system

поляризационно-оптические приборы различного назначения. Применение простых высокоэффективных переключателей поляризации и линеек кремниевых фотодиодов с произвольным доступом к фотодиодам существенно упростило задачу создания компактных недорогих поляризационно-оптических приборов: спектрофотометров, спектрополяритметров, спектроэллипсометров и т. д.

Технология совместного использования спектрометрии и алгоритмов идентификации и распознавания позволила впервые создать типовой цельный комплекс аппаратных, алгоритмических, модульных и программных средств сбора и обработки данных о водной среде с функциями прогноза и принятия решений (рис. 3). Адаптивный идентификатор имеет ряд модификаций, ориентированных на использование в различных условиях. Стационарный вариант охватывает полный комплект технических и алгоритмических средств, обеспечивающих проведение измерений в реальном масштабе времени. Использование этого варианта возможно при наличии сетевого питания 220 в. Полевой переносной вариант адаптивного идентификатора предусматривает два варианта использования. При наличии компьютера Notebook в полевых условиях (при отсутствии сетевого питания) весь функциональный спектр адаптивного идентификатора реализуется в режиме реального времени. В противном случае результаты измерений запоминаются в блоке автономной памяти, а затем вводятся в компьютер и обрабатываются.

Алгоритмическое обеспечение адаптивного идентификатора основано на комплексном использовании методов распознавания и классификации дискретных образов, формируемых на базе спектров, регистрируемых за устанавливаемое оператором время. Обычно устанавливается интервал в 1 сек, который обеспечивает получение около 60 отсчетов значений освещенности по каждому из оптических каналов. Полученные спектры являются источниками рядов статистических параметров и различных характеристик, объединяемых в векторные пространства для последующего сопоставления с эталонными образцами, хранящимися в памяти компьюте-

ра. Технология этого сопоставления зависит от многообразия методов идентификации.

Адаптивный идентификатор рассчитан на обучение, которое представляет собой процедуру измерения спектральных характеристик и одновременное независимое измерение содержания химических элементов в водной среде. В результате в базе знаний формируется банк эталонов, сопоставление с которыми обеспечивает решение задачи идентификации. В частности, такое сопоставление может реализовываться в рамках расчета среднего квадратического отклонения измеренного спектрального образа объекта от имеющихся в памяти компьютера эталонов. Программное обеспечение адаптивного идентификатора предусматривает различные алгоритмы решения этой задачи, среди которых имеется и кластерный анализ.

Адаптивный идентификатор может применяться в различных областях, где требуется оценить качество жидкого раствора или выявить присутствие в нем определенного набора химических элементов. Эти задачи адаптивный идентификатор решает в режиме непрерывного наблюдения за объектом мониторинга. Установленный для стационарного измерения, он позволяет следить за динамикой качества раствора в потоке, а при размещении на борту судна – измерять характеристики водного объекта по маршруту следования.

Функциональные возможности адаптивного идентификатора могут расширяться за счет увеличения объема эталонов в базе знаний. Переключение на естественный источник освещения позволяет решать задачи экспертизы земных покровов, обнаружения пленок нефтепродуктов на водной поверхности, определение степени загрязнения атмосферного воздуха и оценки состояния других объектов окружающей среды, спектральные образы которых в видимом диапазоне могут изменяться.

Адаптивный идентификатор был создан для решения задач оперативной диагностики качества водной среды в различных условиях и контроля жидких растворов в медицине и биофизике. Оперативность диагностики обеспечивается этапом предварительного обучения распознаванию спектральных образов растворов. Сам процесс обучения и последующее распоз-



Рис. 4. Концептуальная структурная схема многофункциональной адаптивной информационно-моделирующей системы для гидрофизических исследований (МАИМСГИ), ориентированная на оценку физико-химических характеристик водных объектов

Fig. 4. A conceptual block diagram of an adaptive multi-functional information-modeling system for the hydro-physical research (MAIMSGI), focused on the evaluation of the physico-chemical characteristics of water bodies

навание реализуются в соответствии с определенным набором методик, алгоритмов и процедур сбора, анализа, сортировки и обработки данных измерений. Совокупность всех этих средств составляет структуру информационно-моделирующей системы, ориентированной на оперативную диагностику состояния водных объектов в условиях многоканальных потоков информации от датчиков контактного и дистанционного действия и с применением высокоэффективных информационных технологий для решения задач классификации и идентификации водных объектов (рис. 3).

Структурная схема МАИМСГИ

Сложность проблемы оперативного многопланового контроля качества воды и состояния гидрофизических систем и процессов обусловлена, как правило, их пространствен-

ной неоднородностью и наличием множества физических, химических и биологических факторов, влияющих на их состояние. Поэтому система автоматизации гидрофизического мониторинга включает параметризацию типового водного баланса ограниченной территории, которая отражает взаимодействие компонентов гидрологического цикла. При этом система обладает функцией адаптации к реальному гидрофизическому объекту или процессу. На схеме рис. 4 представлена концепция такой системы.

Заключение

Реализация схемы рис. 4 обеспечивается за счет сбалансированного использования технических, модельных и алгоритмических средств. Такой баланс гарантируется ГИМС-технологией [2, 3], которая дает значительную экономию времени и средств за счет взве-

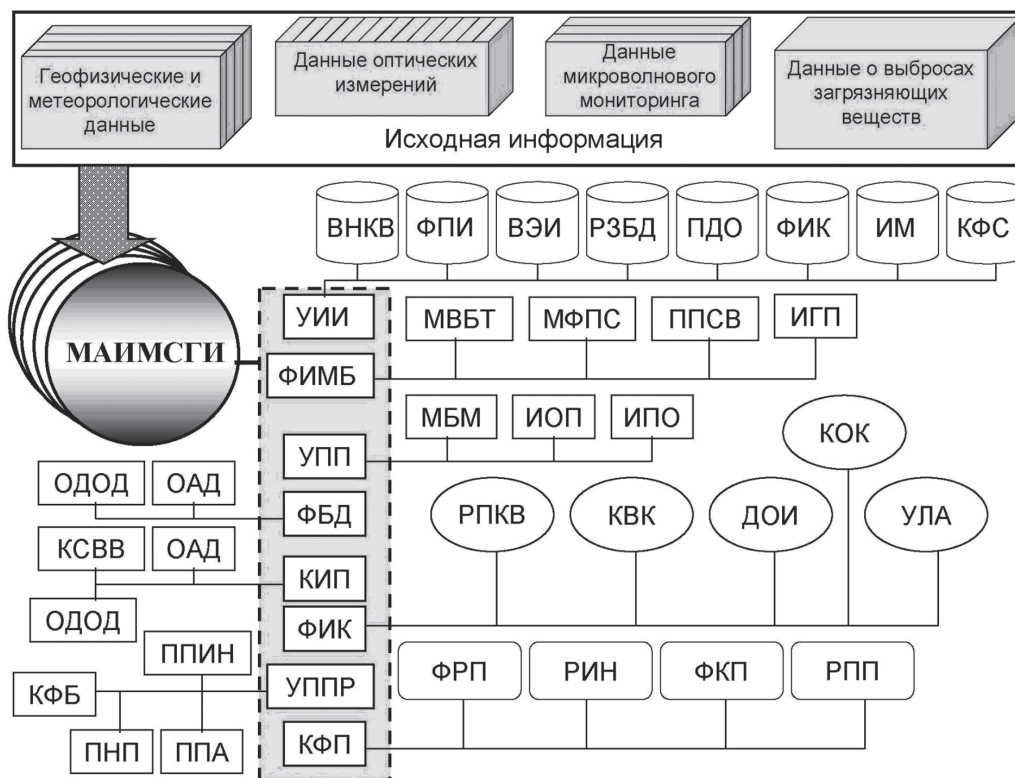


Рис. 5. Функциональная структура блоков МАИМСГИ. Обозначения даны в табл. 2, 3
Fig. 5. Functional block structure MAIMSGI. The designations are given in table. 2, 3

Т а б л и ц а 2

Блоки первого уровня МАИМСГИ
First-level blocks MAIMSGI

Блок	Функции блока
УИИ	Универсальный информационный интерфейс
ФИМБ	Формирование имитационной модели влагооборота. Управление моделями и алгоритмами описания гидрофизических и гидрологических процессов
УПП	Управление параметризацией потоков энергии и вещества в гидрофизической системе. Реализация механизмов трансформации химических элементов в водной среде
ФБД	Формирование базы данных и синтез сценариев антропогенных процессов в зоне функционирования гидрофизического объекта
КИП	Контроль информационных потоков между блоками системы
ФИК	Формирование и использование критериев качества водной среды
УППР	Управление процедурами принятия статистических решений
КФП	Контроль фазовых переходов в гидрофизической системе

шенного планирования гидрофизического исследования, проявляющегося в экономном сочетании технических и алгоритмических средств сбора и обработки данных, а также в разумном распределении точек взятия проб по пространству, занятому изучаемым гидрофизическим объектом. Схема рис. 5 конкретизирует структуру МАИМСГИ.

Рассмотренная технология диагностики водной среды применялась при изучении качества водных ресурсов в некото-

рых регионах России и Южного Вьетнама [2, 4]. Опыт многолетних гидрофизических экспериментов показал, что применение МАИМСГИ в различных ее модификациях позволяет экономить время и другие ресурсы при получении исчерпывающих оценок качества различных водоемов. Самое главное, проведя обучение МАИМСГИ путем наполнения базы спектральных эталонов различных образцов водных объектов, мы исключаем во время гидрохимических исследований

Блоки второго уровня системы МАИМСГИ
Units of the second level of MAIMSGI

Блок	Функции блока
ФПИ	Формирование предметных идентификаторов для адаптации системы к конфигурации изучаемого гидрофизического объекта с учетом его географического положения, а также геофизической, экологической и социально-экономической структуры
ВЭИ	Восприятие экспериментальной информации, ее масштабирование и занесение в базу данных
РЗБД	Реализация запросов к базе данных. Обслуживание регламентных запросов.
ПДО	Поддержка действий оператора при выборе и изменении формы информационного и пользовательского интерфейсов
ФИК	Формирование информационных карт о качестве воды на территории гидрофизического объекта
ИМ	Изменение масштабов представления картографической информации с выделением фрагментов территории гидрофизического объекта
КФС	Контроль функций системы, обеспечивающий согласование информационных потоков внутри системы, выявление дефектных запросов и сообщений, предупреждение о неправильных (или запрещенных) командах оператора, подсказка пользователю
ВНКВ	Выявление нарушений качества воды и информирование оператора об этих нарушениях
МВБТ	Модель водного баланса территории, занятой изучаемым гидрофизическим объектом или процессом
МФПС	Модель формирования сложного многофакторного процесса поверхностного стока с учетом топографии водосбора и почвенно-растительного покрова
ППСВ	Параметризация потоков сточных вод
ИГП	Имитация гидрофизических процессов
РПКВ	Расчет показателей качества воды
МБМ	Моделирование механизмов трансформации химических элементов в воде
ИОП	Имитация обменных процессов на границе гидрофизических систем, включая приливно-отливные процессы, взаимодействие с атмосферой
ИПО	Имитация процессов обмена химическими элементами между атмосферой и водной поверхностью
ОАД	Обновляемый архив данных об объемах и составе загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду предприятиями сельскохозяйственных, промышленных и муниципальных систем, расположенных в зоне функционирования гидрофизической системы
ОДОД	Оценка достоверности официальных данных, заносимых в архив
ФКО	Формирование компьютерного образа гидрофизической системы
ПРИ	Приведение разнородной информации к единому стандарту
КСВВ	Контроль согласованности входов и выходов блоков и их связей с базой данных
КВК	Контроль выполнения критериев качества воды
ДОИ	Документирование оперативной информации о качестве водной среды
УЛА	Учет лабораторных анализов качества водной среды
КОК	Комплексная оценка качества водной среды
ПНП	Процедура Неймана-Пирсона принятия статистических решений
ППА	Процедура последовательного анализа принятия статистических решений.
КФБ	Контроль функционирования блоков информационно-моделирующей системы
ППИН	Процедура преодоления информационной неопределенности
ФРП	Формирование рядов метеорологических и геофизических характеристик.
РИН	Расчет индикаторов нестабильности и биологической сложности гидрофизической системы
ФКП	Формирование кластерного пространства
РПП	Реализация процедуры перколяции

этап взятия образцов воды и их изучения в химической или биофизической лаборатории. Тем более вопрос усложняется при космическом полете, так как при космическом полете невозможно такое изучение из-за отсутствия соответствующим образом ориентированной лаборатории [5].

Система диагностики и идентификации качества жидкостей, описанная в данной работе, может быть реализована в виде компактного устройства небольших габаритов и веса. Вопрос о возможном ее использовании в неземных условиях, несомненно, требует проведения ряда дополнительных исследований:

– определение жидких растворов, которые будут использованы на борту космического корабля и в дальнейшем на Марсе и для диагностики которых будет использована изложенная здесь технология;

– реализация процедур обучения распознаванию спектральных образов этих жидкостей в земных условиях путем формирования базы спектральных эталонов, обеспечивающей надежный уровень диагностики;

– реализация измерений спектров жидкостей в ограниченном объеме на МКС с целью выяснения изменений в спектрах одинаковых растворов, полученных на Земле и в условиях невесомости, и поиска закономерностей в этих изменениях;

– модернизация некоторых функций МАИМСГИ с учетом полученных результатов сопоставления спектров одинаковых растворов, изученных на Земле и МКС.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по грантам № 13-01-00023_а и № 14-01-31117 мол_а.

Библиографический список / References

1. Крапивин, В.Ф., Бурков В.Д. Адаптивная система спектральной идентификации жидких растворов. Материалы 10-й Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», 28 ноября 2013 г., Звездный городок / В.Ф. Крапивин, В.Д. Бурков. – НИИ Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. – С. 133–135. Krapivin V.F., Burkov V.D. *Adaptivnaya sistema spektral'noy identifikatsii zhidkikh rastvorov* [Proceedings of the 10th International scientific and practical conference «Manned space flight», 28 November 2013] Star City, the Research Institute of Gagarin Cosmonaut Training Center. YA Gagarin with. pp. 133-135.
2. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. Global environmental change. Springer/Praxis, Chichester, U.K., 2002, 316 pp.
3. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Information-Modeling Technology for Environmental Investigations. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 2013, 621 pp.
4. Krapivin V.F. and Shutko A.M. Information Technologies for Remote Monitoring of the Environment. Springer/Praxis, Chichester U.K., 2012, 498 pp.
5. Корольков, А.В. О поведении жидкости в невесомости. Мат. 10-й Международной научно-практической конференции «Пилотируемые полеты в космос», 28 ноября 2013 г., Звездный городок / А.В. Корольков. – НИИ Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина. – С. 135–136. Korol'kov A.V. *O povedenii zhidkosti v nevesomosti*. [Proceedings of the 10th International scientific and practical conference «Manned space flight», 28 November 2013] Star City, the Research Institute of Gagarin Cosmonaut Training Center. YA Gagarin with. pp. 135-136.
6. Mkrtchyan F.A., Krapivin V.F., Klimov V.V., Kovalev V.I. Hardware-software system of the water environment monitoring with use of microwave radiometry and spectroellipsometry means // Proceedings of the 28-th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. Mombetsu, Hokkaido, Japan 2013. P. 104-109.
7. Krapivin V.F., Shutko A.M. Information Technologies for Remote Monitoring of the Environment. Chichester U.K.: Springer/Praxis, 2012.
8. Perov P.I., Kovalev V.I., Rukovichnikov A.I., Rossukanyi N.M., Johnson W.H. (1994). New high precision and high speed automatic ellipsometer with polarization switching for in situ control in semiconductor device technologies // International Journal of Electronics. 1994. V. 76. No.5. P. 797 – 803.
9. Mkrtchyan F.A., Krapivin V.F. Spectroellipsometry opportunities in the monitoring aquatic ecosystems. Proceedings of the 29-th International Symposium on Okhotsk Sea and Sea Ice. Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2014. P. 154-156.
10. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Information-Modeling Technology for Environmental Investigations. Bucharest, Romania: Matrix Rom, 2013.
11. Haarbrink R., Krapivin V.F., Krisilov A., Krisilov V., Novichikhin E.P., Shutko A.M., Sidorov I. Intelligent data processing in global monitoring and security, Sofia-Kiev: ITHEA, 2011.
12. Cao Van Phuong, Nguyen Boi Khue, Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A. An adaptive information technology for the operative diagnostics of the ocean-atmosphere system // Binh Duong University Journal of Science and Technology. 2012. V.9. No.4. P. 50-67.

ADAPTIVE SYSTEM FOR THE IDENTIFICATION OF LIQUID SOLUTIONS: TECHNOLOGY

Burkov V.D., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; **Komarov E.G.**, Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; **Krapivin V.F.**, Prof. IRE them. V.A. Kotelnikov RAS, Dr. Sci. (Physics and Mathematics)⁽²⁾, **Mkrtchyan F.A.**, IRE RAS, Dr. Sci. (Physics and Mathematics)⁽²⁾, **Soldatov V.Yu.**, IRE RAS, Ph.D. (Physics and Mathematics)⁽²⁾

burkov@mgul.ac.ru, vkrapivin_36@mail.ru

⁽¹⁾Moscow Forest State University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005 Mytishchi, Moscow reg., Russia

⁽²⁾ Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences, Vvedensky Sq. 1, Fryazino Moscow region, 141120, Russia

The problem associated with the solution of many tasks of operational diagnostics of liquid solutions (including drinking water), medical issues, and liquid fuels is considered. This problem exists under the conditions when special laboratory is not present or available tools are insufficient to assess the liquid solution quality operatively. Such conditions can appear during different expeditions, for example, the Mars mission. This paper proposes a new method to solve these problems during both the flight and the stay on the surface of the planet. The proposed method consists of a database development of spectral images of liquid solutions supplied by a multiple-channel spectroellipsometer and the diagnostics of liquid solutions using this database.

Keywords: drinking water, fuel, diagnostics, liquid solution spectroellipsometer spectral image recognition, the Mars mission