

НАЦІОНАЛЬНЕ
КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Журнал засновано в лютому 1995 р. ♦ Виходить 6 разів за рік

київ

Том 14, № 2, 2008

KYIV

МАТЕРІАЛИ VII Міжнародної конференції з космічних досліджень (3–8 вересня 2007 р., Євпаторія)

ЗМІСТ

Лялько В. І., Попов М. А. Полигони ДЗЗ в Україні как
елемент глобальної системи GEOSS/GMES

Волошин В. І., Левенко А. С. Аналіз тенденцій розви-
тия ринку дистанціонного зондирования Землі

CONTENTS

- | | |
|----|--|
| 3 | Лялько В. І., Попов М. А. Ukrainian field sites system for remote sensing of the Earth as an element of the GEOSS/GMES global system |
| 13 | Voloshin V. I., Levenko A. S. Analysis of tendencies of Earth's remote sensing market development |

- Станкевич С. А. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы*
- Станкевич С. А., Сахацький О. І., Козлова А. О. Класифікування покріттів ландшафтів з використанням повного набору нормалізованих міжканальних індексів і додаткових контекстуальних ознак*
- Бушуев Е. И., Волошин В. И., Левенко А. С., Капустин Е. И., Стефанышин Я. И. Подходы к построению и эксплуатации национальной орбитальной группировки спутников ДЗЗ*
- Анфимов Н. А., Лукьянченко В. И., Ольшанский В. М., Суворов В. В., Цымбалюк М. М. Основные результаты исследований, выполненных на российском сегменте Международной космической станции, и перспективы реализации российских экспериментов с участием Украины*
- Похил Ю. А., Кислов А. М., Романенко В. Г., Левин А. Я. КЭ «Пента—Усталость». Численное моделирование тепловых режимов блока циклического нагружения образцов в бортовой установке «Цикл-1»*
- Кузьков В., Софік З., Кузьков С., Воловик Д., Пуха С. Лазерні комунікаційні експерименти між геостаціонарним супутником і наземним телескопом*
- Яцків Я. С., Видмаченко А. П., Мороженко А. В., Сосонкін М. Г., Іванов Ю. С., Синявський І. І. Спектрополяриметрическая аппаратура для внеатмосферного исследования тел Солнечной системы*
- Вашенко В. Н., Голубничий П. И., Кривоносов С. Д., Павлович В. Н., Русов В. Д., Філоненко А. Д., Фомін С. П., Шульга Н. Ф. Детектирование потоков космических лучей сверхвысокой энергии на окололунной орбите*
- Клименко Ю. А., Яценко В. А., Шатохина Ю. В., Прутко Ю. В., Семенив О. В. О возможной реализации спутникового датчика микроДискретных на основе нанотрубок*
- Козак Л. В., Саливонов А. И. Вариации ночных измерений температуры верхней атмосферы Земли в течение года*
- Сумарук Ю. П. Геомагнітна активність та динаміка секторної структури міжпланетного магнітного поля*
- Яковлев В. В., Лищина В. Д. Актуальные вопросы использования воды в космических экспедициях средней продолжительности*
- 22 Stankevich S. A. Informativity of Earth remote sensing optical bands: Practical algorithms**
- 28 Stankevich S. A., Sakhatsky A. I., Kozlova A. A. Land cover classification on the basis of the full set of normalized band-difference indexes and additional context features**
- 32 Bushuev Ye. I., Voloshin V. I., Levenko A. S., Kapustin Ye. I., Stefanishin J. I. Approaches to construction and operation national orbital grouping**
- 42 Anfimov N. A., Lukashchenko V. I., Olszanski V. M., Suvorov V. V., Tsybalyuk M. M. The essential results of the investigations performed on the Russian segment of the International Space Station and the prospects for the realization of Russian experiments with the participation of Ukraine**
- 46 Pokhyl Yu. A., Kislov A. M., Romanenko V. G., Levin A. Ya. Space experiment «Penta — Fatigue». Numerical modeling conditions for cyclic loading unit of samples in on-board facility «Cycle-1»**
- 51 Kuz'kov V., Sodnik Z., Kuz'kov S., Volovyk D., Pukha S. Laser communication experiments with a geostationary satellite from a ground telescope**
- 56 Yatskiv Ya. S., Vidmachenko A. P., Morozhenko A. V., Sosonkin M. G., Ivanov Yu. S., Syniavskyi I. I. Spectropolarimetric device for overatmospheric investigations of Solar system bodies**
- 68 Vaschenko V. N., Golubnichiy P. I., Krivonosov S. D., Pavlovich V. N., Rusov V. D., Filonenko A. D., Fomin S. P., Shulga N. F. Detection of flux cosmic ray of ultrahigh energy in the lunar orbit**
- 73 Klymenko Yu. A., Yatsenko V. A., Shatokhina Yu. V., Prutsko Yu. V., Semeniv O. V. On the possibility of realization of satellite microacceleration transducer based on nanotubes**
- 77 Kozak L. V., Salivonov A. I. Variations of night measurements of the upper Earth's atmosphere temperature over the course of a year**
- 84 Sumaruk Yu. P. Geomagnetic activity and dynamics of sector structure of the interplanetary magnetic field**
- 92 Yakovlev V. V., Lishchyna V. D. Topical issues of the use of water in space flights of moderate duration**
- 97 OUR AUTHORS**

УДК 528.855

В. И. Лялько, М. А. Попов

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Полигоны ДЗЗ в Украине как элемент глобальной системы GEOSS/GMES

Представлено 03.09.07

Розглянуто питання, пов'язані з обґрунтуванням вимог до системи полігонів ДЗЗ в Україні, умови отримання достовірної і точної польової інформації *in-situ*, організаційні аспекти проблеми, можливі напрями міжнародного співробітництва у цій галузі.

ВСТУПЛЕНИЕ

Как известно, начиная с 2005 г., международным научным сообществом реализуется рассчитанный на десятилетний период проект «The Global Earth Observation System of Systems» (GEOSS), целью которого является существенное пополнение и уточнение на количественном уровне наших знаний о состоянии геосфер и биосфера Земли [1]. Для создания глобальной системы наблюдения Земли привлекаются самые современные технические средства измерений и наблюдения, используются наиболее эффективные и высокопроизводительные методы и системы обработки получаемых данных.

В силу необходимости обеспечения, в соответствии с поставленной целью, глобального и непрерывного мониторинга окружающей природной среды, одним из основных источников данных в панпроекте GEOSS и его европейской составляющей «Global Monitoring for Environmental Security» (GMES) рассматриваются технические средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). С помощью средств ДЗЗ аэро- и космического базирования (бортовых сенсоров) формируются высококачественные изображения, анализ и интерпретация которых позволяют извлекать актуальную (оперативную) информацию о состоянии земной суши, океана и

атмосферы, фиксировать и изучать происходящие в природе изменения, строить эволюционные и другие прогностические модели и т. д.

Практика показывает, что достоверность и точность извлекаемой из аэрокосмических изображений информации существенно зависят от наличия и полноты соответствующих полевых (*in-situ*) данных [2]. Полевые данные получают методом наземных физических (геохимических, фитоиндикационных и т. д.) и геометрических (пространственных) измерений или с помощью непосредственного наблюдения и обследования объектов, что придает таким данным более высокую точность и адекватность (реалистичность) по сравнению с дистанционными данными [3, 4]. Это позволяет использовать полевые данные как некие опорные (калибровочные, заверочные) в процессах формирования, обработки и интерпретации аэрокосмических изображений.

Кроме того, вследствие существования конечных пределов по чувствительности, разрешающей способности и наличия других ограничений, присущих реальным техническим средствам ДЗЗ, далеко не все параметры состояния геосфер и биосфера Земли могут с их помощью измеряться или наблюдаваться. Поэтому в глобальной системе GEOSS/GMES значительное внимание уделяется проблеме получения в надлежащих объемах данных *in-situ*, которые име-

ют важное прикладное значение, как при интерпретации дистанционных данных, так и при моделировании и прогнозировании природных и техногенных процессов.

Накопленный в мировом ДЗЗ опыт убедительно свидетельствует, что наиболее рациональный путь надежного получения и эффективного использования данных *in-situ* — это создание специально оборудованных полигонов. По этому пути уже достаточно длительное время идет большинство стран, имеющих собственные спутники ДЗЗ (США, Франция, Россия и др.).

Определенный опыт полигонных исследований имеется и в Украине. Хорошо известна наблюдательная система Черного моря, созданная Морским гидрофизическим институтом НАН Украины в поселке Кацивели (Крым), в состав которой входит как наземный научный комплекс, так и оборудованная на прибрежном шельфе уникальная платформа на сваях для исследований состояния морской акватории [5]. Научный центр аэрокосмических исследований Земли НАН Украины давно и успешно использует отдельные участки вблизи Чернобыля и в предгорье Карпат для заверки спутниковых данных при оценивании состояния лесов и растительности методами ДЗЗ из космоса [6].

Вместе с тем полигонные исследования в Украине требуют дальнейшего развития. В статье сделана попытка сформулировать требования к современным полигонам ДЗЗ, обсуждается проблема создания системы полигонов ДЗЗ в Украине и рассмотрены направления ее развития и имплементации в глобальную систему GEOSS/GMES.

ПОЛИГОНЫ ДЗЗ: КЛАССИФИКАЦИЯ И ТРЕБОВАНИЯ

В общем случае полигоны ДЗЗ предназначаются для решения двух больших групп задач. Одна группа задач связана с послестартовой настройкой параметров бортовых сенсоров с целью обеспечения оптимального режима съемки в процессе аэрокосмического мониторинга земной поверхности и уточнения значений элементов внешнего ориентирования (пространственной привязки и наведения на объекты дистанционного зон-

дирования). Другая группа задач связана с разработкой и сертификацией различных методик обработки, анализа и интерпретации получаемых данных ДЗЗ, в частности аэрокосмических изображений.

В зависимости от функционального предназначения полигоны ДЗЗ подразделяются на контрольно-калибровочные и тестовые [7].

С помощью контрольно-калибровочных полигонов решают задачи контроля параметров бортовых технических средств ДЗЗ в процессе полета и их калибровки. Для этого на земной поверхности устанавливаются разнообразные технические объекты с известными характеристиками: миры для экспериментального измерения пространственной разрешающей способности бортовых оптико-электронных сенсоров, устройства для измерения чувствительности инфракрасных и радиолокационных систем, искусственные малоразмерные объекты точного 3D-позиционирования (наземные контрольные точки) и др. В случае калибровки многоспектральных средств ДЗЗ должно технически обеспечиваться измерение величины абсолютной чувствительности каждого спектрального канала либо определение относительного ее значения в сравнении с другими каналами. Все объекты на полигоне должны иметь максимально точную координатную привязку, что особенно важно, если полигон имеет также фотограмметрическую направленность.

Тестовые полигоны ДЗЗ используются для разработки и сертификации методик решения тематических задач ДЗЗ, создания и пополнения компьютерных баз данных о спектральных сигнатурах объектов дистанционного зондирования и проведения других научных исследований. В этих целях на территории полигона обустраиваются или просто выбираются тестовые участки, каждый из которых имеет определенные (спектрально-яркостные, геометрические и др.) устойчивые характеристики. Эти характеристики используются при интерпретации изображений в качестве атрибутивных признаков соответствующего класса объектов. Кроме того, знание этих характеристик на количественном уровне позволяет проводить коррекцию радиометрических (яркостных) и геометрических искажений, в той или иной мере присущих всем аэрокосмическим изображениям.

Подавляющее большинство специально оборудованных полигонов ДЗЗ располагается на суше, при этом обычно они функционируют на базе существующих заповедников, лесничеств и опытных хозяйств, ботанических садов и т. д., что обеспечивает экономию средств и квалифицированное обслуживание. Вместе с тем в некоторых проектах ДЗЗ в качестве полигонов действуются на период выполнения проекта естественные (природные) наземные образования, относительно которых есть вся необходимая и достаточно достоверная информация.

При изучении морей и океанов используются дрейфующие или стационарно закрепляемые платформы, с которых проводятся измерения оптических, геохимических и других характеристик морской и стоковых пресных вод, альтиметрические измерения, осуществляется геологическое обследование шельфовых зон и др. [5].

Чтобы максимально соответствовать своему предназначению и обеспечивать достаточную информационную поддержку дистанционным измерениям и наблюдениям, полигон ДЗЗ должен удовлетворять определенным требованиям. Эти требования можно разделить на следующие категории:

- 1) структура,
- 2) излучательно-отражательные характеристики,
- 3) географическое расположение и размеры,
- 4) методическое и техническое обеспечение,
- 5) сертификация.

Рассмотрим подробнее каждую категорию требований.

Структура. Объекты, которые могут быть предметом дистанционного изучения и полигонных исследований, весьма разнообразны: это растительность, грунты и обнажения пород, акватории, снежные покровы и ледовые образования, аэрозоли приземного слоя атмосферы, искусственные сооружения и др. Если полигон ДЗЗ предполагается использовать также для решения фотограмметрических задач и актуализации картографической информации, то в его структуру дополнительно должны включаться территории населенных пунктов, промышленные и сельскохозяйственные объекты, гидрографические объекты и т. д.

В международной практике объекты ДЗЗ при-

нято сводить в некую номенклатурную таблицу, или классификационную систему. Например, для классификации земных покрытий методом ДЗЗ еще более 30 лет тому назад Андерсоном (J. R. Anderson) была предложена двухуровневая классификационная система, согласно которой все покрытия разделены на 1-м уровне на 9 категорий и на 37 категорий на 2-м уровне [8]. Категории 1-го уровня: городские и застроенные земли, сельскохозяйственные земли, пастбища, леса, водные поверхности, заболоченные земли, бесплодные земли, тундра, многолетние снежные и ледовые покровы. На 2-м уровне каждая из перечисленных категорий детализируется. Процедура классификации земных покрытий по Андерсону требует наличия аэрокосмических снимков с детальностью на местности 10—30 м и карт масштаба 1:100 000. Классификационная система Андерсона неоднократно модифицировалась, и сегодня она является наиболее распространенной в США.

В Европе получила распространение классификационная система CORINE Land Cover (CLC), разработанная в рамках программы Co-ordination of Information on the Environment (1985—1990 гг.). Это трехуровневая система, 1-й уровень которой образован пятью категориями: искусственные поверхности, сельскохозяйственные зоны, леса и обнажения, заболоченные земли, водоемы [9]. На 2-м уровне насчитывается 15 разновидностей названных категорий, на 3-м уровне каждая из разновидностей детализируется далее. Эта система весьма удобна при изучении состояния лесов и растительности, поскольку на 2-м и 3-м уровнях классификация учитывает их физиognомические, фенологические и флористические особенности. Процедура классификации земных покрытий в системе CLC требует аэрокосмических снимков с детальностью на местности не хуже 25 м и карт масштаба 1:100 000.

В последние несколько лет в рамках проекта, реализуемого комитетом CEOS, создана схема классификации GOFC/GOLD (Global Observation of Forest Cover / Global Observation of Land Cover Dynamics) (www.fao.org/gtos/gtos-find.asp). При создании данной схемы впервые принято во внимание, что выделяемые классы должны облегчать исследования карбонового баланса с целью прогноза климатических изменений.

При классификации по схеме GOFC/GOLD используются легко доступные космические снимки среднего и низкого пространственного разрешения (от 100 до 1000 м). Все это способствует распространению данной классификационной схемы, особенно при изучении и оценке происходящих в природе изменений.

Структура полигона разрабатывается на этапе его создания в соответствии с возможностями местной экосистемы и перечнем тематических задач ДЗЗ и обычно не подвержена существенным изменениям. В то же время при необходимости номенклатура и количество тестовых объектов на полигоне могут корректироваться.

Излучательно-отражательные характеристики. В качестве материального носителя информации в системах ДЗЗ используется электромагнитное излучение, поэтому качество формируемых аэрокосмических изображений, а следовательно, и точность их интерпретации определяются излучательно-отражательными характеристиками объектов дистанционного зондирования. Для сенсоров и изображений видимого диапазона длин волн основными параметрами являются коэффициенты отражения и яркости наземных объектов; в случае инфракрасных (тепловых) сенсоров и изображений важны в первую очередь излучательные характеристики объектов.

Общие требования таковы:

- тестовые участки и калибровочные объекты должны иметь достаточно хорошие излучательные/отражательные свойства (с величиной коэффициента отражения в заданном спектральном диапазоне не менее 0.3);
- поверхность тестовых участков должна быть близкой к ламбертовской;
- форма функции распределения значений коэффициента излучения или отражения тестового объекта по спектру должна быть в пределах задействованного спектрального интервала достаточно плоской, без резких перепадов;
- смежные тестовые участки, являющиеся ре-презентами разных классов, не должны обладать близкими излучательно-отражательными свойствами;
- излучательно-отражательные характеристики полигонных объектов должны быть достаточно стабильными.

Излучение от тестового объекта прежде, чем попасть на входной зрачок приемного блока сенсора, претерпевает ослабляющее действие толщи атмосферы, иногда весьма значительное. Кроме того, на входном зрачке всегда присутствуют «паразитные» излучения. Поэтому исходное излучение от тестового объекта должен быть достаточно мощным, чтобы обеспечить хорошее отношение «сигнал/шум». Наличие на полигоне объектов с максимальной и минимальной яркостями позволяет подстраивать текущий динамический диапазон сенсора и тем самым уменьшать нелинейность преобразования «яркость—электрический сигнал».

Ламбертовость тестовых участков означает на практике, что величина яркости мало меняется по поверхности этого участка и слабо зависит от угла визирования. Данное свойство позволяет минимизировать возможные ошибки калибровки при наклонном наведении сенсора на объект, а также при кросс-калибровке бортовых сенсоров (когда один сенсор калибруется с помощью второго).

Плоский характер функции спектрального распределения коэффициента отражения или излучения тестового объекта имеет важное значение при калибровке многоспектральных технических средств ДЗЗ, и особенно при кросс-калибровке бортовых сенсоров, в случае, когда у опорного и калибруемого сенсоров соответствующие спектральные зоны пересекаются только частично.

Необходимо указать, что при наличии определенной близости излучательно-отражательных свойств у тестовых участков разных классов их отождествление и локализация на снимке усложняются, особенно если эти участки расположены рядом друг с другом. Поэтому в некоторых случаях соседствующие объекты генерализуются, т. е. объединяются по определенным правилам в один класс.

Все искусственные объекты на полигоне должны сохранять стабильность своих свойств, в том числе геометрических и оптических. К природным объектам это требование применяется избирательно: с одной стороны, яркость подстилающих земных образований должна быть мало подвержена сезонным изменениям, а с другой стороны, при изучении процессов вегетации и созревания сельскохозяйственных культур

именно изменения их спектральных отражательных свойств во времени несут основную информационную нагрузку.

Географическое расположение и размеры. При выборе места расположения наземного полигона ДЗЗ следует принимать во внимание, в первую очередь, ландшафтно-климатические и геоморфологические особенности территории, поскольку местный климат, характерная растительность и рельеф предопределяют структуру полигона и состав тестовых объектов. Предпочтение отдается географическим районам с низкой среднегодовой облачностью и климатом, обеспечивающим всесезонность наблюдений и измерений. Желательна удаленность от техногенных загрязненных зон. По рельефу предпочтительна равнинная местность с наклонами не более нескольких градусов, при этом следует учитывать, что чем выше полигон находится относительно уровня моря, тем меньше оказывается влияние аэрозольного фактора. Полигон должен быть расположен на преимущественных маршрутах спутников ДЗЗ с обеспечением возможности калибровки орбитальных сенсоров в зенит в светлое время суток. Если полигон используется как подспутниковый, то желательно, чтобы подлетное время самолета от ближайшего аэророма было небольшим.

Площадь контрольно-калибровочного полигона чаще всего исчисляется несколькими десятками квадратных километров. Если на полигоне решаются также фотограмметрические и топогеодезические задачи, то обычно ставится условие, чтобы его площадь соответствовала листу топографической карты масштаба 1:25000, т. е. составляла не менее 80 км². Принимается также во внимание, что увеличение размеров полигона упрощает решение проблемы наведения бортовых средств.

Общая площадь тестового полигона определяется числом представленных на нем классов объектов. Каждый класс представляется одним или несколькими площадными участками, относительно которых предъявляются два основных требования: 1) суммарное количество составляющих пространственных единиц (unit, subslot) должно быть статистически достаточным, 2) участок (или участки) должен быть максимально однородным, т. е. не «засорен» представителями других классов.

Если принять, что пространственная единица по площади соответствует проекции пикселя на земную поверхность, а классификация каждого пикселя осуществляется независимо, то необходимое количество единиц (т. е. необходимый объем выборки) наиболее просто рассчитывается с помощью биномиального подхода. За основу берется вероятность правильной классификации P_0 , при этом задаются некоторый доверительный интервал, в котором эта величина может находиться, а также вероятность выхода из него. При этих условиях минимальное статистически достаточное количество единиц N^* рассчитывается с помощью формулы

$$N^* = Z_\alpha^2 P_0 (1 - P_0) / b^2,$$

где Z_α — стандартная табуированная оценка для принятой вероятности двусторонней ошибки 1-го рода, b — допустимая ошибка [10]. Ошибка 1-го рода задает вероятность α того, что истинное значение вероятности правильной классификации выйдет за границы доверительного интервала. Пусть $P_0 = 0.85$; если задаться $\alpha = 0.05$, то согласно [11] имеем допустимую ошибку $b = \pm 0.05$ и $Z_\alpha = 1.96$. Тогда расчет по вышеприведенной формуле дает $N^* = 207$. Исходя из этого числа, для случая, когда проекция пикселя на земную поверхность составляет квадрат со стороной 30 м (характерно для изображений со спутников Landsat, EOS AM-1 Terra/ASTER), получаем, что один класс должен занимать территорию не менее 0.2 км². Если же при этом предполагается, что участок будет использоваться и для классификации изображений с обучением, и для контроля качества используемого классификатора, то нужна территория, как минимум, вдвое большая по площади.

В работе [10] описан еще один теоретический подход к определению статистически достаточного объема выборки, особенность которого в том, что он позволяет учитывать индивидуальные требования к точности классификации на уровне каждого класса. Там же показано, что достоверность классификации зависит от геометрической формы тестовой площадки, особенно при малых размерах участка.

Влияние «засоренности» участка на достоверность классификации экспериментально исследовалось в [12]; полученные результаты пока-

зывают, что нарушение степени однородности участка приводит к существенному снижению процента правильной классификации.

Методическое и техническое обеспечение. Любой полигон ДЗЗ — это сложная эко- и биосистема, требующая большого объема полевых измерений и наблюдений [13]. При методическом обеспечении этих работ ключевыми являются вопросы выбора рационального множества параметров, подлежащих измерению, обоснования необходимой точности и периодичности измерений и наблюдений. Применительно к объектам зондирования в это множество включаются интегральные и спектральные характеристики отражения, поглощения и пропускания, а также степень поляризации. Кроме того, требуется периодический контроль их местоположения (в случае малоразмерных объектов) или границ. Состояние подстилающей земной поверхности контролируют с помощью измерений влажности и геохимического состава почвы.

Принцип единства измерений [14] требует, чтобы их результаты были привязаны к национальным или международным эталонам, а погрешности измерений были четко установлены и выдерживались.

Точность полевых измерений должна обеспечивать возможность стратификации измеряемых характеристик по их значениям и разделения объектов разных классов. Кроме того, от точности полевых измерений зависит достоверность классификации объектов на аэрокосмических изображениях. Например, в классификационных системах Андерсона и CLC требуемая достоверность классификации должна составлять не менее 0.85 [8, 9].

Интегральные оптические свойства объектов оценивают через коэффициенты отражения, поглощения и пропускания. Задачи исследования радиационного баланса, моделирования растительного покрова требуют измерения индикаторы и коэффициента рассеяния излучения объекта, двунаправленного коэффициента отражения и функции его распределения, коэффициента направленного излучения, полусферического и конического коэффициентов излучения и т. д. [4, 13, 14].

Важными составляющими полевых работ являются сбор и актуализация эколого-фитоценической и флористической информации. Эта ин-

формация должна иметь пространственную привязку в масштабе карты не хуже 1:25 000.

В результате периодически проводимых на полигоне измерений и наблюдений создается информационный портрет каждого объекта или классов объектов. Эти портреты, включая спектральные сигнатуры, сохраняются в специально создаваемых базах данных и анализируются методами ГИС-технологий [15].

Техническое обеспечение выполняемых на полигоне работ включает в себя наличие комплекса измерительных приборов, в составе которого обычно должны присутствовать полевой спектрометр, поляриметр, прибор точного позиционирования, гониометр, влагомер, магнитометр и др.

В настоящее время, по мнению большинства специалистов, наиболее совершенным по своим техническим и информационным возможностям является полевой портативный спектрорадиометр FieldSpecR3 FR, выпускаемый американской компанией Analytical Spectral Devices, Inc. [16]. Он обеспечивает измерение и сохранение данных об отражательной способности, яркости и освещенности природных и искусственных объектов в спектральном диапазоне 350...2500 нм, при этом спектральное разрешение составляет 3 ... 10 нм. В его комплект входит интегрирующая сфера RTS-3ZC Refl/Trans Integrating Sphere, что позволяет измерять полное полусферическое отражение и пропускание образцов растительности, почвы, их альбедо и т. д.

Для определения влажности, температуры и солености почв Институтом агрофизики Польской академии наук (г. Люблин) разработан и выпускается переносной наземный прибор FOM/mts. С его помощью можно выполнять измерения перечисленных параметров на разных уровнях почвенного разреза. Кроме того, прибор FOM/mts обеспечивает измерение объемного содержания воды в почве с точностью до 2 %. Влажность измеряется в диапазоне от 0 до 100 %, температура в пределах -20 ... +50 °C с разрешением 0.1 °C. Степень солености почвы измеряется косвенным методом, через удельную электропроводимость, диапазон измеряемых значений: 0.0 ... 1.0 Сименс/м.

Сертификация. Согласно международным правилам, каждый полигон ДЗЗ проходит процедуру сертификации и паспортизуется [17].

Паспорт полигона должен включать:

- общие сведения (название, время создания, географическое положение, площадь, перечень тестовых или калибровочных объектов, административно-территориальная и ведомственная принадлежность, позиционность относительно водных объектов, лесовых массивов, антропогенно-природные объекты, типы землепользования и хозяйствования на территории, фитоценоз и т. д.);
- иконическую информацию (топографические карты, цифровая модель рельефа, разновременные аэрокосмические снимки полигона и материалы наземной съемки, геоботаническая карта, фоновые материалы);
- ландшафтную и геологическую информацию (районирование, доминирующие биотопы и их соотношение, поверхностные и приповерхностные отложения, гидрологические и климатические особенности, показатели атмосферы, среднее число дней в году с осадками и туманами, даты формирования и схода снежного покрова, растительный покров и состояние почвы);
- гидрологические характеристики (поверхностные воды, схема гидрографической сети, данные об основных водных объектах, морфометрические характеристики и др.);
- паспорта тестовых и/или калибровочных объектов (координаты, пространственные размеры и однородность, спектральные сигнатуры и другие атрибуты классов).

В Украине общие положения и порядок сертификации изложены в стандартах [18, 19 и др.]. Подобные правила имеются и в других странах.

Выполнение рассмотренных требований к полигонам ДЗЗ является одним из важнейших условий успешной их имплементации в международную сеть наземных средств калибровки бортовых аэрокосмических сенсоров и валидации дистанционных данных.

Направления развития полигонных исследований в контексте создания глобальной системы GEOSS/GMES

Исходя из вышеизложенного, развитие полигонных исследований в Украине предполагает:

- 1) создание и/или обустройство украинских полигонов ДЗЗ, доведение их до уровня международных требований;
- 2) объединение украинских полигонов ДЗЗ в

единую систему получения наземных данных в интересах дистанционных исследований, расширение этой системы на основе привлечения возможностей соседних стран;

3) имплементацию системы полигонов в международную сеть наземных средств калибровки бортовых аэрокосмических сенсоров и валидации дистанционных данных.

Создание и обустройство отечественных полигонов должны способствовать решению наиболее актуальных задач, среди которых — поиск дистанционными методами залежей полезных ископаемых, картографирование, кризисный мониторинг, составление кадастра земельных ресурсов, оценивание и прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, решение экологических и других тематических задач.

Мировой и отечественный опыт решения проблемы обеспечения обработчиков и других пользователей дистанционных данных наземной калибровочно-заключительной информацией свидетельствует, что только система полигонов может обеспечить необходимые массивы данных по природным и антропогенным объектам и процессам в разных физико-географических и климатических условиях, позволит выполнять комплексные исследования на участках «суша-море», изучать процессы энергомассообмена в геологических системах, оценивать и прогнозировать возможные климатические изменения и т. д. Такая система будет способствовать разработке и внедрению «прорывных» технологий ДЗЗ, новых методик обработки и интерпретации данных на основе комплексирования аэрокосмической информации с данными геологических, геофизических, сейсмических и других наблюдений и измерений.

В Украине насчитывается достаточно большое количество ведомств и организаций, которые в процессе выполнения стоящих перед ними задач применяют аэрокосмические методы и в связи с этим испытывают потребность в наличии наземной калибровочно-заключительной информации. Эта потребность будет, несомненно, возрастать в ходе реализации IV-й Национальной космической программы Украины, согласно которой планируется запуск нескольких отечественных спутников ДЗЗ, а также в связи с постоянным ростом общего количества функционирующих спутников ДЗЗ в мире.



Возможная схема распределения полигонов ДЗ3 на территории Украины: 1 — территория Шацкого национального природного парка (Полесье), 2 — полигон «Яворивский», 3 — Винницкий полигон, 4 — полигонные территории в Киевской области, 5, 7, 8, 9, 10, 11 — полигоны на базе филиалов Украинского степного природного заповедника, 6 — лесной полигон (Харьковская область), 12 — биосферный заповедник «Аскания-Нова», 13 — природный заповедник «Еланецкая степь», 14 — Дунайский биосферный заповедник, 15 — морской полигон Морского гидрофизического института (Кацивели, АРК Крым), 16 — наземный полигон «Чауда»

Ряд отечественных организаций располагают ведомственными природными комплексами, которые могут быть использованы для получения наземных данных в интересах ДЗ3. К созданию общей для восточной Европы системы полигонов ДЗ3 проявляют интерес ученые и научные организации соседних с Украиною стран. Поэтому важным представляется объединение усилий заинтересованных организаций и ведомств Украины (Министерство охраны окружающей среды, Государственная служба геодезии, картографии и кадастра, Министерство по чрезвычайным ситуациям, Министерство аграрной политики, Министерство обороны, Национальное космическое агентство, Национальная академия наук Украины и др.), а также зарубежных партнеров с целью создания таких полигонов.

Возможная схема распределения полигонов ДЗ3 на территории Украины представлена на рисунке.

Возможности использования отдельных участков Шацкого национального природного парка в качестве тестовых в настоящее время совместно изучают ученые Физико-механического института им. Карпенко и Научного центра аэрокосмических исследований Земли НАН Украины. Проведены полевые работы, по результатам которых отобраны участки-репрезенты классов, характерных для данного парка, составлено их описание и проведена пространственная привязка, приобретены космические снимки на территорию (Landsat, EOS AM-1 Terra/Aster) и проведена их классификация.

Полигон «Яворивский» расположен во Львов-

ской области, в пределах географического района Розточья и используется в настоящее время Национальным университетом «Львівська політехніка» и Министерством обороны Украины. Однако разнообразие представленных здесь биотопов (лес, кустарники, травяные покрытия, водно-болотистые угодья, искусственные объекты и др.) открывает перспективу его задействования в качестве полигона ДЗЗ.

Полигон вблизи г. Винницы создается Государственной службой геодезии, картографии и кадастра; здесь предполагается решать, кроме задач ДЗЗ, также задачи апробации и сертификации систем дистанционного топографического картографирования для создания и обновления топографических карт и планов масштабов от 1:2000 до 1:50000.

В Киевской области существуют и могут эффективно использоваться сразу несколько территорий в качестве тестовых полигонов ДЗЗ. Среди них — отдельные участки Чернобыльской зоны, в Барышевском районе, военный полигон «Девички» и др.

Полигоны на базе филиалов Украинского степного природного заповедника охватывают практически всю юго-восточную территорию страны, для них существуют достаточно полные базы данных фитоценотического мониторинга, осуществляемого на постоянной основе Институтом ботаники НАН Украины. Подобные исследования проводятся в заповедниках «Аскания-Нова», «Еланецкая степь», Дунайском биосферном заповеднике.

Научно-методическое обеспечение существующего лесного полигона на территории Харьковской области осуществляют ученые Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина.

Учитывая особенности географии и климата Крыма, на его территории целесообразно задействовать два полигона ДЗЗ, один — расположенный на сухе полигон «Чауда» (который мог бы использоваться и как контрольно-калиброчный, и как тестовый), второй — морской полигон в Кацивели.

Уже в процессе создания системы украинских полигонов ДЗЗ должен вестись активный поиск наиболее быстрого и эффективного пути ее включения в международную сеть наземных средств калибровки бортовых аэрокосмических

сенсоров и валидации дистанционных данных глобальной системы GEOSS/GMES. Это позволит решать разнообразные тематические задачи аэрокосмического зондирования в интересах Украины и обеспечивать на паритетной основе необходимой информацией зарубежных потребителей и партнеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сформулированы и обоснованы требования к современным полигонам ДЗЗ, обсуждается проблема создания системы полигонов ДЗЗ в Украине и рассмотрены направления ее развития и имплементации в глобальную систему GEOSS/GMES.

Решение этих задач требует проведения научных исследований, направленных на:

- адаптацию международной системы классификации земных покрытий к территориально-климатическим условиям Украины;
- обоснование оптимального числа и территориального распределения полигонов;
- обоснование размеров тестовых площадок и их геометрических форм с учетом разрешающей способности задействованных бортовых сенсоров;
- создание баз данных для спектральных сигнатур (spectral library) и их актуализация;
- разработку новых методов калибровки бортовых аэрокосмических сенсоров и валидации дистанционных данных;
- разработку методов сертификации технологий решения тематических задач ДЗЗ;
- геоинформационное и картографическое обеспечение.

Условиями успешного выполнения этих исследований и дальнейшего продвижения Украины на мировой рынок геоинформационных и космических услуг являются скорейшее объединение усилий ученых разных специальностей, а также решение выше названных организационных вопросов.

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — К.: Наук. думка, 2006.—358 с.
2. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969.—576 с.

3. Дидух Я. П., Плюта П. Г. Фітоіндикація екологічних факторів. — К.: Наук. думка, 1994.—280 с.
4. ДСТУ-2462-94. Сертифікація. Основні поняття. Терміни та визначення.
5. ДСТУ-3413-96. Система сертифікації УкрСЕПРО. Порядок проведення сертифікації продукції.
6. ДСТУ 4758:2007. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять.
7. Коротаев Г. К., Еремеев В. Н., Кубряков А. И. Глобальная океаническая наблюдательная система Черного моря: научная стратегия и дизайн // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу. — Севастополь: МГІ НАНУ, 2003.—Вип. 2 (7).—С. 5—17.
8. Мовчан Я. И., Каневский В. А., Семибаевский В. Д. и др. Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. — Київ: Наук. думка, 1993.—310 с.
9. Муравський Л. І., Кошовий В. В., Олійник О. Т. и др. Використання геоінформаційних технологій для моніторингу локальних екосистем України // Відбір і обробка інформації.—2006.—Вип. 24 (100).—С. 19—30.
10. Попов М. А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях // Проблемы управления и информатики.—2007.—№ 1.—С. 97—103.
11. Попов М. О., Цимбал Т. В. Правила та процедура сертифікації методик використання даних дистанційного зондування Землі при вирішенні тематичних задач // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 4.—С. 104—112.
12. Anderson J. R., Hardy E. E., Roach J. T., Witmer R. E. Land use and land cover classification system for use with remote sensor data // Geological Survey Professional Paper 964.—Washington: United States Government Printing Office, 1976.—41 p.
13. Barrett E. C., Curtis L. F. Introduction to Environmental Remote Sensing. — Taylor and Francis Group, 1999.—457 p.
14. Buttner G., Feranec J., Jaffrain G., et al. The CORINE Land Cover 2000 Project // EARSeL Proceedings.—2004.—3.—P. 331—346.
15. Global Earth Observation System of Systems (GEOSS). 10-Year Implementation Plan: Reference Document. — Noordwijk: Publ. by ESA Publication Division, 2005.—210 p.
16. McCoy R. M. Field methods in remote sensing. — N. Y.: Guilford Press, 2004.—159 p.
17. Smith J. H., Wickham J. D., Stekhman S. V., Yang L. Impacts of patch size and land-cover heterogeneity on thematic image classification accuracy // Photogramm. Eng. and Remote Sens.—2002.—68, N 1.—P. 65—70.
18. Smith J. R. Radiometric ground truthing for airborne and satellite sensor tests // Proceedings of Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS Conference, 2002. <http://www.isprs.org/commission1/proceedings02/paper>
19. Spaceborne optoelectronic sensors and their radiometric calibration. Terms and definitions. Part 1. Calibration techniques / Eds A. C. Parr, L. K. Isaev. — US, National Institute of Standards and Technology, March 2005.—220 p.

UKRAINIAN FIELD SITES SYSTEM FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH AS AN ELEMENT OF THE GEOSS/GMES GLOBAL SYSTEM

V. I. Lyalko, M. A. Popov

The problem of construction of the Ukrainian field sites system for remote sensing of the Earth is discussed. The requirements for getting reliable and precise field information in-situ, some organizational aspects and possible directions of the international cooperation in this area are considered.

УДК 528.8

В. И. Волошин, А. С. Левенко

Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

Анализ тенденций развития рынка дистанционного зондирования Земли

Представлено 03.09.07

Розглянуто стан ринку космічних послуг в галузі дистанційного зондування Землі і визначено тенденції його розвитку.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ. ПРОГНОЗЫ

По прогнозам начала 2000-х годов (Международная исследовательская организация Teal Group, <http://www.ipclub.ru/space/hotnews>) в 2001—2010 гг. может быть выведено на околоземную орбиту 2160 космических аппаратов различного назначения.

Используемая Teal Group для расчетов модель предполагала запуск космических аппаратов (КА) в интересах приблизительно 150 клиентов из 50 стран. На долю 21 заказчика, из которых 11 — США, прогнозировалось 25 % рынка космических запусков. В случае изготовления спутников ведущими американскими аэрокосмическими компаниями «Boeing Company», «Lockheed Martin» и «Orbital Science Corporation» — на долю лидеров рынка прогнозировалось до 75 % всех КА. Предполагалось, что минимум треть всех КА будут американскими, из них половина — по государственным заказам.

По прогнозу 79 % всех полезных грузов будут выведены на околоземную орбиту с помощью ракет-носителей: европейских «Ariane», американских «DELTA» и «Atlas», российских «Космос», «Союз», «Протон», «Рокот», китайских «Chang Zheng», японских H-2A, украинских «Циклон» и «Днепр», а также с помощью кораблей многоразового использования системы «Space Shuttle».

Среди выведенных КА 44 % должны были составлять спутники связи, однако уже в начале 2000-х годов треть потенциальных заказчиков отказалась от планов запуска спутников связи, вместе с тем количество желающих вывести малые аппараты весом от 0.1 до 100 кг увеличилось на 68 %. Среди них сотни небольших спутников Национального разведывательного управления США, 100-килограммовые спутники Techsat21s, 80-килограммовые спутники системы спутникового наблюдения типа GANDERS, 10-килограммовые спутники американского космического ведомства типа MCM («Magnetosphere Constellation Mission»), однокилограммовые спутники типа «CybeSat», разработанные в Аризонском университете и другие.

Тенденция увеличения сектора пусков малых КА оценена Институтом космических исследований Украины НАНУ и НКАУ [2]. При этом отмечалось, что в начале 1990-х годов стоимость одной космической миссии составляла в среднем 553 млн долл., к 2001 г. составила 165 млн долл., к 2004 г. прогнозировалась стоимость 50 млн долл. Отмеченная тенденция снижения стоимости обуславливается и количеством ежегодных выводов в космическое пространство КА: для NASA в 1994 г. — 11 запусков, в 1999 г. — 28. Как один из путей снижения стоимости и времени подготовки космических миссий рассмотрена возможность использовать дешевые системы многократного использования пусковой

установки и уменьшения веса КА. Заметна тенденция снижения веса разрабатываемых спутников: в начале 1990-х годов вес КА составлял несколько тонн, к 2001 г. уменьшился до нескольких сотен килограмм.

В настоящее время КА могут классифицироваться по весу:

- большие космические корабли (500—10000 кг);
- мини-спутники (100—500 кг);
- микроспутники (10—100 кг);
- наноспутники (1—10 кг);
- пикоспутники (0.1—1 кг);
- фемтоспутники (менее 0.1 кг).

Тенденция снижения веса и стоимости КА диктуется и тенденцией уменьшения финансирования космических программ в различных государствах с 1992 г. Кроме того, появилась ориентация на стратегию изготовления унифицированных космических аппаратов с предельно низкой стоимостью (середина 1980-х годов) — для выполнения миссии можно выводить в космическое пространство не один большой и дорогой КА, а множество малых и дешевых, объединенных в спутниковую группировку. Спутниковые группировки (распределенные спутниковые системы) из унифицированных спутников могут использоваться для любых целей. Тенденция вывода малых спутников опробована в 1990–1998 гг. — многими странами были запущены пико- и наноспутники: США, Германия, Россия, Швеция, Великобритания, Мексика и др.

Прогнозировалось количество КА, выводимых на орбиту по годам:

- 2001 г. — 226,
- 2002 г. — 311,
- 2003 г. — 293 (запущено различных объектов 249),
- 2004 г. — 194 (запущено различных объектов 130),
- 2005 г. — 310 (запущено различных объектов 99),
- 2006 г. — 282 (запущено различных объектов 180),
- 2007 г. — 181,
- 2008 г. — 131,
- 2009 г. — 189,
- 2010 г. — 43.

В то же время уже в 2002 г. по оценке американской аэрокосмической корпорации «Бо-

инг» в течение 2002—2007 гг. не прогнозировалось увеличение рынка коммерческого использования космического пространства при переизбытке ракет, предлагаемых для запуска коммерческих грузов, и жесточайшей ценовой конкуренции, что вызвано высокой стоимостью пусков (<http://www.defense-ua.com/rus/news/?id=2218&prn=yes>).

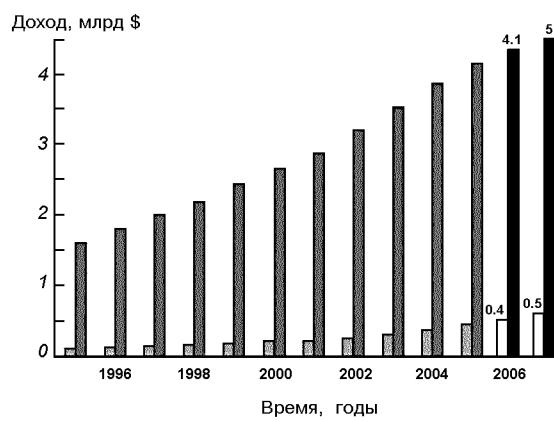
ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Следует отметить, что ряд стран лидирует в развитии космических программ, и это подтверждается объемами ежегодного финансирования космической деятельности [3]:

- США — 57.2 млрд долл. (бюджет Пентагона на космические программы 41 млрд долл., бюджет NASA 16.2 млрд долл.);
- Европейский Союз — 4 млрд долл.;
- Россия — 20.33 млрд рублей (767 млн долл.), из них 16 % на научные исследования;
- Индия — 700 млн долл.;
- Китай — 500 млн долл.

В целом около 4 % всех мировых затрат приходится на космическую отрасль, в них 8 % составляют расходы NASA (США). Мировые затраты на космическую отрасль составляют около 200 млрд долл.

Выручка от частных и правительственные космических проектов в мире в 2006 г. составила



Доходы мирового рынка данных ДЗЗ. Темно-серый и светло-серый цвет — соответственно данные аэросъемки и космической (по данным Frost and Sullivan, 1999); черный и белый — прогнозные оценки

Таблица 1. Сравнительные характеристики спутников ДЗЗ в групповом запуске 27 октября 2005 г., РН «Космос-3М»

| КА | Разработчик | Масса, кг | Разрешение, м |
|-----------|--------------------|-----------|-------------------------|
| TOPSAT | QinetiQ, SSTL | 120 | 2.8 / 5.7 (одна камера) |
| BEIJING-1 | SSTL | 150 | 4 / 32 (две камеры) |
| SINAH-1 | Оптекс, КБ «Полет» | 180 | 50 / 250 (две камеры) |

180 млрд долл., из них на коммерческие спутники пришлось 110 млрд долл. выручки, при этом около 80 млрд долл. было потрачено на производство и обслуживание спутников и стартовых комплексов. На рисунке представлен прогноз роста ежегодных доходов мирового рынка данных ДЗЗ.

Уже практикуется запуск коммерческих КА ДЗЗ со сверхвысокой разрешающей способностью (до 0.25 м). По мнению аналитиков появление спутников ДЗЗ сверхвысокого разрешения будет нацелено на перераспределение доходов между рынками материалов аэросъемки и космических данных в пользу последних. Согласно оценкам, мировой рынок данных аэросъемки составляет не менее 4 млрд долл., а рынок космических материалов — менее 500 млн долл. Улучшение разрешения до 0.25 м повысит значимость коммерческой видовой информации и для военных потребителей.

Подтверждается прогноз создания и вывода на орбиту малых дешевых спутников: британский мини-спутник «TopSat» передал первые космические снимки на наземную станцию QinetiQ's West Freugh 7 декабря 2005 г. (разрешение 2.8 м, масса 120 кг, общая стоимость проекта менее 24.9 млн долл.). Спутник «TopSat» запущен в октябре 2005 г. с российского космодрома Плесецк. Мини-аппарат позволяет получать снимки высокого разрешения, стоимость этих снимков в пять раз ниже, чем стоимость аналогичных снимков, полученных с больших спутников. По сочетанию важнейших параметров «стоимость — масса — пространственное разрешение» мини-спутник «TopSat» стал мировым рекордсменом. Масса ныне действующих спутников со съемочной аппаратурой с разрешением 2-3 м составляет от 1500 кг (индийский КА IRS-P5 CARTOSAT-1 с двухкамерной стереосистемой) до 740 кг (тайваньский КА ROCSAT-2 или FORMOSAT-2 с разрешением 2 м / 8 м). Наиболее интересные особенности КА «TopSat»

— высокая степень автономности программирования и высокая оперативность получения заказа на собственную мобильную станцию.

Более совершенными с точки зрения технологий доступа и съемки пока являются мини-спутники израильской коммерческой программы: EROS-A (масса до 250 кг, разрешение до 1 м в специальном режиме съемки) и EROS-B (масса до 250 кг, разрешение до 0.7 м, запуск в 2006 г.). При высокой стоимости эти аппараты рассчитаны на функционирование в течение 10 лет.

Сравнительные характеристики КА TOPSAT приведены в табл. 1 (<http://www.gisa.ru>). В 2005 г. запущено 14 спутников ДЗЗ (семь военных, четыре коммерческих и гражданских, три — метеоспутники). По оценке начала 2000-х гг. прогнозировался вывод 310 КА, всего реально — 99 КА. Прослеживается явная тенденция к снижению количества выводимых на орбиту КА. На 2005 г. приходился прогнозируемый пик запусков спутников. Спутники ДЗЗ в 2005 г. составляют 10.8 % от общего количества выведенных на орбиту КА.

В 2006 г. в мире успешно выведено на орбиту 15 спутников с аппаратурой съемки Земли из космоса различного назначения (табл. 2). По прогнозам могло быть выведено 282 КА, реально — 180. Спутники ДЗЗ в 2006 г. составляют 8.3 % от общего количества выведенных на орбиту КА.

Результаты вывода коммерческих и гражданских КА на околоземную орбиту и вероятная перспектива пусков 2007 г. оценены специалистами российской компании ИТЦ «СканЭкс»: в 2006 г. подтвердилась тенденция ускоренного развития рынка материалов космической съемки метрового и субметрового разрешения. Сразу три страны запустили такие спутники — Израиль, Россия и Корея.

В 2007 г. в разных странах выводились на орбиту гражданские и коммерческие спутники

Таблица 2. Запуск спутников ДЗЗ в 2006 г.

| Наименование КА | Страна / оператор | Назначение | Дата | Полигон / ракета | Аппаратура / разрешение |
|---------------------------|--|--------------------------------------|-------|-----------------------------|--|
| ALOS (Daichi) | Япония / JAXA | Глобальная комплексная съемка Земли | 24.01 | Tanegashima / H-2A | PCA (1—100 м) PRISM (2.5 м) AVNIR (10 м) |
| MTSat-2 | Япония / JAXA, JMA | Метеосъемка с геостационарной орбиты | 18.02 | Tanegashima / H-2A | 1—4 км |
| EROS-B | Израиль / ImageSat Int. | Съемка со сверхвысоким разрешением | 25.04 | Свободный / Старт-1 | 0.7 м |
| Яогань-1 (YW-1) | Китай | Съемка с PCA военного назначения | 26.04 | Taiyuan / CZ-4B | несколько метров |
| Космос-2420 | Россия / космические войска | Военное назначение | 03.05 | Плесецк / Союз-У | менее 1 м |
| GOES-N | США / NOAA | Метеосъемка с геостационарной орбиты | 24.05 | Canaveral / DELTA-4M+ | 1—4 км |
| Ресурс-ДК | Россия / Федеральное космическое агентство | Съемка высокого разрешения | 15.06 | Байконур / Союз-У | 1—3 м |
| KompSat-2 (Arirang-2) | Республика Корея | Съемка высокого разрешения | 28.07 | Плесецк / Рокот — Бриз КМ | 1—4 м |
| IGS-O2 | Япония / | Военное назначение | 11.09 | Tanegashima / H-2A | менее 1 м |
| Космос-2423 | Россия / космические войска | Военное назначение | 14.09 | Байконур / Союз-У | менее 1 м |
| METEOP-1 | Европа / Eumetsat | Метеосъемка с низкой орбиты | 19.10 | Байконур / Союз-2.1A | 1—4 км |
| Block-5D3 DMSP USA-191 | США / USAF NOAA | Метеосъемка с низкой орбиты | 04.11 | Vandenberg / Deita-4M | 0.6—2 км |
| FY-2D | Китай / CMA | Метеосъемка с геостационарной орбиты | 08.12 | Xichang / CZ-3A | 1—4 км |
| TacSat-2 | США / USAF | Военное назначение | 16.12 | Wallops Island / Minotaur-1 | 0.8—1 м |
| SAR-Lupe-1 | Германия | Военное назначение | 19.12 | Плесецк / Космос-3М | 0.7—1 м |

ДЗЗ с аппаратурой съемки Земли различного пространственного разрешения (табл. 3).

Главной тенденцией по-прежнему останется ускоренное развитие мирового рынка материалов космической съемки высокого и сверхвысокого разрешения. Среди заявленных запусков два спутника США — «GeoEye-1» и «WorldView-1» с разрешением 0.4—0.5 м. Спутник «GeoEye-1» обладает сверхвысокой производительностью аппаратуры многоспектральной съемки — до 700 тыс. км/сутки и вместе с КА «WorldView-1» будет стимулировать дальнейшее развитие рынка данных и ГИС.

В результате реализации даже части заявленных запусков в 2007 г. с учетом выхода на

расчетную производительность новых спутников ожидается дальнейшее снижение цен на рынке ДЗЗ из-за роста конкуренции и ускоренное развитие рынка данных высокого и сверхвысокого разрешения.

К 2008 г. планируется запуск более 66 спутников ДЗЗ различного разрешения. Маркетинговая стратегия большинства западных программ по созданию коммерческих систем ДЗЗ основывается на продвижении в область пространственного разрешения 0.5—1 м. Потребности рынка в 2006 г. для изображений с разрешением менее 1 м составляли 65 %, 1 м — 25 %, 2-3 м — 7 %, хуже 5 м — 3 % (<http://www.inno.ru/press/articles/21352/>).

Таблица 3. Прогноз пусков и запуски некоторых спутников ДЗЗ в 2007 г.

| Наименование КА | Назначение КА | Страна / оператор | Полигон / носитель | Дополнительные данные |
|---------------------|---|-------------------------------|--|---|
| Cartosat-2 | съемка высокого разрешения | Индия / ISRO | Sriharikota Island / PSLV-C7 | запущен 10.01.2007 г., разрешение менее 1 м |
| LAPAN-TUBSAT | технологии оперативной съемки высокого и среднего разрешения | Индонезия / LAPAN | Sriharikota Island / PSLV-C7 | запущен 10.01.2007 г., разрешение 5 м и 200 м, микроспутник 57 кг |
| Pehuensat-1 | ДЗЗ | Аргентина | Sriharikota Island / PSLV-C7 | запущен 10.01.2007 г. |
| RADARSAT-2 | комерческая съемка с PCA высокого разрешения | Канада / MDA, CSA | Байконур / Союз-ФГ | запущен 14.12..2007 г., разрешение 3—100 м, PCA С-диапазона |
| Egyptsat-1 | съемка высокого разрешения | Египет / NARSS | Байконур / Днепр | запущен 17.04.2007 г., разрешение 30—50 м, миниспутник 157 кг |
| TerraSAR-X | комерческая съемка с PCA метрового разрешения | Германия / Infoterra, DLR | Байконур / Днепр | запущен 15.06.2007 г., разрешение до 1 м, PCA X-диапазона |
| Sumbandila | съемка высокого разрешения | ЮАР / SunSpace | БМРЛ в Баренцевом море / Штиль | разрешение 6.5 м, микроспутник 60 кг |
| GeoEye-1 | комерческая и военная съемка сверхвысокого разрешения | США / NGA, GeoEye | Vandenberg / DELTA-2 | 1-й КА двойного назначения с разрешением 0.4 м (запуск перенесен на 2008 г.) |
| ThEOS | комерческая съемка высокого разрешения, отслеживание наркотрафика | Таиланд / GISTDA | Домбровский, Оренбургская обл. РФ/ Днепр | разрешение до 2 м (запуск перенесен на 2008 г.) |
| WorldView-1 | комерческая и военная съемка сверхвысокого разрешения | США / NGA, DigitalGlobe | Vandenberg / DELTA-2 | запущен 18.09.2007 г., разрешение 0.5 м в панхроматическом режиме |
| CBERS-2B | съемка высокого и среднего разрешения | Китай / CAST, Бразилия / INPE | Taiyuan / Chang Zheng-4B | запущен 19.09.2007 г., первый коммерческий КА ДЗЗ Китая и Бразилии, разрешение 5 м и 20 м |
| RazakSat (MACSAT) | съемка высокого разрешения | Малайзия / ATSB | RTS / Falkon-1 | разрешение 2.5 м, миниспутник (запуск перенесен на 2008 г.) |
| Thai-Paht-2 | съемка высокого разрешения | Малайзия | Плесецк / Космос-3М | миниспутник SSTL |
| Vietnam DMC VNSat-1 | съемка среднего разрешения | Вьетнам | Плесецк / Космос-3М | для системы DMC, разрешение 32 м, миниспутник |
| Rapid Eye | съемка высокого разрешения | Германия / RapidEye AG | Домбровский / Днепр | разрешение 6 м, 5 миниспутников (запуск перенесен на 2008 г.) |
| Cosmo SkyMed-1 | съемка с PCA высокого разрешения | Италия / ISA, MO | Vandenberg / DELTA - 2 | запущен 08.06.2007 г. КА 2-го назначения с PCA разрешением менее 1 м |
| Tacsat-1 | эксперименты по видовой разведке | США / DARPA | Vandenberg / Falkon-1 | запущен 19.03.2007 г., разрешение 70 м и 850 м |
| SAR-Lupe-2 | видовая разведка с PCA | Германия / MO | Плесецк / Космос-3М | запущен 02.07.2007 г. 2-й КА в системе из 5 спутников |
| SAR-Lupe-3 | видовая разведка с PCA | Германия / MO | Плесецк / Космос-3М | Запущен 01.11.2007 г. 3-й КА в системе из 5 спутников |

Окончание табл. 3

| Наименование КА | Назначение КА | Страна / оператор | Полигон / носитель | Дополнительные данные |
|--|------------------------|-------------------|--------------------------|--|
| IGS-3b (IGS-2R) | видовая разведка с РСА | Япония / МО | Tanegashima / H-2A | запущен 24.02.2007 г. 2 спутника РСА с разрешением около 1 м завершено построение разведывательной группировки радарных спутников |
| COSMO-2 | видовая разведка с РСА | Италия | Vandenberg / DELTA-2 | запущен 09.12.2007 г. второй из группировки из 4 КА РСА с разрешением менее 1 м |
| Yaogan 3 | ДЗЗ | Китай | Taiyuan / Chang Zheng-4C | запущен 11.11.2007 г. |
| Ofeq-7 | Видовая разведка | Израиль | Palmachim / Shavit | запущен 10.06.2007 г. |
| Yaogan-II | ДЗЗ | Китай | Jiuquan / Chang Zheng-2D | запущен 25.05.2007 г. |
| SaudiSat-3 | ДЗЗ | Саудовская Аравия | Байконур / Днепр | запущен 17.04.2007 г., разрешение 15 м, министупник 200 кг |
| CubeSat PolySat-3 PolySat-4 CAPE-1 AeroCube-2 CSTB-1 MAST | | США | Байконур / Днепр | запущены 17.04.2007 г., nanoспутники |
| Libertad-1 | | Колумбия | Байконур / Днепр | Запущены 17.04.2007 г. nano-путники |
| Haiyang-1B | мониторинг океанов | Китай | Taiyuan / Chang Zheng-2C | Запущены 11.04.2007 г. второй спутник такого типа |

Этот рынок доступен Украине. Кроме этого, наращиваются возможности бесплатного использования космических снимков в интернете:

— компания *GlobeXplorer* предоставила Microsoft новую серию аэроснимков высокого разрешения с покрытием более 409997 кв. миль территории США для использования в *Virtual Earth* (maps.live.com и www.msn.com);

— национальная метеослужба агентства NOAA планирует с 1 октября 2007 г. ввести в строй новую систему мониторинга ураганов и предупреждения о таких опасных природных явлениях, как торнадо, сильные грозы, наводнения и морские штормы (www.noaanews.noaa.gov);

— исследовательский центр EROS Геологической службы США (USGS) в сотрудничестве с агентством NASA готовит к размещению в интернете ресурса *TerraLook*, который содержит коллекцию JPEG-файлов, созданных из архи-

вных снимков ASTER, Landsat и космических ортофотоснимков. Все снимки имеют географическую привязку, близкую к натуральным цветам раскраску и снабжены стандартизованными метаданными. Коллекция *TerraLook* будет в этом месяце размещена на сайте glovis.usgs.gov. Выбранные снимки можно бесплатно копировать в виде zip-файлов (www.gisdevelopment.net/news/viewn.asp?id=GIS:N_ntvxfwsah — <http://www.gisa.ru/34773.html>).

— в рамках запланированного на 2008 г. «Международного года планеты Земля» ООН разрабатывает проект «Прозрачный мир» (*Transparent Earth*). Целью является сбор геологических данных из всех стран и создание единой базы по геологии земной сушки с детальностью, соответствующей миллионному масштабу, с обеспечением возможности накладки аэрокосмических снимков на геологические карты. Ожидается, что завершен он будет к 2011 г.

Таблица 4. Прогнозы запусков некоторых спутников ДЗЗ в 2008 г.

| Наименование КА | Назначение КА | Страна / оператор | Полигон / носитель | Дополнительные данные |
|--------------------------------|--|---|--|---|
| GeoEye-1 | коммерческая и военная съемка сверхвысокого разрешения | США / NGA, GeoEye | Vandenberg / DELTA-2 | 1-й КА двойного назначения с разрешением 0.4 м |
| RazakSat (MACSAT) | съемка высокого разрешения | Малайзия / ATSB | RTS / Falcon-1 | разрешение 2.5 м, миниспутник |
| Rapid Eye | съемка высокого разрешения | Германия / RapidEye AG | Домбаровский, Оренбургская обл. РФ / Днепр | разрешение 6 м, 5 миниспутников |
| WorldView-2 | коммерческая и военная съемка сверхвысокого разрешения | США / DigitalGlobe | Vandenberg / DELTA-2 | разрешение 0.46 м в панхроматическом режиме и 1.8 м в мультиспектральном режиме при съемке в надир |
| ThEOS | коммерческая съемка высокого разрешения, отслеживание наркотрафика | Таиланд / GISTDA | Домбаровский, Оренбургская обл. РФ / Днепр | разрешение до 2 м |
| LandSat-5* | ДЗЗ | США | Продление эксплуатации после перерыва в эксплуатации (25-й год эксплуатации) | пространственное разрешение 30 м в 6 спектральных каналах видимого, ближнего и среднего участках ИК-спектра и 120 м в длинноволновом участке ИК-спектра |
| китайский спутник | экологический мониторинг | Китай | | нет данных |
| Гочи | ДЗЗ | Европейское космическое агентство (ЕКА) | Плесецк / Рокот | нет данных |
| Эсмос | ДЗЗ, мониторинг морей | ЕКА | Плесецк / Рокот | нет данных |
| European Student Earth Orbiter | | Студенческое Интернет-сообщество SSETI | Kourou / Ariane 5 | миниспутник массой 120 кг |
| Микроспутник ИКИ РАН | исследование глобального потепления | Институт космических исследований Российской академии наук (РАН) | | микроспутник массой до 50 кг, исследования содержания двуокиси углерода над Сибирью |
| DubaiSat-1 | | ОАЭ, Emirates Institution for Advanced Science and Technology EIAST | Домбаровский, Оренбургская обл. РФ / Днепр | научный спутник |
| SpaceDev | | США | RTS / Falcon 1 | малобюджетный спутник |
| Гелиос-2В | военный спутник видовой разведки | Франция, Италия, Испания | Kourou / Союз | система спутников (1, 2, 2A, 2B), разрешение в панхроматическом режиме 0.5—1 м, многоспектральные изображения с разрешением 4 м, канал ИК-диапазона для ночной съемки |

Окончание табл. 4

| Наименование КА | Назначение КА | Страна / оператор | Полигон / носитель | Дополнительные данные |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------------|---|
| ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПУТНИКИ С РСА | | | | |
| SAR-Lupe-4 | видовая разведка с РСА | Германия / МО | Плесецк / Космос-3М | 4-й КА в системе из 5 спутников |
| SAR-Lupe-5 | видовая разведка с РСА | Германия / МО | Плесецк / Космос-3М | 5-й КА в системе из 5 спутников |
| COSMO-3 | радарное зондирование Земли | Италия | Vandenberg / DELTA-2 | второй из группировки из 4 КА РСА с разрешением менее 1 м |
| TecSAR/ Polaris | | Израиль | | РСА с разрешением 1 м |
| Kompsat-5 | видовая разведка и ДЗЗ с РСА | Республика Корея | | РСА с разрешением 1 м |
| Кондор-Э | видовая разведка и ДЗЗ с РСА | Россия | Байконур / Стrela | РСА с разрешением 1 м |
| HJ-1C | ДЗЗ | Китай | | РСА с разрешением 10-20 м |
| Эрос-С | видовая разведка с РСА | | Свободный, Амурская обл. РФ | РСА с разрешением 0.82 м |

* Снимки КА LandSat-5 можно увидеть в онлайновом доступе на сайте службы USGS (<http://earthnow.usgs.gov>).

(www.gisdevelopment.net/news/viewn.asp?id=GIS:N_aidlztcbvn и www.hindu.com — <http://www.gisa.ru/34785.html>).

Из приведенного перечня, который может быть дополнен, можно сделать вывод: пришло время глобализации в сфере ДЗЗ. А это означает, что значительная часть задач государственного управления, обеспечения интересов отдельного гражданина, часть коммерческих задач могут решаться в любой стране мира, независимо от того, есть ли у нее собственные спутники.

В настоящее время к таким странам относятся и Украина. Условия применения данных ДЗЗ в Украине созданы мировым сообществом, мы имеем возможность выполнить задачи национальной космической программы, опираясь на мировое информационное пространство.

В табл. 4 приведен прогноз запуска некоторых спутников ДЗЗ в 2008 г. Можно отметить стабильную тенденцию использования спутников с радиолокационными системами наблюдений. Формируются по меньшей мере пять орбитальных группировок ДЗЗ.

По предварительным оценкам к 2012 г. емкость рынка космических снимков превысит 6 млрд долл. Ежегодный рост объема продаж продукции ДЗЗ сейчас составляет 15—20 %. До 2003 г. широкое распространение данных косми-

ческого мониторинга Земли сдерживалось их относительно высокой стоимостью. После стандартной минимальной обработки цена на космические снимки составляла примерно 20—30 долл. за 1 км² отображенной поверхности Земли, что сдерживало спрос со стороны частных компаний.

Прорыв в этой отрасли произошел в 2004 г., когда ведущие компании объявили о резком снижении цены за спутниковые снимки с разрешением до 1 м: до семи долларов за 1 км².

Снимки с наилучшим на сегодняшний день пространственным разрешением до 0.61 см с коммерческого спутника ДЗЗ QuickBird стоят до 11 долл. за 1 км². Значительно снизилась и минимальная площадь заказа — до 10 км² (<http://www.inno.ru/press/articles/21352/>).

ВЫВОДЫ

Необходимо наращивать международное сотрудничество, которое постоянно развивается [4]. Это даст возможность сэкономить значительные средства и не отстать от мировых процессов развития общества. Прежде всего — это экономия на изготовлении КА и их запуске.

Известно, что стоимость ежегодно изготавли-

ваемых в мире спутников ДЗЗ находится в пределах от 848 млн долл. до 3.2 млрд долл. [Развитие мирового рынка спутниковых геоданных: прогнозы — <http://:CNews>, 31 мая 2006 г.]. Средняя стоимость геостационарного спутника обзора Земли составляет 179 млн долл., а низкоорбитального спутника ДЗЗ — 112 млн долл.

Основные принципы создания систем отечественных спутников ДЗЗ рассмотрены в работе [1]. Актуальной может быть разработка мало-бюджетных спутников для отечественной группировки ДЗЗ.

Но даже не имея собственных спутников, Украина способна участвовать в мировом рынке использования данных ДЗЗ. Основными областями применения космических геоданных в ближайшем будущем в мире станут информационное обеспечение госструктур, сельскохозяйственной отрасли и инженерно-строительных работ, в дальнейшем начнет более активно развиваться использование данных ДЗЗ для планирования городской застройки, устойчивого развития регионов, в природоохранной деятельности, обеспечении поисково-спасательных операций и др.

1. Бушуев Е. И., Волошин В. И., Левенко А. С. Капустин Е. И., Стефанишин Я. И. Подходы к построению и эксплуатации национальной орбитальной группировки спутников ДЗЗ // Космічна наука і технологія.—2008.—14, № 2.—С. 32—41.
2. Клименко Ю. А., Черемных О. К., Яценко В. А., Маслова Н. В. Состояние и перспективы создания микроспутников новых поколений: новые материалы, нанотехнология и архитектура // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 2/3.—С. 53—65.
3. Космические проекты в 2005 году принесли прибыли на \$180 млрд // Аэрокосмический вестник.—2006.—1—30 ноября, № 41—44/(283/286).—С. 45.
4. Кузнецов Е. И., Зубко В. П., Заець С. В. Міжнародна координація діяльності супутникового спостереження Землі // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 26—34.

ANALYSIS OF TENDENCIES OF EARTH'S REMOTE SENSING MARKET DEVELOPMENT

V. I. Voloshin, A. S. Levenko

The condition of the market of space services as to Earth's remote sensing is considered and some tendencies of its development are determined.

УДК 528.811

С. А. Станкевич

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Інформативність оптических діапазонів дистанціонного наблюдення Землі из космоса: практические алгоритмы

Представлено 03.09.07

Описано алгоритми, що дозволяють практично оцінювати інформативність оптических діапазонів дистанційного спостереження Землі з космосу з урахуванням спектральних характеристик типових об'єктів ландшафту та атмосфери. Наведено кількісні оцінки інформативності оптических спектральних діапазонів при вирішенні уніфікованих тематичних задач, що може бути корисним при розробленні нових і конфігуруванні існуючих супутниковых сенсорів.

Оценивание информативности спектральных диапазонов регистрации электромагнитного излучения Земли важно при разработке новых образцов сенсоров дистанционного наблюдения и на этапе планирования космической съемки для рационального выбора состава и характеристик спектральных каналов бортовой аппаратуры с возможной минимизацией финансовых затрат [12].

Оценка информативности космической системы наблюдения не тождественна вероятностным характеристикам решения конкретных тематических задач. Особенность оценки информативности состоит в существенно приближенном характере, поскольку при этом априорная информация ограничивается, как правило, только общими усредненными характеристиками объектов наблюдения и условий съемки, причем часто в неполном объеме и с определенными допущениями [5].

Тематические задачи дистанционного наблюдения различаются в общем случае практической целью, ради достижения которой они решаются. Это может быть выявление тех или иных

объектов (или явлений, процессов), определение их качественных и измерение количественных характеристик, создание тематических карт их пространственного распределения, прогнозирование развития наблюдаемых ситуаций, принятие различных научных, управлеченческих или специальных решений. Поскольку сама технология дистанционного наблюдения основана на регистрации электромагнитного излучения, то определяющими при решении тематических задач являются спектральные характеристики объектов съемки, а точнее — их типовых классов, а также принципиальные возможности их обнаружения и разделения при помощи дистанционных сенсоров [9].

Полный спектральный диапазон электромагнитного излучения дистанционного наблюдения простирается от ультрафиолетового до радиоволнового и в соответствии с физическими свойствами излучения подразделяется на оптический (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный), микроволновой и радиолокационный. Основная часть информации об объектах дистанционного наблюдения поступает с оптических каналов

регистрации. Разные объекты имеют неодинаковые отражательные и излучательные характеристики, поэтому информативность спектральных диапазонов будет различаться.

Исходным для количественной оценки информативности должен быть перечень решаемых задач дистанционного наблюдения Земли с указанием списка типовых объектов (лесные массивы, сельскохозяйственные насаждения, водные поверхности, урбанизированные территории, зоны чрезвычайных ситуаций) для каждой задачи. В наиболее часто используемые перечни унифицированных тематических задач дистанционного наблюдения включаются геология — поиск полезных ископаемых и энергоносителей, изучение геотектонических процессов, анализ горных пород; землепользование — картографирование, земельный кадастр, изучение урбанизированных и промышленных территорий; сельское хозяйство — инвентаризация угодий, прогнозирование урожая, оценка почв и агроресурсов; экосистемы и лесное хозяйство — измерение биомассы и разнообразия экосистем, запасов и состояния лесов, оценка экологического неблагополучия и убытков; океанография и наблюдение побережья — изучение океанских ресурсов, выявление загрязнений и их источников; контроль водных ресурсов — гидрологическое районирование, оценка гидроресурсов, их экологического состояния и загрязненности; метеорология и климатология — анализ ледово-снегового покрова, профилирование и контроль загрязненности атмосферы, наблюдение облачности, прогнозирование климатических изменений; мониторинг чрезвычайных ситуаций — моделирование природных и техногенных катастроф, наблюдение зон бедствий, оценка убытков [1].

Количественно информативность λ -го спектрального диапазона $C_1(\lambda)$ наблюдения или комбинации m спектральных диапазонов $C_m(\lambda)$ определяется объемом информации, полезной в контексте решаемой тематической задачи. В этом смысле информативность принципиально отличается от понятия информационной емкости C_0 (шенноновской пропускной способности) спектрального диапазона. Последняя на практике определяется числом элементов пространственного разрешения n и количеством градаций каждого элемента w [3]:

$$C_0 = n \log_2 w. \quad (1)$$

Число элементов разрешения одномерных дискретных изображений обратно пропорционально квадрату удвоенного размера эффективного разрешения r , а количество градаций определяется отношением «сигнал — шум» ψ в канале регистрации [7]. Поскольку размер d_0 характерного подлежащего различию элемента объекта наблюдения одинаков во всех спектральных диапазонах, то на практике оценку информативности можно привязать к нему, а количество информативности оценивать в битах, приходящихся на один пиксель дискретного изображения d . Для одномерного изображения $r \geq d$ и $w \leq 1 + \psi$.

С практической точки зрения решение тематических задач дистанционного наблюдения Земли из космоса в оптическом диапазоне сводится к классификации соответствующих панхроматических, многоспектральных или синтезированных цифровых изображений, а классификация, в свою очередь, — к разделению классов объектов в соответствующем признаковом пространстве. Поэтому для практического оценивания информативности спектральных диапазонов перечень унифицированных задач дистанционного наблюдения следует преобразовать в перечень типовых объектов наблюдения, попарное различие которых требуется для их решения. Каждый типовой объект при этом полностью описывается своей спектральной характеристикой во всем наборе оцениваемых спектральных диапазонов. Полная информативность набора из s объектов составляет [9]

$$C(\lambda) = \sum_{j=1, q=1}^s C_{jq}(\lambda). \quad (2)$$

Информативность для пары объектов j, q со спектральными характеристиками $E_j(\lambda)$ и $E_q(\lambda)$ может быть описана соотношением

$$C_{jq}(\lambda) = \frac{D_{jq}(\lambda)}{4r_{jq}(\lambda)} \log_2(1 + \psi_{jq}(\lambda)). \quad (3)$$

Здесь $D_{jq}(\lambda)$ — взаимная информация Кульбака-Лейблера между вероятностными распределениями спектральных сигналов объектов $f_j(\lambda)$ и $f_q(\lambda)$, $r_{jq}(\lambda)$ — эффективное пространственное разрешение относительно объектов j и q , $\psi_{jq}(\lambda)$

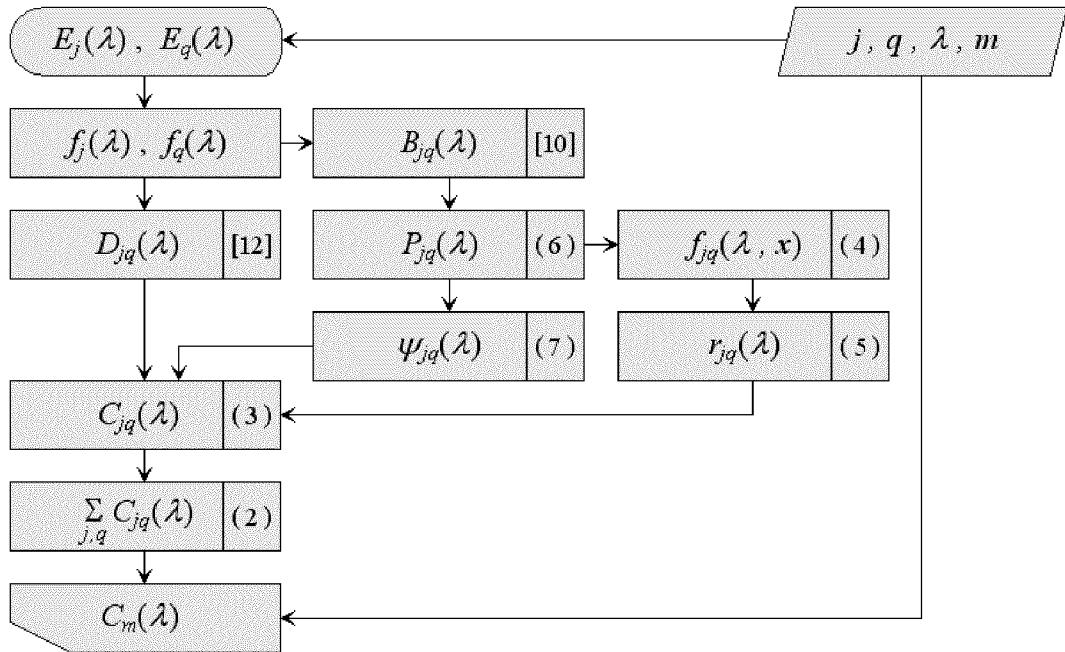


Рис. 1. Схема алгоритма оценки информативности оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса

— эффективное отношение «сигнал — шум» [8].

Прядок определения как пространственного разрешения, так и отношения «сигнал-шум» достаточно разработан и не вызывает трудностей для одномерных — панхроматических или зональных дистанционных изображений [2], однако для многоспектральных и тем более гиперспектральных изображений сами эти понятия становятся неопределенными.

Базовой основой устранения неопределенностей при расчетах эффективного пространственного разрешения и эффективного отношения «сигнал-шум» может стать принцип эквивалентности разделения многомерных радиометрических полей, соответствующих разным объектам на многомерных дистанционных изображениях. Принцип эквивалентности превозглашает равенство вероятностей правильного разделения объектов на многомерном и эквивалентном ему одномерном дискретных изображениях, при этом эквивалентное пространственное разрешение описывает пространственное, а эквивалентное отношение «сигнал — шум» — радиометрическое распределение данной вероятности [8]. Если известно пространственное распределение

$P_{jq}(\lambda, x)$ вероятности правильного разделения спектральных сигналов $E_j(\lambda, x)$ и $E_q(\lambda, x)$, то можно построить распределение плотности этой вероятности $f_{jq}(\lambda, x)$ как

$$f_{jq}(\lambda, x) = \frac{\partial P_{jq}(\lambda, x)}{\partial x}, \quad (4)$$

и далее найти эквивалентное пространственное разрешение r из условия

$$\int_x^{x+r} f(x) dx \equiv \alpha, \quad (5)$$

где α — заданный порог вероятности (уровень значимости).

Вероятность $P_{jq}(\lambda)$ может быть найдена как [13]

$$P_{jq}(\lambda) \cong 1 - \exp(-B_{jq}(\lambda)), \quad (6)$$

где $B_{jq}(\lambda)$ — статистическое расстояние Бхаттациария между распределениями $E_j(\lambda)$ и $E_q(\lambda)$, а эквивалентное отношение «сигнал — шум» — как [6]

$$\begin{aligned} \psi_{jq}(\lambda) &\cong \operatorname{erf}^{-1}[2P_{jq}(\lambda) - 1] \cong \\ &\cong \operatorname{erf}^{-1}[1 - 2\exp(-B_{jq}(\lambda))]. \end{aligned} \quad (7)$$

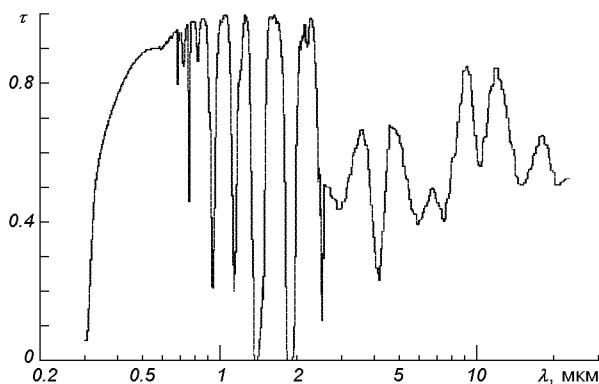


Рис. 2. Спектральное пропускание атмосферы в оптическом диапазоне дистанционного наблюдения

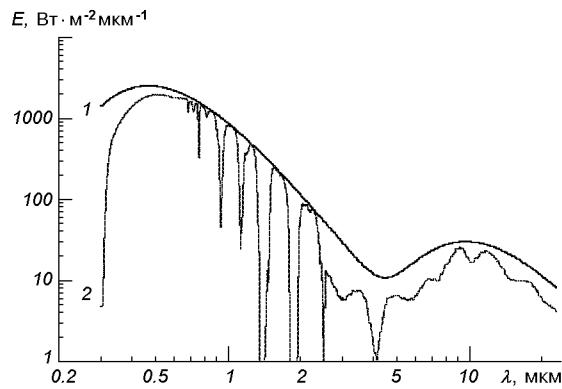


Рис. 3. Спектральная интенсивность излучения объектов ландшафта в оптической области спектра: 1 — теоретическая в соответствии с законом Планка, 2 — с учетом спектрального пропускания атмосферы

Общий алгоритм оценки информативности оптических диапазонов дистанционного наблюдения описывается рис. 1.

Важным этапом оценивания информативности является переход от имеющихся квазинепрерывных спектров типовых объектов в пространство дискретных спектральных сигнатур, присущих фиксированным спектральным диапазонам. Спектральные сигнатурь определяются не только отражательными свойствами объектов наблюдения, но и спектральным распределением интенсивности падающего излучения $E_0(\lambda)$ и спектральным пропусканием атмосферы. Усредненная зависимость спектрального коэффициента пропускания атмосферы $\tau(\lambda)$ от длины волны электромагнитного излучения показана на рис. 2 [14].

Спектр излучения объектов земной поверхности складывается из спектров отраженного солнечного излучения и собственного теплового излучения. Спектральный состав светимости Солнца с высокой точностью совпадает со светимостью абсолютно черного тела с максимумом на длине волны $\lambda_* = 0.47$ мкм [4], и на границе атмосферы Земли описывается законом Планка:

$$E_*(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda\lambda_*}\right) - 1 \right] \left(\frac{R_*}{D_*} \right)^2, \quad (8)$$

где $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Вт·с² — постоянная Планка,

$c = 2.998 \cdot 10^5$ км/с — скорость света в вакууме, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Вт·с²/К — постоянная Больцмана, $b = 2898$ мкм·К — постоянная Вина, $R_* = 6.96 \cdot 10^7$ км — радиус Солнца, $D_* = 1.496 \cdot 10^8$ км — среднее расстояние от Солнца до Земли.

Поэтому в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах преобладает отраженное солнечное излучение, в среднем — смесь отраженного и собственного излучения, а в дальнем — преимущественно собственное тепловое излучение объектов ландшафта $E_0(\lambda)$. Соответствующие распределения спектральной плотности энергетической светимости показаны на рис. 3.

Окончательный регистрируемый сигнал от объекта наблюдения $E(\lambda + \Delta\lambda)$ в пределах спектрального диапазона с длинами волн от λ до $\lambda + \Delta\lambda$ модулируется его спектральными отражательной $\rho(\lambda)$ и излучательной $\varepsilon(\lambda)$ характеристиками и составляет

$$E(\lambda + \Delta\lambda) = \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \left(E_*(\lambda) \tau(\lambda) \rho(\lambda) + E_0(\lambda) \varepsilon(\lambda) \right) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

где $E_0(\lambda)$ также описывается законом Планка

$$E_0(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_0}\right) - 1 \right], \quad (10)$$

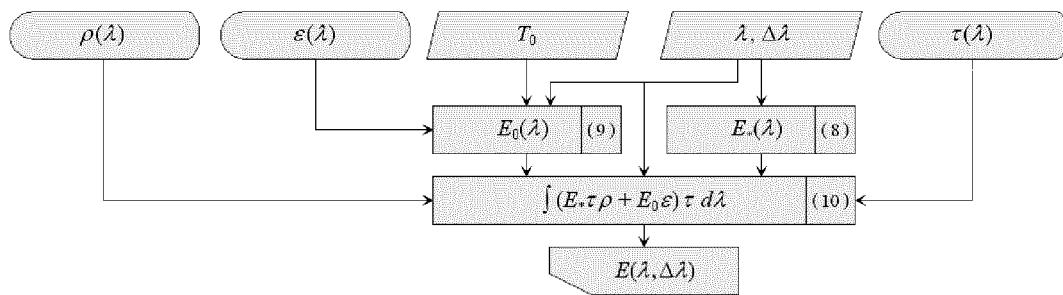


Рис. 4. Схема алгоритма расчета спектральных сигнатур объектов дистанционного наблюдения в оптическом диапазоне

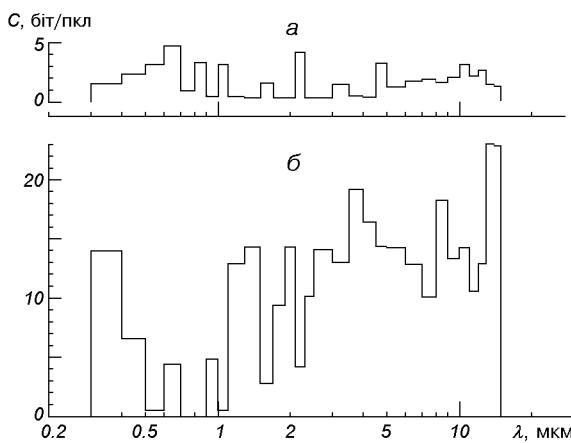


Рис. 5. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: *а* — для одиночных диапазонов, *б* — для оптимальных комбинаций

где T_0 — собственная температура объекта.

Алгоритм расчета спектральной сигнатуры объекта поясняется рис. 4.

Полученные спектральные сигнатуры объектов уже позволяют практически рассчитывать информативность (3) для каждого произвольного спектрального диапазона. Однако в рамках принципа эквивалентности совместное использование нескольких специально подобранных спектральных диапазонов может обеспечить значительно более высокую информативность, нежели их суммарная — так называемый синергетический эффект многоспектральности [11]. Для поиска оптимальной по информативности комбинации спектральных диапазонов наблюдения известны соответствующие вычислительные процедуры [10].

В качестве примера проведена оценка информативности 30 спектральных оптических диапазонов 0.3–15 мкм для восьми групп тематических задач дистанционного наблюдения Земли из космоса, предполагающих попарное различение от 3 до 10 типовых объектов в каждой. На рис. 5 приведены диаграммы информативности для одиночных спектральных диапазонов и для их оптимальных комбинаций.

В каждую оптимальную комбинацию входят от 3 до 23 спектральных диапазонов, которые обеспечивают повышение информативности в среднем в 2–14 раз. При этом оптимизация приводит еще и к перераспределению относительной информативности между спектральными диапазонами. Для одиночных же можно выделить как наиболее информативные — 0.6–0.7 мкм, 2.1–2.3 мкм, 4.5–5 мкм, 10–11 мкм, так и наименее информативные — 0.9–1 мкм, 1.1–1.5 мкм, 1.7–2.1 мкм, 3.5–4.5 мкм — оптические диапазоны.

Таким образом, предложенные алгоритмы могут послужить теоретической основой для рационального выбора оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса при синтезе вновь разрабатываемой или конфигурировании уже существующей бортовой оптико-электронной аппаратуры.

- Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялько, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006.—360 с.
- Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 91—102.

3. Кононов В. И., Станкевич С. А. Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского.—2004.—17, № 2.—С. 88—95.
4. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — М.: Сов. радио, 1978.—400 с.
5. Попов М. А., Станкевич С. А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: ИКИ РАН, 2006.—Т. 1.—С. 106—112.
6. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // Оптический журн.—1998.—65, № 2.—С. 60—63.
7. Станкевич С. А. Статичні аспекти визначення функції передавання модуляції аерокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — Львів: Львівська Політехніка, 2005.—Вип. II.—С. 142—147.
8. Станкевич С. А. Імовірнісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізnenості багатоспектральних аерокосмічних знімків // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
9. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // Доп. НАН України.—2006.—№ 8.—С. 53—58.
10. Станкевич С. А. Оптимизация состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений при решении тематических задач дистанционного зондирования Земли // Космическая наука и технология.—2007.—13, № 2.—С. 25—28.
11. Станкевич С. А., Шолоник О. В. Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков // Тезисы Первой науч. конф. «Науки о Земле и космосе — обществу». — Киев: ЦАКИЗ, 2007.
12. Федоровський О. Д., Якимчук В. Г. Моделювання процесу одержання інформації космічними системами зондування Землі // Геоінформатика.—2005.—№ 1.—С. 41—48.
13. Фукунага К. Ведение в статистическую теорию расположения образов / Пер. с англ. — М.: Наука, 1979.—368 с.
14. Staenz K., Secker J., Gao B.-C., et al. Radiative transfer codes applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing.—2002.—57, N 3.—P. 194—203.

INFORMATIVITY OF EARTH REMOTE SENSING OPTICAL BANDS: PRACTICAL ALGORITHMS

S. A. Stankevich

The algorithms for practical evaluation of informativity of Earth remote sensing optical bands using spectral responses of landscape standard objects and atmosphere are presented. We give quantitative estimations of informativity of optical spectral bands in solving unified thematic tasks. This can be useful for the elaboration of new satellite sensors and for configuring of existing ones.

УДК 528.88.042:528.852.5

С. А. Станкевич, О. І. Сахацький, А. О. Козлова

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Класифікування покріттів ландшафту з використанням повного набору нормалізованих міжканальних індексів і додаткових контекстуальних ознак

Представлено 03.09.07

Запропоновано алгоритм класифікації покріттів ландшафту з використанням нормалізованих міжканальних індексів багатоспектральних аерокосмічних зображень та додаткових контекстуальних ознак. Наведено результати тестового класифікування покріттів ландшафту південної частини Кримського півострова за алгоритмом, що пропонується.

Вирішення більшості тематичних задач природокористування та просторового аналізу дистанційними методами потребує залучення достовірних класифікацій покріттів ландшафту. Створення таких класифікацій має ґрунтуватися на сучасних, надійних і універсальних алгоритмах класифікування.

ПІДХІД

Основу підходу до класифікування багатоспектральних аерокосмічних зображень складає опис оптичного сигналу у кожному елементі (пікселі) окремою дискретною функцією $E(\lambda)$, $\lambda = 1, \dots, m$ у багатовимірному спектральному просторі $\{\lambda\}$. Очевидно, що середня точність класифікування m -вимірних радіометричних полів буде асимптотично зростати зі збільшенням кількості спектральних відліків m [8].

При класифікуванні покріттів ландшафту широко використовуються усілякі нормалізовані індекси відмінності спектральних оптичних сигналів — такі як NDVI, SAVI та інші —

відношення, у яких чисельник і знаменник є різницею і сумою відповідних радіометричних величин у пікселях спектральних зображень двох різних спектральних діапазонів. Використання нормалізованих міжканальних індексів дозволяє забезпечити повну або часткову інваріантність спектральних ознак класів до небажаних адитивних і мультиплікативних викривлень оптичних спектрів, що реєструються, наприклад, внаслідок варіацій спектральних характеристик об'єктів, стану атмосфери, зміни умов освітленості та ін. Практика вирішення багатьох тематичних задач дистанційного зондування свідчить про більшу інформативність нормалізованих міжканальних індексів порівняно з «сирими» спектральними сигналами [6].

Проте на даний час використання нормалізованих міжканальних індексів ґрунтується на емпіричному досвіді, а вибір конкретних індексів для вирішення тієї чи іншої тематичної задачі є свого роду мистецтвом. Недоліки такого підходу особливо помітні при вирішенні комплексних задач, у тому числі при класифікуванні покріттів ландшафту. Між тим для будь-якого

багатоспектрального аерокосмічного зображення існує скінчена множина — повний набір нормалізованих міжканальних індексів розмірністю $m \cdot (m - 1)/2$. Можливості сучасних систем обробки багатоспектральних аерокосмічних зображень дозволяють перевести процес класифікування із простору спектральних оптических сигналів у простір нормалізованих міжканальних індексів і тим самим підвищити її якість.

АЛГОРИТМ

Нехай класифікація покріттів ландшафту включає s класів, кожен з яких описується m -вимірною спектральною сигнатурою E_λ , $\lambda = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, s$. У рамках викладеного підходу перш за все будеться повний набір нормалізованих міжканальних індексів z_λ , $\lambda = 1, \dots, m \cdot (m - 1)/2$:

$$z_\lambda = \frac{E_\lambda - E_{\lambda+1}}{E_\lambda + E_{\lambda+1}}, \quad \lambda = 1, \dots, m - 1.$$

Сформований таким чином повний набір нормалізованих міжканальних індексів може бути використаний при класифікуванні покріттів ландшафту [4].

Також при класифікуванні покріттів ландшафту можуть додатково враховуватися їхні контекстуальні ознаки. Для гірських територій, де розподіл біоти характеризується висотною поясністю, такими ознаками є висота над рівнем

моря та рельєф місцевості. Ці фактори — потужні розподільники інших важливих факторів середовища: температури, вологості, освітленості [7].

На рівнинних ландшафтах більш доцільним є врахування температури поверхні та вологості ґрунту. Для оцінювання вологості земного покриву може бути використаний водний індекс. Встановлено, що використання нормалізованої різниці спектрального відображення у видимій зеленій і середній інфрачервоній зонах спектру дозволяють ефективно оцінювати вмісту вологи як рослинного покриву, так і верхнього шару відкритого ґрунту [5]. В окремих випадках кращі результати досягаються при використанні комплексного індикатора вологомісту на основі нормалізованого водного індексу NWI і температури поверхні T_0 виду

$$w_0(NWI, T) = A_2 \ln \left(\frac{NWI + 1}{T_0} + 1 \right) + A_1,$$

де A_1 і A_2 — регресійні коефіцієнти, які визначаються для кожної сцени на основі незалежних завіркових даних.

Абсолютну температуру земної поверхні T_0 може бути оцінено безпосередньо за цифровими зображеннями дальнього інфрачервоного діапазону відповідно до закону теплового випромінювання Планка [3]:

$$T_0 = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{TIR}} + 1 \right)},$$

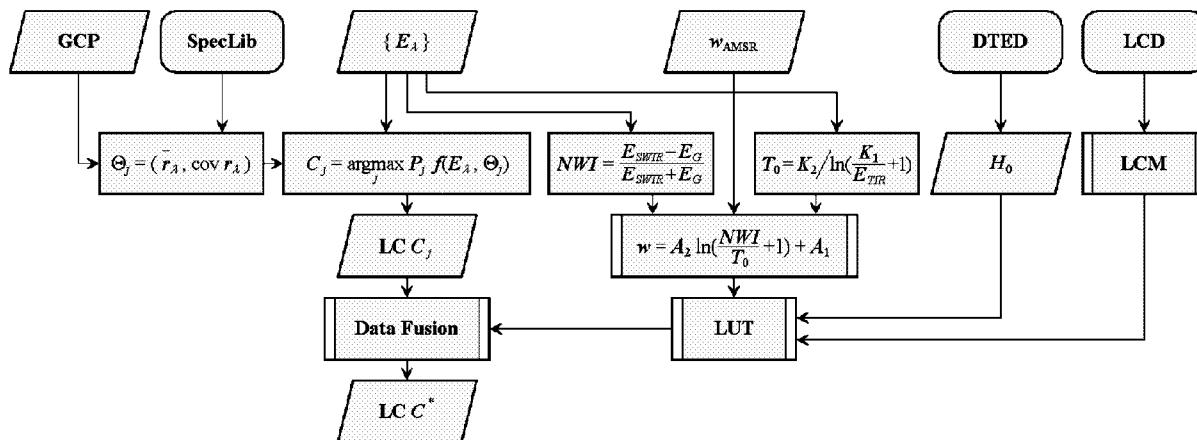


Рис. 1. Алгоритм класифікації покріттів ландшафту з використанням нормалізованих міжканальних індексів багатоспектральних аерокосмічних зображень та додаткових контекстуальних ознак

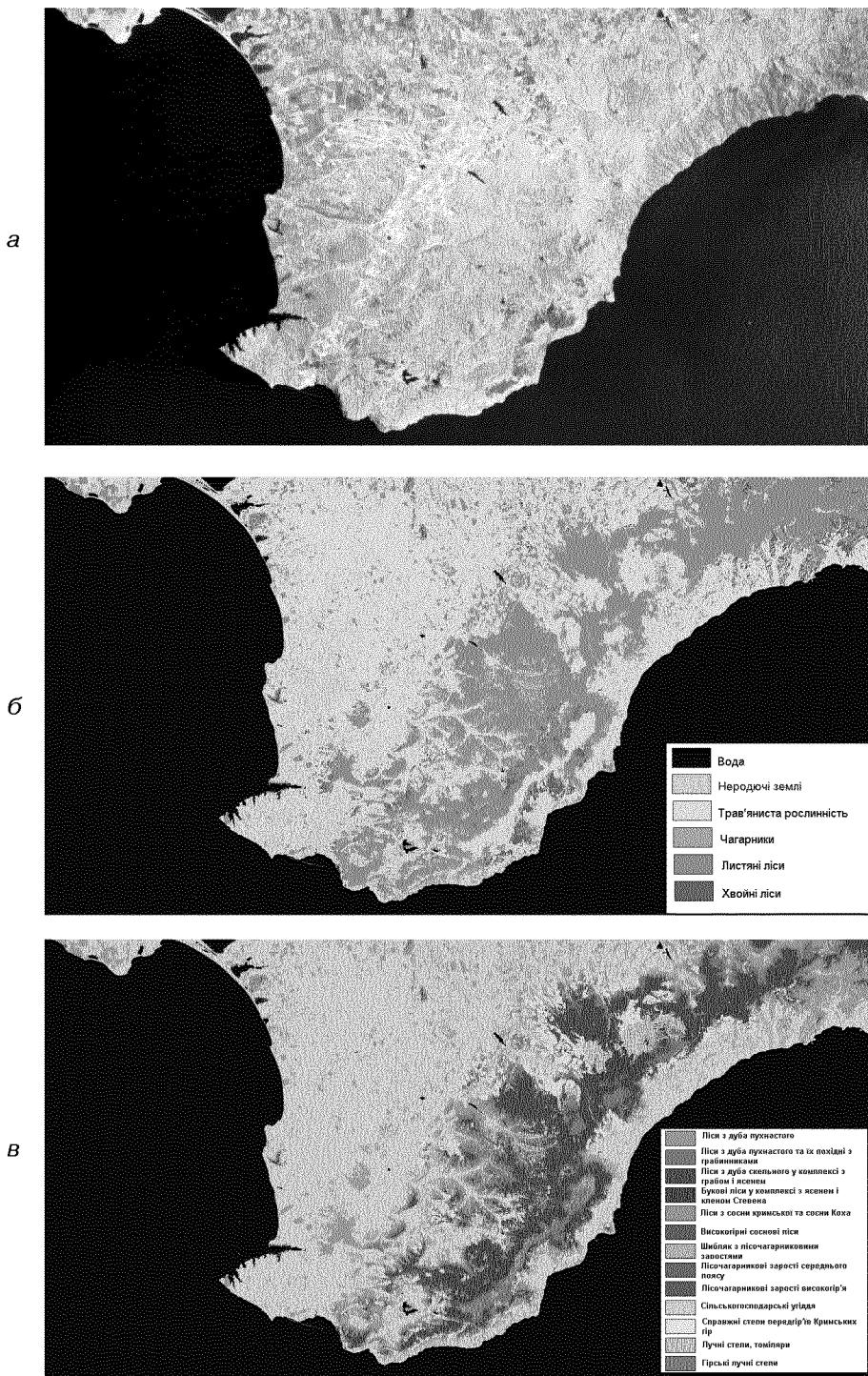


Рис. 2. Результати класифікування покріттів ландшафту: *а* — вихідне космічне зображення південної частини Кримського півострову 09.06.79, «Космос/СА-34» (4 діапазони видимого і близького інфрачервоного спектру, просторова розрізняність 30 м), *б* — карта покріттів ландшафту, *в* — карта рослинного покриву

де K_1 і K_2 — апаратно залежні константи сенсора, L_{TIR} — спектральна густина енергетичної світності в дальньому інфрачервоному спектральному діапазоні [7].

Порядок проведення класифікації покриттів ландшафту з використанням нормалізованих міжканальних індексів багатоспектральних аерокосмічних зображень пояснюється схемою (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТИ

Проведено тестове класифікування шести класів покриттів ландшафту на космічному багатоспектральному фотознімку «Космос/СА-34», отриманому 9 червня 1979 р. (рис. 2, *a*) з використанням традиційної технології на основі спектральних сигнатур класів.

З використанням карт висот, наземних завіркових та допоміжних довідкових даних проведено розділення класів на підкласи. Оскільки більшу частину території дослідження становить гірська місцевість, в основу створеної класифікації покладено висотну поясність рослинності Гірського Криму, описану в роботах [1—3]. Типи рослинних формаций виділялися на основі домінантних видів або форм зростання рослин. Всього таким чином було виділено 13 класів. Результати класифікації показано на рис. 2, *b* і *c*. Як видно з рис. 2, *c*, деталізація класів покриттів ландшафту в контексті зміни висоти за рівнем моря дозволила відобразити особливості просторового розподілу рослинних формаций південної частини Кримського півострову.

ВИСНОВКИ

Використання повного набору нормалізованих міжканальних індексів багатоспектральних космічних зображень може бути рекомендовано для включення до складу відповідних перспективних дистанційних технологій як таке, що дає змогу підвищити точність і стійкість класифікації покриттів ландшафту. Залучення додаткових контекстуальних ознак дозволяє деталізувати класи покриттів ландшафту відповідно до задач тематичного класифікування.

Подане дослідження здійснено в рамках міжнародного проекту «The Model and Automated Technology for LandCover classification (TLLC)» за фінансової підтримки The International Association for the Promotion of Co-operation with Scientists from the New Independent States (NIS) of the Former Soviet Union (INTAS), Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) і Національного космічного агентства України — грант INTAS-CNES-NSAU Ref. N 06-1000024-9100.

- Дидух Я. П. Растительный покров горного Крыма (структурь, динамика, эволюция и охрана). — Кий: Наук. думка, 1992.—253 с.
- Дидух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Ялтинский горно-лесной государственный заповедник. — Кий, 1980.
- Дидух Я. П., Шеляг-Сосонко Ю. Р. Государственный заповедник «Мыс Мартыня». — Кий, 1985.
- Попов М. А., Станкевич С. А., Сахацкий А. И., Козлова А. А. Использование полного набора нормализованных межканальных индексов многоспектральных космических изображений при классификации // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского.—2007.—20 (59), № 1.—С. 175—182.
- Сахацький О. І. Застосування супутникових даних для вирішення задач водообміну у геосистемах // Доп. НАН України.—2006.—№ 4.—С. 118—126.
- Станкевич С. А., Козлова А. О. Особливості розрахунку індексу видового різноманіття за результатами статистичної класифікації аерокосмічних знімків // Учені записки Таврійського національного університета ім. В. І. Вернадского.—2006.—19 (58), № 2.—С. 144—150.
- Станкевич С. А., Козлова А. О. Методика оцінювання біорізноманіття території за багатоспектральними космічними зображеннями середньої просторової розрізnenності // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 4.—С. 25—39.
- Liang S. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. — Hoboken: John Wiley, 2003.—560 p.

LAND COVER CLASSIFICATION ON THE BASIS OF THE FULL SET OF NORMALIZED BAND-DIFFERENCE INDEXES AND ADDITIONAL CONTEXT FEATURES

S. A. Stankevich, A. I. Sakhatsky, A. A. Kozlova

The algorithm for land cover classification WITH THE USE OF THE full set of the normalized band-difference indexes and additional context features is proposed. We present our results of test land cover classification based on the algorithm for the south part of Crimean peninsula.

УДК 528.8

Е. И. Бушуев¹, В. И. Волошин¹, А. С. Левенко¹,
Е. И. Капустин¹, Я. И. Стефанишин²

¹Державне підприємство «Дніпрокосмос», Дніпропетровськ

²Національне космічне агентство України, Київ

Подходы к построению и эксплуатации национальной орбитальной группировки спутников ДЗЗ

Представлено 03.09.07

Розглянуто основні проектні рішення до побудови та експлуатації перспективного українського орбітального утруповання супутників дистанційного зондування Землі.

Проектом национальной космической программы Украины на 2008—2012 гг. предусматривается выведение и эксплуатация на орбите спутников наблюдения Земли «Сич-2», «Сич-2М», программа исследования ионосферы «Ионосат», и запуск украинского молодежного спутника «УМС-1» для научных и технологических исследований. Все эти спутники будут эксплуатироваться на относительно низких околокруговых орbitах с высотой менее 1000 километров.

Системы управления такими спутниками и возможными орбитальными группировками на их основе следует создавать с учетом существующего в Украине и мире опыта для повышения эффективности с достижением высоких эксплуатационных характеристик, обеспечением демократизации доступа к данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), со снижением стоимости и масс выводимых в космическое пространство аппаратов.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СПУТНИКОВ И ОРБИТАЛЬНЫХ ГРУППИРОВОК

Помимо традиционных, используемых в украинских разработках, подходов к проектированию

спутников ДЗЗ и систем их эксплуатации существует целый ряд уже опробованных технических и организационных решений, осуществленных зарубежными специалистами.

Необходимость изменения подхода к проектированию спутников новых поколений и орбитальных систем диктуется рядом объективных причин.

1. Развитие электроники и приборостроения позволяют применить новые технические решения с существенным снижением габаритов и масс приборов при повышении их технического уровня.

2. Увеличилось число стран и разработчиков космических программ в мире, что требует упорядочивания использования объектов на орбите с повышением их эффективности без значительного увеличения количества спутников.

3. Появилось значительное количество пользователей данными ДЗЗ и требуется упрощение процедуры организации съемки и предоставления заказчику полученным материалов.

4. Увеличилась доля невоенных (открытых) программ космических программ.

5. Изменилась в процессе глобализации мировая система связи.

Можно выделить основные недостатки разработок прежних лет:

- необходимость создавать для спутниковых группировок ряд автономных дорогих, оснащенных всеми необходимыми средствами функционирования, съемки Земли и связи космических аппаратов — спутников;
- значительные массы таких спутников, требующих применение ракет носителей (РН) большой мощности и стоимости со значительной стоимостью пусков;
- практическая невозможность съемки всей территории отдельной страны с одновременным сбросом полученной информации и пр.

Сложным для осуществления остается и вопрос об организации связи между спутниками в одной группировке. Как правило, в группировках работают автономные аппараты, вообще не связанные между собой, что снижает возможности самой орбитальной группировки.

ДОСТИЖЕНИЯ В СФЕРЕ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ СПУТНИКОВ

В мировой практике можно выделить некоторые существующие тенденции создания орбитальных группировок спутников, подтверждающиеся конкретными разработками.

Университетские спутники. Известен целый ряд спутников, созданных в университетах. Их разработка проводится сравнительно низкой стоимостью малогабаритных аппаратов и возможностью опробовать новые научные разработки, способствующие повышению уровня обучения путем вовлечения студентов в такие эксперименты. Известен опыт Украины по созданию молодежного спутника (www.sputnik.unaes.dp.ua): в рамках реализации Общегосударственной (Национальной) космической программы Украины на 2003—2007 гг. на базе Национального центра управления и испытания космических средств (НЦУИКС, г. Евпатория) вопросы создания молодежного спутника рассмотрены на II Международной научно-практической конференции «Университетские микроспутники — перспективы и реальность» [4].

Российский микроразмерный космический аппарат (наноспутник) по международной программе ООН «Прозрачный мир» будет весить

12 кг. На его борту предполагается установить оптическую камеру для съемки Земли, изображения которой смогут принимать большое число образовательных центров во всех странах мира. В разработке проекта «Прозрачный Мир» участвуют специалисты предприятий российской ракетно-космической отрасли и коммерческих компаний сектора геоинформатики. В их числе: КБ «Полет», Омск (разработчик и изготовитель малоразмерных спутников «Надежда», «Университетский-Татьяна», «Можаец», и ракет-носителей «Космос-3М»); НИИЛАКТ РОСТО, Калуга (разработчик командных радиокомплексов управления микроспутниками «Университетский-Татьяна» и др.).

Главные особенности проекта «Прозрачный Мир»: относительно невысокая стоимость, свободный доступ к космической информации, что определяет широкую аудиторию проекта, возможность использования космических изображений в образовательной, научно-исследовательской и практической деятельности. На первом этапе планируется запустить экспериментальный спутник для отработки технических решений, на втором этапе предполагается развернуть систему из 5-6 спутников, обеспечивающих обзор всей поверхности Земли в течение суток.

Отличием проекта «Прозрачный Мир» от аналогов является непрерывная передача изображений Земли в режиме прямого вещания на все приемные станции в различных странах мира (www.gisa.ru).

В качестве примера университетской инициативы можно привести систему спутников, созданную в университете Техаса (University of Texas, США) — проект наноспутника FASTRAC (fastrac.ae.utexas.edu).

В разработке системы наноспутников принимали участие: The University of Colorado at Boulder, New Mexico State University, Arizona State University, Pennsylvania State University, The University of Michigan, The University of Hawaii at Manoa, Michigan Technological University, Montana State University at Bozeman, Washington University at St. Louis, Worcester Polytechnic Institute, Taylor University (США).

Масса одного спутника около 15 кг. Размеры корпуса: 20.84 см — высота и 47.50 см — ширина. Система формируется из двух спутников. Проект учитывает существующую высокую

Таблица 1. Сравнительные характеристики КА «RapidEye» и МС-2-8

| Characteristic | «Rapid Eye» | МС-2-8 |
|--|---|--|
| Vis & NIR spectral band, μm | Blue 0.44—0.51 Green 0.52—0.59 Red 0.63—0.69 Red Edge 0.69—0.73 Near IR 0.76—0.85 | Pan 0.50—0.89 0.50—0.59 0.61—0.68 no 0.79—0.89 |
| Resolution > (GSD), meters | 6.5 | 7.8 |
| Swath width, km | 77 | 46.6 |
| Dynamic Range | 12 Bits | 8 Bits |
| TIR spectral band, μm | | 1.55...1.7 |
| Resolution > (GSD), meters | no | 39.5 |
| Swath width, km | | 55.3 |
| Roll Angle, degrees | ± 25 | ± 35 |
| Global Revisit Time (All) | 1 Day | |
| Image Data Downlink Speed, Mb/s | 80 | 32 |
| Telemetry Downlink Speed, kb/s | 9.6 | |
| Control Uplink Speed, kb/s | 38.4 | |
| Pointing Control in each axis, degrees | 0.1 | |
| Orbital Position Knowledge, meters | < 10 | |
| Inclination, degrees | 97.8 | 98.074 |
| Period, minutes | 96.7 | |
| Orbital Height, km | 630 | 668 |
| Descending Node | 11 a.m., | |
| Satellite mass | | 135 |

удельную стоимость вывода на орбиту спутника (более 2200 кг полезного груза): вместо одного спутника высокой стоимости предлагается вывести два значительно меньшей массы и стоимости, при этом учитывается возможность выхода одного спутника из эксплуатации, что может быть вызвано и применением дешевых аппаратных средств ЭВМ.

По проекту система связи орбитальной группировки наноспутников состоит из двух передатчиков и одного приемника. Первый передатчик передает телеметрию на борт другого спутника на волне длиной 2 м со скоростью 1200 бит/с). Второй передатчик, работающий на волне длиной 70 см, передает телеметрию со скоростью 9600 бит/с на Землю и одновременно на приемник второго спутника для связи с ним, и наоборот.

Проект задуман только как эксперимент спутниковой и межспутниковой связи на орбите и рассчитан на прием стандартными любительскими радиостанциями.

Орбитальная группировка «RapidEye 1—5». Немецкая компания RapidEye AG (Магдебург,

Берлин) в 2008 г. выводит на орбиту систему из пяти спутников ДЗЗ «RapidEye» (www.rapidey.de). Сравнительные характеристики КА «RapidEye» и украинского КА «МС-2-8» представлены в табл. 1. Из сравнения характеристик следует, что по сути украинский спутник практически не отличается от КА «RapidEye». Очевидные отличия обуславливаются другим: системой в виде группировки, что позволяет, например, осуществить съемку всей территории Германии за время менее одной недели. Работа сразу нескольких спутников одного назначения, даже при однопунктной системе связи (станция управления группировкой «RapidEye» расположена на о. Шпицберген, оптико-волоконная связь с Германией) значительно расширяет возможности ДЗЗ и создает основу внедрения космической информации в практическую деятельность в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и картографии, для чего в первую очередь и предназначена система «RapidEye».

Внедрение ДЗЗ наиболее эффективно путем эксплуатации группировок, а не отдельных спутников.

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ДЗЗ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЯЗИ

Возможности ретрансляции через спутник связи. Спутник «Envisat» — самый тяжелый груз, запущенный с помощью ракеты-носителя «Ariane-5». Его масса превышает 8 тонн, а линейные размеры составляют порядка 10 м, размах солнечных батарей — 25 м. Спутник обращается вокруг Земли каждые 100 мин по полярной орбите на высоте 800 км.

В космическом проекте приняли участие 13 европейских космических агентств, а также представители Канады. Разработку спутника вели около 100 европейских фирм. Его общая стоимость составила 2,3 млрд евро.

Десять приборов ДЗЗ на борту спутника передают информацию об изменениях на земной поверхности, в океане, атмосфере и ледниках. Собранные данные после обработки направляются в Европейские организации по охране окружающей среды.

Решение проблемы передачи данных со спутника «Envisat» решена в ходе эксперимента с использованием спутника связи ARTEMIS: через спутник связи на наземные пункты приема. Связь между спутниками с 2003 г. обеспечивалась в микроволновом радиодиапазоне.

В ходе эксперимента проверена возможность передачи данных со спутника ДЗЗ на Землю по каналам цифрового телевидения в к-диапазоне, что позволяет дополнить к специализированным станциям прима с антеннами в х-диапазоне массово использующиеся телевизионные средства приема.

Оптическая связь на орбите. Первая двунаправленная оптическая связь между японским спутником KIRARI, официально называемым OICETS (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite), и спутником EKA ARTEMIS была успешно осуществлена 9 декабря 2005 г. (www.ibusiness.ru).

KIRARI стал вторым спутником, совершившим оптическую передачу информации при помощи спутника ARTEMIS. Первым космическим аппаратом, передавшим данные по лазерной связи в ноябре 2001 г. при помощи оборудования SILEX (Semiconductor laser Inter-satellite Link EXperiment), стал французский спутник SPOT-4. Эта оптическая связь с тех пор действует регулярно, и к моменту связи KIRARI —

ARTEMIS было совершено 1100 сеансов связи общей протяженностью 230 ч.

Известно, что оптическая связь является древнейшей на Земле. Она существовала в виде семафоров и световых семафоров. Известен принцип оптического телефона, где используется лампочка накаливания с переменным (модулированным) уровнем яркости, воспринимаемым приемником со светодиодом.

Такая связь не засоряет радиоэфир, практически недоступна для прослушивания и искажения. В условиях Земли она неэффективна из-за наличия загрязненной атмосферы в приземном слое и кривизны земного шара.

В условиях космического пространства оптическая связь является идеальной. В качестве направленного источника передачи данных могут использоваться миниатюрные лазеры, не требующие мощных источников энергии.

Оптическая связь, на примере, например эксплуатации КА SPOT-4, может стать основой орбитальной связи группировок спутников ДЗЗ.

Технология оптической передачи данных делает возможным передачу больших потоков информации при помощи небольших терминалов потребляющих немного энергии, а также обеспечить безопасное соединение, защищенное от вмешательств со стороны.

Космический аппарат ARTEMIS (Advanced Relay and Technology Mission) был создан ЕКА для демонстрации и продвижения передовых технологий передачи данных, наземных систем навигации и связи.

Связь через интернет. Создание микроспутников — доступный способ выхода в космос для любой страны.

Создание новых глобальных спутниковых систем связи типа «Iridium» или «Globalstar» привело к освоению производства спутников большими сериями. Сегодня в космосе развернуты системы связи, в которых число спутников измеряется десятками.

«Iridium» — единственная полностью глобальная система. С помощью 66 низкоорбитальных спутников Iridium обеспечивает 100 % покрытие Земли. Система не работает в КНДР, Венгрии, Польше, Сев. Шри Ланка. Благодаря небольшому расстоянию до спутника и высокой скорости спутников сигнал передается практически без задержек: высота орбиты 780 км, наклонение

орбитальной плоскости 86.4°. В районах, где доступна сотовая связь, телефон работает как сотовый.

«Globalstar» — система построена на 48 низкоорбитальных основных и 4 резервных спутниках. Спутники расположены на 8 орbitах по 6 аппаратов на каждой, высотой 1414 км и наклонением 52°.

Существуют и другие подобные системы связи, использование которых возможно для обеспечения функций связи и управления орбитальными группировками.

При запуске малых спутников (наноспутников, пикоспутников, фемтоспутников) появляются вопросы управления и связи, передачи данных (телеметрии) с борта космических аппаратов. Для спутников на круговых, полярных орбитах высотой до 1000 км еще можно обойтись простыми средствами, но с удалением спутников на расстояния в несколько тысяч километров связь становится главной проблемой. Для наноспутника массой 10—20 кг и мощностью энергетической установки не более 15—20 Вт обеспечение устойчивой связи традиционными средствами невыполнимо. Для этого подходят приемы организации наземной сотовой связи в комбинации с системами спутниковой связи. Шаг в этом направлении: использование систем «Globalstar» и «Orbcomm» для связи с малыми космическими аппаратами. «Связные» эксперименты заложены в программу по микроспутникам, выполняемую ведущими американскими университетами на деньги BBC США (www.nanosat.usu.edu).

Один из таких микроспутников «Рубин-2» представила фирма OHB-Systems (www.fuchsgruppe.com/ohb-systems), США. «Рубин-2» (масса спутника 30 кг) является результатом продолжения работ по спутнику «Сапфир», и его создание нацелено на выполнение серии технологических и связных экспериментов.

В качестве основной схемы связи для микроспутника «Рубин-2» выбрана система «Orbcomm». Она позволяет решить сразу две задачи: обеспечить глобальную связь с микроспутником и избавиться от необходимости создавать свою наземную инфраструктуру контроля и управления спутником. Экономическая выгода такого подхода очевидна, а использование интернета гарантирует надежность исполнения управляющих команд. В дополнение к терминалу

«Orbcomm» на спутнике имеется система пакетной связи «Safir-m», которая уже была испытана на предыдущих микроспутниках, изготовленных и запущенных компанией OHB-Systems. Основной канал управления работает через систему «Orbcomm», сброс служебной информации осуществляется через пакетный канал со скоростью 9600 бит/с.

Особенности персональной спутниковой связи можно проследить на примере системы «Inmarsat-BGAN».

«Inmarsat» существует более 25 лет. Одна из первых из систем персональной спутниковой связи. Система создавалась для обеспечения безопасности мореплавания. С 1 января 2006 г. началась коммерческая эксплуатация нового стандарта — «Inmarsat-BGAN». Спутниковая группировка — это три геостационарных спутника над экватором на высоте 35000 км. Абонентское оборудование в этом стандарте обеспечивает голосовую связь и передачу данных по IP протоколу, со скоростью до 500 кбит/с, причем одновременно. По сути это полноценный мобильный офис с телефонной связью и выделенной линией. Терминалы напоминают настольную рамку для небольшой фотографии. Вес около килограмма. Предполагается в 2007 г. обеспечить глобальное покрытие, за исключением полярных областей планеты. Не будет покрытия севернее 70° с. ш. и южнее 70° ю. ш.

Мобильные абонентские терминалы выпускаются фирмой Hughes Network Systems (США), модель HNS 9201 (3700 EUR), Thrane & Thrane (Дания), модель EXPLORER 500 (2890 EUR) и EXPLORER 700 (3500 EUR), NERA AS, Норвегия, модель NERA WorldPro 1000 (2200 EUR).

Технически самое совершенное абонентское оборудование «Inmarsat-BGAN», модель Hughes HNS 9201, имеет встроенную точку беспроводного доступа Wi-Fi 802.11b, остальные терминалы — как минимум Bluetooth. Дополнительно, можно подключить телефонную трубку и иметь голосовой доступ одновременно с передачей данных. Венчает все Quality of Service (QoS), сервис гарантированного канала с заданной скоростью, для приложений, требующих высоких скоростей передачи данных (например, потоковое видео). Стоимость услуг связи: голос — около 1 долл., IP-трафик — от 3 до 7 долл. за МБ в зависимости от объема.

Услуги, доступные для абонентов системы спутниковой связи «Inmarsat-BGAN»:

- телефон
- факс
- электронная почта
- передача данных
 - (в том числе высокоскоростная)
- телекс
 - (для некоторых стандартов)
- GPS.

Сеть «Inmarsat-BGAN» функционирует на базе новейших геостационарных спутников «Inmarsat I—4». Обеспечивается высокоскоростной доступ в Интернет. Система может быть использована для обслуживания орбитальных группировок спутников, прежде всего — нано- и пикоспутников.

Система связи «Thuraya». С точки зрения пользователя «Thuraya» имеет несколько базовых преимуществ по сравнению с существующими системами.

Во-первых, это система, которая способна принимать входящий сигнал без какой-либо специальной подготовки или настройки телефонного аппарата. В других спутниковых системах, например «Iridium» и «Globalstar», для того, чтобы принять звонок, необходимо развернуть антенну аппарата, в таком «развернутом» виде держать телефон и ждать, когда вам позвонят. Пользователю сети «Thuraya» для этого достаточно всего лишь просто включить телефон и проверить, чтобы он находился в спутниковом режиме. Антенну разворачивать не надо, можно даже находиться в помещении — спутниковый вызов в любом случае будет принят. Для пользователя это означает, что он может не заботиться о том, дозвонятся ему или нет.

Во-вторых, спутниковый телефон «Thuraya» представляет собой единственное устройство спутниковой связи, которое помещается в кармане. Все остальные аппараты ПСС, в том числе используемые в таких системах, как «Iridium», «Globalstar», не говоря уж об «Inmarsat», «MSAT» и прочих системах, слишком большие. Это тоже большое преимущество пользования телефоном системы «Thuraya» — оно ничем не отличается от пользования обычным GSM-телефоном.

В-третьих, тарифы на связь в сети «Thuraya» значительно ниже тарифов в других системах.

Это всего лишь 50 центов в минуту исходящего спутникового трафика при бесплатном входящем. Подавляющее большинство других операторов ПСС взимают деньги за входящий звонок; исходящий звонок также стоит дороже, чем в «Thuraya». В «Inmarsat», например, цена минуты связи может составлять несколько долларов (обычно больше 2.5—3 долл.). Это довольно накладно. Таким образом, «Thuraya» имеет существенное конкурентное преимущество по ценам.

Есть и еще одно очень важное преимущество, которое заключается в том, что «Thuraya» как на системном уровне, так и на уровне отдельного пользовательского телефона очень хорошо объединяется с системами сотовой связи. По одному и тому же телефону можно звонить как в стандарте GSM, так и через спутник.

При этом в аппарате может находиться как спутниковая SIM-карта, так и SIM-карта сотового оператора. И если у последнего есть роуминговое соглашение с «Thuraya», то сотовая карта будет работать. Максимальная стоимость звонка в режиме GSM составляет 25 центов, и в случае международного роуминга, когда абоненту звонят соотечественники, это очень выгодно. Поэтому сегодня «Thuraya» — не только самая дешевая в мире спутниковая связь, но и самая дешевая входящая GSM-связь.

Спутник обладает следующими особенностями:

- 250—300 лучей (многолучевая антенна);
- наличие связи между мобильными телефонами только через спутник без участия наземного сегмента;
- большая емкость (13 750 линий связи).

Спутник оснащен солнечными панелями (размах 34.5 м), отражателем L-диапазона диаметром 12.25 м, а также антенной с-диапазона. Стартовая масса спутника «Thuraya-1» около 5108 кг, масса «Thuraya-3» составляет 5250 кг.

Спутники системы «Thuraya» расположены на высоте 35 787—36 000 км над экватором и способны предоставлять услуги 2 млн абонентов и поддерживать до 13.5 тысяч одновременных телефонных соединений. Часть телекоммуникационной емкости «Thuraya» сдается в аренду компании «Inmarsat» для предоставления услуг передачи данных со скоростью 114 кбит/с и выше.

Таблица 2. Используемые системой «Thuraya» частоты

| канал | частота |
|--------------------------------|-------------------|
| Абонентский терминал — спутник | 1626.5—1660.5 МГц |
| Спутник — абонентский терминал | 1525.0—1559.0 МГц |
| Станция сопряжения — спутник | 6425.0—6725.0 МГц |
| Спутник — станция сопряжения | 3400.0—3625.0 МГц |

Срок службы спутников рассчитан на 12—15 лет.

15 января 2008 г. осуществлен запуск телекоммуникационного спутника «Thuraya-3». Спутник «Thuraya-3» выведен на геостационарную орбиту и существенно расширил зону покрытия сети спутниковой мобильной связи. Компания «Thuraya» предоставляет услуги спутниковой телефонии (передача голоса и данных) в странах Европы, Ближнего Востока, Северной и Центральной Африки, Средней Азии, части Индии, стран Юго-Восточной Азии, Тихоокеанского региона, включая Китай, Японию, Корею, Индонезию и Австралию. Функционирование спутниковой сети обеспечивается тремя геостационарными спутниками «Thuraya-1» (запуск 20.10.2000 г.), «Thuraya-2» (запуск 10.06.2003 г.) и «Thuraya-3» (www.thuraya.com.ua).

Используемые системой «Thuraya» частоты представлены в табл. 2.

Базовая станция системы «Thuraya» расположена у г. Шарджа в Объединенных Арабских Эмиратах. Компания Thuraya Satellite Telecommunications была создана в 1997 г. крупными финансовыми институтами ОАЭ, Саудовской Аравии, США, Германии. Разработчик и создатель системы «Thuraya» — компания Boeing Satellite Systems, имеющая мировую известность в производстве самолетов и спутников.

Фазированные решетки. Перспективным можно рассматривать направление использования для управления орбитальных группировок КА ДЗЗ существующих систем дальнего обнаружения ракетного нападения с фазированными решетками антенн излучения — стационарные сооружения с отклоняемым передающим лучом [2, 3]. Такие станции известны в мире, например «Днепр», «Катюша», «Антей», зарубежные 48L, «Patriot», RAT-31DL, GBR-0, AWS-9 и др. Эти

радарные комплексы разного назначения оснащены фазированной антенной решеткой с электронным движением луча. Передающая антенна может использоваться для передачи данных на спутники связи и КА. Приемная антенна радарного комплекса может принимать информацию, передаваемую на определенных частотах со спутников.

Передающие станции обладают большой мощностью и способны транслировать сигналы на орбиты высотой в тысячи километров, что может значительно расширить диапазон применения спутников связи и ДЗЗ, в т. ч. расположенных, например, в точках либрации — в треугольнике с расстоянием между КА в плоскости Луны 700 000 км [1].

Радиолинии миллиметрового диапазона длин волн. В наше время происходит бурный процесс развития систем и средств связи миллиметрового диапазона длин волн. Преимуществами диапазона являются возможность увеличения скорости передачи информации, обеспечения высокого усиления антенн при малой их апертуре, а также повышения помехозащищенности.

Вместе с тем, этот диапазон имеет ряд особенностей. Например, в этом диапазоне наблюдается существенное ослабление сигнала с повышением частоты в атмосферных газах и гидрометерах, деполяризация излучения, амплитудные и фазовые изменения. Кроме того, в атмосфере имеются постоянные полосы интенсивного (резонансного) поглощения радиоволн, обусловленные наличием кислорода и водяного пара. Эти явления наблюдаются на частотах 22.2 ГГц (H_2O), 60 ГГц (O_2), 118.8 ГГц (O_2) и 180 ГГц (H_2O).

Практический интерес для связи представляют так называемые «окна прозрачности» на частотах около 35, 94.140 и 220 ГГц, в которых наблюдается минимальное затухание радиоволн по сравнению с соседними участками электромагнитного спектра. Например, в средних широтах при умеренной влажности и температуре у земной поверхности 20 °C в окнах прозрачности полное ослабление невелико и составляет, ориентировочно, для частоты 94 ГГц не более 1.3 дБ.

Успехи в разработке элементной базы миллиметровых волн открыли возможность их приме-

нения в системах связи. Кроме разнообразного назначения наземных систем связи, весьма перспективным является применение миллиметровых волн для высокоскоростной спутниковой связи. При этом создание радиолиний спутник–спутник во многих случаях может исключить необходимость создания промежуточных наземных станций.

Перспективным является и использование миллиметровых волн для низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли, так как используемые в настоящее время более низкочастотные диапазоны перенасыщены за счет одновременной работы большого количества космических аппаратов, находящихся на орбите.

В настоящее время радиолинии передачи информации с борта спутников дистанционного зондирования работают в сантиметровом диапазоне на частотах 8.0–8.4 ГГц (т. е. занимают полосу 0.4 ГГц). Тенденция развития средств дистанционного зондирования (многоспектральные радиометры оптического диапазона, радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны, обладающие разрешающей способностью в доли метра) предполагает увеличение скорости передаваемой информации и, соответственно, увеличение полосы частот.

Анализ Регламента Радиосвязи показывает, что ближайшим выделенным диапазоном для передачи информации по радиолинии «космос–Земля» является полоса частот 25.5–27 ГГц. Рекомендуемая полоса частот в 1.5 ГГц предполагает существенные возможности для развития бортовых средств передачи информации дистанционного зондирования. Кроме того, близко расположенные частоты 28.5–30 ГГц (полоса порядка 1.5 ГГц) выделены для передачи информации по линии «Земля — космос».

Представляется, что это дает возможность создать совмещенную бортовую радиолинию (командную, телеметрическую и информационную) в одном устройстве, которое работает к тому же и на одну antennу. Такой подход позволяет существенно снизить массово-габаритные характеристики бортовой станции, что для малых космических аппаратов является определяющим фактором.

Современный отечественный уровень развития технологии устройств миллиметрового диапазона длин волн, имеющиеся заделы и сложив-

шаяся научно-производственная кооперация позволяет обеспечить проектирование многоканальных активных и пассивных систем локации, а также систем связи, которые обладают техническими характеристиками на уровне лучших зарубежных аналогов.

В связи с вышеизложенным актуально проведение в рамках национальной космической программы Украины на 2008–2012 гг. ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на создание базовой модификации бортовой радиолинии миллиметрового диапазона длин волн.

НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОСТРОЕНИЮ И ЭКСПЛУАТАЦИИ УКРАИНСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ СПУТНИКОВ ДЗЗ

Для управления спутниками украинской группировкой ДЗЗ может использоваться однопунктная схема управления, впервые в СНГ вынужденно, но успешно примененная в Украине для управления спутником «Сич-1». Несмотря на очевидные экономические преимущества указанной схемы, она накладывает жесткие ограничения на оперативность и надежность выполняемых операций по управлению спутником, приему и обработке поступающей телеметрической и научной информации.

Среднее время сеанса работы со спутником в зоне радиовидимости национальных приемно-передающих земных станций составляет 5–15 мин, и за это время необходимо определить параметры орбитального движения спутника, принять и обработать телеметрическую информацию, оценить состояние спутника, с учетом результатов этой оценки сформировать и заложить на борт программу работы спутника на следующий период планирования.

В течение суток возможны 2–5 сеансов работы со спутником, при этом, как правило, обеспечивается лишь один полноценный дневной сеанс сбора оптической информации по территории Украины. Указанные обстоятельства вынуждают закладывать на борт «жесткую» программу работы спутника, которую невозможно изменить до следующей закладки программы.

Иную технологию эксплуатации космической

системы в квазиреальном масштабе времени авторы предлагают назвать SEE — технологией (Space Eyes & Ears — космические глаза и уши), когда спутник «слышит» оперативные команды на съемку, отрабатывает их и тут же передает информацию на абонентские терминалы пользователей.

Введение в состав орбитальной группировки геостационарного спутника-ретранслятора позволяет реализовать предлагаемую технологию.

Система «SEE» может быть в перспективе создана в Украине на основе внедрения новых подходов к проектированию и организации эксплуатации орбитальных группировок с учетом мирового опыта.

Предлагается рассмотреть два варианта возможной структурной схемы.

Вариант первый предполагает использование стандартных технических средств в виде покупных составляющих.

Последовательность действий:

- пользователи через интернет подают заявки на съемку определенных территорий;
- объединенный операционный центр и центр управления полетом (ЦУП+ОЦ) передают информацию о загрузке задания на съемку на ретрансляционный стандартный спутник связи (высокоорбитальный или низкоорбитальный), обеспечивается обратная связь;
- спутник связи в автоматическом режиме на орбите передает информацию на борт спутника ДЗЗ, обеспечивается обратная связь;
- спутник ДЗЗ передает полученные данные для ретрансляции на Землю через геостационарный спутник связи;
- геостационарный спутник связи транслирует в различных режимах (по требованию потребителя) информацию на приемную станцию или через мобильный (сотовый) телефон прямо на ПЭВМ потребителя. Потребитель сам проводит обработку полученной информации: классификацию ландшафтов, оценку вегетационного индекса, определение объектов и пр. (проводит тематическую обработку данных).

В этом случае традиционные системы связи, применяемые для КА ДЗЗ, дополняются возможностями интернета, спутников связи и даже бытовых средств связи.

Вариант второй полностью базируется на применении готовых программно-технических комплексах (ПТК) и средств связи, в том числе бытовой, с интернетом для обслуживания потребителя, управления съемкой КА ДЗЗ.

Последовательность действий:

- программный комплекс планирования (ПК) в автоматическом режиме через интернет подает заявки в ЦУП+ОЦ;
- ПТК «Сводная заявка» ЦУП+ОЦ передает сформированные задания на съемку территории в ПТК «Управление», откуда заявки передаются на связной терминал;
- информация через спутник связи (низкоорбитальный или высокоорбитальный с обратной связью) поступает на КА ДЗЗ;
- КА проводит съемку и сжатие информации, после чего она поступает на спутник телевизионного вещания (СТВ) и через стандартную бытовую спутниковую антенну поступает на ПК «Обработка» пользователя.

Второй вариант позволяет осуществлять сокращенный и упрощенный вариант:

- для формирования заявок на съемку оптической аппаратурой ДЗЗ потребитель получает на свою телевизионную приемную антенну данные метеорологического спутника и формирует задание на съемку;
- с ПК «Планирование» задание на проведение съемки через связной терминал поступают на низкоорбитальный спутник связи (ПСС) и через него передаются непосредственно на КА ДЗЗ;
- КА ДЗЗ проводит съемку, сжатие информации и передает полученные данные на СТВ;
- СТВ транслирует информацию на бытовую приемную антенну потребителя, оснащенную стандартным ПК «Обработка».

Второй вариант допускает использование спутника ДЗЗ на уровне бытовых потребностей потребителя с использованием бытовой телевизионной техники и специализированных ПТК (ПК), разработанных в мире и Украине.

выводы

В рамках Общенациональной космической программы Украины на 2008—2012 гг. требуется провести целый комплекс НИР для обоснования

и разработки принципиально новых для Украины систем КА ДЗЗ с обеспечением непрерывной съемки и трансляции полученных данных в условиях орбитальной группировки. В Украине развитие космического сектора ДЗЗ возможно лишь при обеспечении принципа демократизации доступа потребителя непосредственно к процессу формирования заказа на съемку Земли и прямого получения космических снимков, для чего следует опробовать и внедрить существующую систему бытового телевещания, средств интернета, мобильной связи.

1. Брыков А. Станция в точке либрации // Авиация и космонавтика.—1987.—№ 7.—С. 42—43.
2. Венчик О. Г. Статистическая оценка смещения луча системы излучателей // Радиотехника и электроника.—1963.—8, № 7.—С. 1130.

3. Парнес М. Д. Фазированные антенные решетки в системах спутникового телевидения // Теле-спутник.—1997.—№ 8 (22).—С. 58—60.
4. II Международная научно-практическая конференция «Университетские спутники — перспективы и реальность» // Сб. материалов конф., Евпатория (НИЦУ-ИКС), 26—30 июня 2007 г. / Под общ. ред. А. Н. Петренко. — Д.: НЦАОМ, 2007.—149 с.

APPROACHES TO CONSTRUCTION AND OPERATION NATIONAL ORBITAL GROUPING

*Ye. I. Bushuev, V. I. Voloshin, A. S. Levenko,
Ye. I. Kapustin, J. I. Stefanishin*

In articles the basic design decisions on construction and operation of a perspective Ukrainian orbital grouping of satellites of remote sounding of the Earth are considered.

Н. А. Анфимов¹, В. И. Лукьянченко¹, В. М. Ольшанский²,
В. В. Суворов¹, М. М. Цимбалюк¹

¹Центральний науково-дослідний інститут машинобудування, Корольов, Московська обл., Росія

²Федеральное космическое агентство (Роскосмос), Москва, Россия

Основные результаты исследований, выполненных на российском сегменте Международной космической станции, и перспективы реализации российских экспериментов с участием Украины

Представлено 03.09.07

Подано основні результати досліджень, виконаних на російському сегменті Міжнародної космічної станції, та перспективи реалізації російських експериментів за участь України.

Исследования и эксперименты на РС МКС осуществляются в соответствии с утвержденной «Долгосрочной программой научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС».

К настоящему времени рассмотрено около 500 предложений на проведение исследований от почти 100 организаций-постановщиков экспериментов. Эта работа проводится на регулярной основе.

«Долгосрочная программа...» включает более 300 исследований и экспериментов. Исследования проводятся по более чем 60 экспериментам.

28 февраля—1 марта 2007 г. в ЦНИИмаш проведена конференция Координационного научно-технического совета Федерального космического агентства (КНТС Роскосмоса) по рассмотрению результатов исследований, проведенных на РС МКС.

В ее работе приняли участие более 150 ученых и специалистов из 25 научных организаций,

предприятий, учебных заведений.

Во время конференции заслушаны 45 докладов с результатами исследований.

На основе представленных материалов готовится к изданию специальный выпуск журнала «Космонавтика и ракетостроение».

Конференция дала возможность научной общественности оценить достигнутый уровень знаний по различным направлениям исследований и перспективы их использования для земных потребностей.

По научному направлению «Космическая технология и материаловедение» были представлены основные результаты проведенных исследований по кристаллизации биологических макромолекул и получению биокристаллических пленок в условиях микрогравитации.

Работы по кристаллизации белков на РС МКС реализуются с целью получения совершенных кристаллов для рентгеноструктурного анализа с качеством, недостижимым в наземных условиях

из-за влияния гравитации (реализуемое пространственное разрешение достигает 0,5—1 Å).

Информация о строении белков необходима при создании лекарственных, профилактических и диагностических препаратов для лечения многих болезней.

Она также востребована фундаментальными биологическими науками для изучения на молекулярном уровне многих биологических процессов, в том числе для сравнения природных (натуральных) белков, являющихся лекарственными препаратами, с их искусственными аналогами.

Космические эксперименты по выращиванию двумерных белковых пленок позволяют отработать технологии получения новых материалов для нанотехнологий и биоэлектроники.

Такие пленки с широким спектром уникальных электрических и оптических свойств перспективны для создания компьютеров нового поколения.

В ходе геофизических исследований изучены закономерности атмосферных оптических явлений естественного происхождения в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Получены систематические данные для уточнения и верификации существующих моделей и параметров верхней атмосферы Земли в зависимости от гелиофизических условий.

С целью обнаружения и изучения землетрясений, пожаров, наводнений и других катастрофических явлений с борта РС МКС проводятся визуальные наблюдения и съемка заданных районов Земли фото- и видеоаппаратурой с различными уровнями разрешения.

В ходе исследований осуществляется мониторинг нефтедобывающих районов, пожароопасной обстановки, селевой и ледниковой опасности, загрязнения объектов городских агломераций и выявление потенциально опасных мест.

С 2001 г. на борту РС МКС ведутся медико-биологические исследования в области физиологии, биологии, медицинского обеспечения, радиационной безопасности.

Осуществляется сбор данных по изменениям в организме человека в условиях продолжительной невесомости.

Зафиксировано значительное влияние факторов пилотируемого космического полета на рост,

репродукцию и биологические свойства тестируемых бактерий и грибов. Установлено возрастание активности ферментов, характеризующих уровень потенциала патогенности, а также устойчивости микроорганизмов к антимикробным средствам.

Впервые показано, что растения гороха при культивировании в течение четырех последовательных циклов онтогенеза («от семени до семени») в условиях космического полета сохраняют репродуктивные функции и формируют при этом жизнеспособные семена без изменений в генетическом аппарате растений гороха.

Выполнены исследования реактивации покоящихся стадий и жизненного цикла водных ракообразных после 30-суточной экспозиции их покоящихся яиц на борту РС МКС.

Получены первые подтверждения воздействия факторов среды на эмбрион, которое приводит к изменению параметров жизненного цикла и адаптивности у развивающихся организмов, вышедших из этих организмов и их потомков.

Проведены сравнительные оценки физических средств для профилактики неблагоприятного воздействия факторов космического полета на организм человека, созданы новые средства медицинского контроля, усовершенствованы средства оказания медицинской помощи.

Изучены закономерности формирования радиационных полей в теле человека в условиях космического полета и в отсеках орбитальных станций с использованием шарового фантома с учетом геофизических и радиационных условий в околосолнечном пространстве.

В целях изучения биопродуктивности Мирового океана осуществлены многократные наблюдения в различные сезоны года акваторий, воды которых известны богатым содержанием биогенных веществ, контрастным проявлением гидрофизических, гидродинамических и гидробиологических факторов состояния морских экосистем.

Показаны возможности получения высокоэффективных штаммов микроорганизмов — продуцентов биологически активных веществ для практического использования в нефтедобывающей (биодеградантов нефти) и сельскохозяйственной отраслях (стимуляторов роста и средств защиты растений), а также в интересах экологии.

После длительного экспонирования в условиях орбитального полета выделены перспективные штаммы микоризных грибов-продуцентов стимуляторов роста растений, обладающих повышенной активностью по стимулированию роста корней и стеблей сельскохозяйственных культур.

Исследования пылевой плазмы, выполняемые в течение ряда лет под руководством академика В. Е. Фортова на РС МКС, вызывают большой интерес в связи с обнаружением ряда новых физических явлений и эффектов. Многие из этих результатов являются научной основой создания перспективных высокоеффективных плазменно-коллоидных технологий, новых технологий получения сверхтвердых материалов и др.

В обеспечение разработок перспективных пилотируемых космических средств проведены следующие исследования:

- изучены начальные этапы биодеградации и биоповреждений в космосе и разработаны рекомендации по их предотвращению на начальных этапах развития;
- осуществлен запуск с борта МКС и проведены летные испытания технологического наноспутника ТНС-0 № 1;
- разработаны и реализованы методы реконструкции несанкционированных внешних силовых воздействий на конструкцию МКС по телеметрическим каналам;
- создана и испытана система экспрессного мониторинга токсичности воды, воздуха и конденсата в условиях космического полета;
- осуществлялся мониторинг и регистрация ударов микрометеороидных и техногенных частиц;
- уточнены динамические характеристики МКС и условия выполнения исследований на станции;
- оценены возможности высокоточного прогнозирования движения МКС;
- подтверждена целесообразность использования транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс» в качестве платформы для выполнения исследований в области микрогравитации, что обеспечивает достижение уровня микроускорений в инфраструктуре РС МКС порядка $10^{-6} g$;

- уточнены электрофизические процессы в плазменном окружении МКС и ТГК «Прогресс»;
- изучена динамика загрязнения внешней поверхности служебного модуля МКС вблизи двигателей крена и подтверждена эффективность газодинамических защитных устройств, установленных на двигатели крена РС МКС с целью снижения уровня загрязнения.

Полученные на МКС результаты подтвердили наличие ряда новых эффектов в пространственно-временных вариациях радиационных полей ближнего космоса, связанных с необычными проявлениями солнечной активности после 2000 г. Они дополняют исходные данные, необходимые для создания прогностической модели радиационной обстановки на орbitах орбитальных пилотируемых космических станций.

Исследования космических лучей высоких энергий дали ценную информацию о наименее изученной компоненте энергичных космических лучей — ионах железа в спокойное время и во время солнечных вспышек.

За период эксплуатации РС МКС выполнены три научно-образовательных эксперимента «Колибри-2000», «МАИ-75», «РадиоСкаф».

С 2004 г. МГУ им. М. В. Ломоносова и Московский городской Дворец детского и юношеского творчества реализуют научно-образовательную программу и конкурс проектов школьников «Эксперимент в космосе».

В 2005—2007 гг. прошла конкурсная защита более 150 проектов школьников из Москвы, Подмосковья и 15 регионов России. Отобраны 10 проектов экспериментов для постановки на РС МКС.

В течение ряда лет идет совместная работа российских и украинских ученых и специалистов.

Сейчас уже можно доложить научной общественности о некоторых завершенных этапах этой продолжительной и трудоемкой работы.

Так, в конце 2006 г. утверждена «Долгосрочная программа российско-украинских научных исследований и экспериментов на российском сегменте МКС», а на заседании КНТС Роскосмоса 5 июля 2007 г. принято решение о включении в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, плани-

руемых на российском сегменте МКС» следующих космических экспериментов с участием Украины: «Обстановка-1», «Обстановка-2», «Планетный мониторинг», «Биосорбент», «Биополимер», «Трубка», «Материал-Трение», «Пента-Усталость», «Трабант», «Морфос-В».

По сложившейся практике подготовки и проведения космических экспериментов на РС МКС, включение экспериментов в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС» открывает путь к их практической реализации.

Остальные первоочередные эксперименты с участием Украины планируется включать в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС» по мере подготовки

необходимой научно-технической документации.

Имеются весомые основания предполагать, что все первоочередные эксперименты с участием Украины будут подготовлены к практической реализации уже в ближайшее время.

THE ESSENTIAL RESULTS OF THE INVESTIGATIONS
PERFORMED ON THE RUSSIAN SEGMENT
OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION AND
THE PROSPECTS FOR THE REALIZATION
OF RUSSIAN EXPERIMENTS WITH THE
PARTICIPATION OF UKRAINE

N. A. Anfimov, V. I. Lukashchenko, V. M. Olszanski, V. V. Suvorov, M. M. Tsybalyuk

УДК 629.78.018

Ю. А. Похил, А. М. Кислов, В. Г. Романенко, А. Я. Левин

Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

КЭ «Пента—Усталость». Численное моделирование тепловых режимов блока циклического нагружения образцов в бортовой установке «Цикл-1»

Представлено 03.09.07

Наведено результати чисельного моделювання нестационарного температурного режиму блоку циклічного навантаження зразків різних матеріалів для двох варіантів конструктивної схеми в залежності від теплофізичних властивостей елементів конструкції та орбітальних умов космічного експерименту

ВВЕДЕНИЕ

Блок циклического нагружения (БЦН) входит в состав научной аппаратуры, которая устанавливается на внешней поверхности Международной космической станции (МКС) для проведения космического эксперимента «Пента — Усталость» [2, 3]. Целью эксперимента является исследование совместного влияния факторов космического пространства на циклическую долговечность материалов в условиях орбитального полета. Блок циклического нагружения предназначен для одновременных испытаний в идентичных внешних условиях партии плоских консольных образцов (8 шт.) из одного материала на циклический изгиб. Предполагаемая база испытаний составляет $5 \cdot 10^6$ циклов в течение примерно семи суток полета.

В работе для определенной модели орбитальных условий эксперимента проведено численное моделирование температурного режима элементов БЦН для двух вариантов его конструктивной схемы: с закрытыми в корпусе и открытыми

в космос держателями образцов. Исследовалась зависимость нестационарных температур элементов блока от их теплофизических и оптических характеристик. При этом одной из основных задач был выбор таких характеристик, при которых достигался максимальный перепад температуры образцов при прохождении освещенного и теневого участков рабочих витков орбиты. Получено, что по этому критерию имеет преимущество конструктивная схема с открытыми держателями образцов.

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ БЛОКА ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

В схеме БЦН с закрытыми в корпусе держателями образцов, приведенной на рис. 1, высота корпуса 215 мм, габаритный диаметр 225 мм, толщина стенки 1.5 мм. Дно корпуса имеет посадочные лапы для закрепления БЦН на установочной плате — диске диаметром 340 и толщиной 5 мм. Внутри корпуса к его дну 4 на

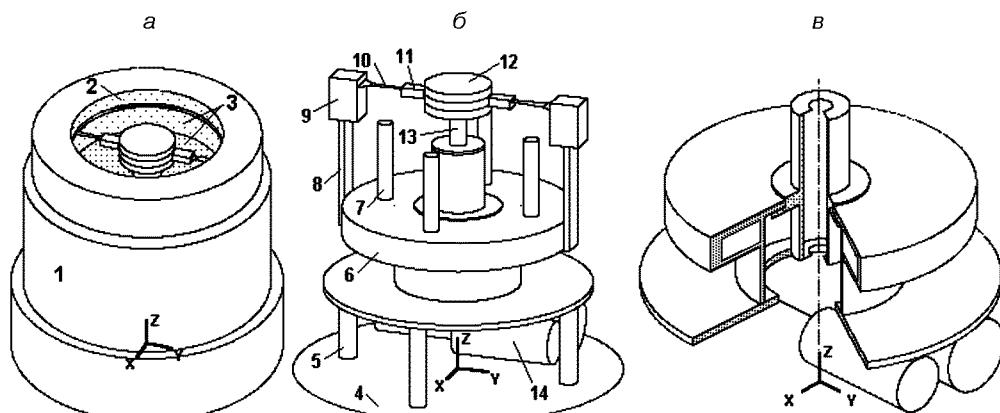


Рис. 1. Конструктивная схема БЦН с закрытыми держателями образцов: *а* — вид спереди (установочная плита не показана, 1 — корпус, 2, 3 — верхний и нижний тепловые экраны); *б* — внутренние элементы конструкции; *в* — опорная платформа с приводом

трубчатых стойках 5 прикреплена опорная платформа 6, ее центральная продольная часть с цилиндрическим подшипником служит направляющей для штока 13. К верхней части платформы на трубчатых стойках 7 прикреплен тепловой экран 3. В нижней части платформы установлен электродвигатель с редуктором (привод 14); запуск двигателя возможен при условии, что его температура положительна.

По периметру верхнего основания опорной платформы установлены пластины — динамометры 8 (сталь 65Г). На верхних концах пластин закреплены восемь держателей 9, в которых защемлены неподвижные концы испытываемых образцов 10 (из сплава АМг6 или ВТ-14) в виде фигурной пластины с участком равного сопротивления изгибу [3]. Второй конец каждого из восьми образцов соединен подвижным защемлением 11 с роликом, входящим в паз захвата 12, который укреплен на верхнем конце штока 13. Шток через кривошипно-шатунный механизм связан с приводом и совершает возвратно-поступательное движение с частотой 10 Гц и амплитудой 5 мм. Тем самым обеспечивается симметричная нагрузка на образцы, которые должны испытываться на циклический изгиб с термоциклированием в условиях орбитального полета в течение семи суток.

В схеме БЦН с открытыми держателями образцов снята верхняя часть корпуса и верхний

тепловой экран 2. Нижний экран 3 имеет тепловой контакт с корпусом. Материал пластин 8 заменен на сталь 60С2А с меньшим (почти вдвое) коэффициентом теплопроводности. Эти конструктивные изменения направлены на то, чтобы увеличить температурную амплитуду держателей и защемленных в них образцов на орбитальных участках свет — тень.

ПОСТАНОВКА И МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При проведении космического эксперимента (КЭ) необходимо обеспечить максимальный перепад освещенности образцов Солнцем на участках свет — тень рабочих витков орбиты. Выполнение этого условия существенно зависит от места установки БЦН на поверхности станции (температура посадочных мест, затенение элементами станции, собственное излучение этих элементов), а также от параметров орбиты и ориентации МКС.

Для расчетной оценки тепловых режимов БЦН в орбитальном полете принимается, что он установлен на штанге — удлинителе, при этом элементы станции не влияют на тепловой режим блока. На основании имеющихся данных о реальных параметрах орбиты, ориентации и условиях освещенности МКС в течение нескольких последних лет принимаем, что орбита стан-

ции является круговой с параметрами: высота $H \approx 345\text{--}350$ км, наклонение $i = 51.65^\circ$, период обращения $P \approx 91.5$ мин. Восходящий узел орбиты из-за вековых возмущений смещается на угол $\Delta\Omega \approx -5.1^\circ$ в сутки, в результате чего с течением времени изменяется угол β между плоскостью орбиты и вектором направления на Солнце, а вместе с ним — условия освещенности Солнцем элементов станции и БЦН.

Чтобы обеспечить максимальный перепад освещенности испытываемых образцов, сеанс КЭ необходимо проводить на витках, для которых Солнце находится вблизи плоскости орбиты. Проведенные оценки показывают, что для принятых параметров орбиты имеются в течение года 10—12 примерно 7-суточных «окон», когда $|\beta| \leq (15\text{...}16^\circ)$. Сеанс КЭ нужно начинать за 3.5 сут до момента времени, когда достигается значение $\beta = 0$. В качестве основного рассматривается вариант орбитальной ориентации БЦН, при которой ось $+Z$ направлена в зенит, и на теневых участках рабочих витков на образцы не падает поток излучения от Земли.

Моделирование тепловых режимов БЦН проводилось для витка орбиты с долготой восходящего узла $\Omega = 12^\text{h}$ на дату весеннего равноденствия 2006 г. Принималось, что солнечная постоянная $SC = 1380 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (на заданную дату), плотность потока собственного излучения Земли $230 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и альбедо 0.32 [<http://www.tak2000.com/data/planets/earth.htm>]. Время пребывания БЦН в тени Земли и на освещенном участке витка составляет примерно 36 и 55 мин.

Для выбранных орбитальных условий проведения КЭ ставились такие основные задачи численного моделирования тепловых режимов блока циклического нагружения.

1. Исследование нестационарного температурного поля в системе элементов БЦН в зависимости от конструктивной и тепловой схемы, теплофизических и термооптических (α_s, ε) характеристик элементов.

2. Выбор конструктивной и тепловой схем, обеспечивающих максимальный перепад температуры испытываемых образцов в сеансе КЭ.

3. Анализ температурного режима элементов привода и разработка тепловой схемы узла привода, которая обеспечивает в сеансе КЭ допустимый диапазон рабочих температур двигателя с учетом требования, что при запуске его тем-

пература должна быть положительной.

Температурный режим системы элементов БЦН определяется с учетом совместного действия излучения, теплопроводности и всей совокупности тепловых взаимосвязей между элементами при воздействии прямого излучения Солнца, потоков собственного и отраженного солнечного излучения от Земли, а также внутренних тепловыделений, обусловленных работой привода. Мощность тепловыделения в приводе составляет 6 Вт, в подшипнике штока — 2 Вт и, предположительно, до 0.1 Вт в образце за счет циклической изгибной деформации.

Для начальной сравнительной оценки различных вариантов конструктивной и тепловой схем принимается, что температурное поле системы «установочная плита — корпус БЦН» осесимметричное относительно оси Z . При расчете теплового режима для выбранного варианта схемы БЦН учитывается зависимость температуры корпуса от угловой координаты.

Тепловая схема системы строится на основе модели сосредоточенных параметров. Цилиндрические элементы и пластины имитируются стержнями постоянного поперечного сечения, а диски (кольца) и испытываемые образцы материалов — стержнями переменного сечения. Узел опорной платформы, двигателя и редуктора, имеющий сложную пространственную конфигурацию, рассматривается в каждый момент времени как тело с однородной температурой, так как по расчетной оценке для этого узла число $Bi \ll 1$.

Численное моделирование тепловых режимов БЦН проводилось с использованием программ OASIS и ANTRES пакета TRASSA-2 [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты температурного режима элементов БЦН с закрытыми держателями образцов проведены для ряда вариантов оптических характеристик поверхностей при работающем и неработающем приводе и тепловыделении в образцах $Q_o = 0$ и 0.1 Вт. Для системы «установочная плита, внешняя поверхность корпуса — внутренние поверхности корпуса и тепловых экранов» рассматривались комбинации термооптических параметров:

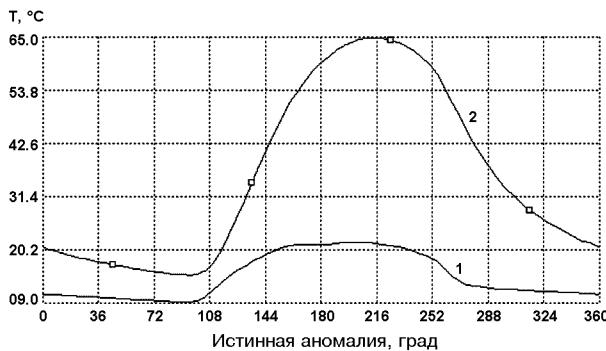


Рис. 2. Изменение температуры образцов на витке (при собственном тепловыделении 0.1 Вт): 1 — образец из АМг6, 2 — образец из ВТ-14

- 1) $\varepsilon = \alpha_s = 0.9 - \varepsilon = 0.2$;
- 2) $\varepsilon = 0.9, \alpha_s = 0.25 - \varepsilon = 0.9$;
- 3) $\varepsilon = 0.9, \alpha_s = 0.25 - \varepsilon = 0.2$.

Для полированных внешней поверхности тепловых экранов и поверхностей образца принимались $\varepsilon = 0.1, \alpha_s = 0.15$; для внутренних элементов системы $\varepsilon = 0.2—0.4$.

Для рассмотренных вариантов при работающем приводе и $Q_o = 0$ размах температуры образцов из АМг6 и ВТ-14 составляет за виток примерно 13 °С и 50 °С. Оптимальным будем считать вариант 2 термооптических параметров, поскольку для него температура образцов из ВТ-14 принимает отрицательные и положительные значения. Диапазон изменения температуры основных элементов на витке: +7 ... +20 °С (образец из АМг6) и -10 ... +42 °С (ВТ-14), -46...-16 °С (корпус), -36 ... -15 °С (установочная плита), +14 ... +17 °С (опорная платформа с приводом), -14 ... +16 °С (тепловой экран).

На рис. 2 приведен график изменения температуры образцов при собственном тепловыделении в них $Q_0 = 0.1$ Вт. Видно, что тепловыделение повышает температурный уровень, но не амплитуду температуры.

В режиме ожидания БЦН на орбите неработающий двигатель имеет отрицательную температуру (-39 ... -36 °С), и не может быть включен. Для повышения температуры двигателя и всего привода до положительных значений перед сеансом КЭ предлагается использовать нагреватель мощностью 10 Вт; за 2-3 витка температура повышается до +2...+10 °С.

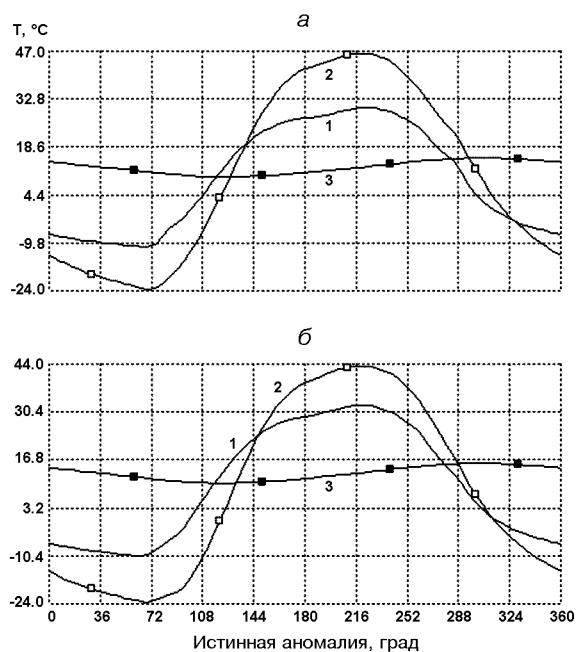


Рис. 3. Температура элементов БЦН на витке (1 — образец АМг6, 2 — образец ВТ-14, 3 — опорная платформа и привод): а — угол $\beta = 0$, б — через 3.5 сут ($\beta \approx 16^\circ$)

Результаты расчета температуры основных элементов БЦН с открытыми держателями образцов в рабочем режиме при $Q_o = 0$ приведены на рис. 3. Диапазон температуры образцов АМг6 и ВТ-14 составляет -11 ... +30 °С и -23 ... +48 °С на витке орбиты, для которого угол $\beta = 0$. Через 3.5 сут, когда $\beta \approx 16^\circ$, температура образцов на витке изменяется в диапазоне -10 ... +32 °С и -24 ... +44 °С. Таким образом, для этого варианта схемы БЦН диапазон термоциклирования образцов существенно больше, чем для схемы с закрытыми держателями. Температура других элементов: +10 ... +16 °С (привод), -36 ... -14 °С (корпус, тепловой экран), -33 ... -14 °С (установочная плита). При неработающем приводе температура двигателя -30 ... -24 °С.

В результате расчета температурного диапазона образцов при тепловыделении в них $Q_0 = 0.1$ и 0.2 Вт получено, что повышается средняя температура образцов при слабом изменении амплитуды. Для образца из сравнительно высокотеплопроводного сплава АМг6 средняя температура повышается примерно на 2 и 6 °С относительно ее значения при $Q_o = 0$; в образце из

низкотеплопроводного сплава ВТ-14 средняя температура повышается на 24 и 48 °С.

Проведены уточненные расчеты температуры элементов БЦН на витке с учетом того, что освещенность и температура корпуса зависят от угловой координаты. Получено, что эта неоднородность практически не влияет на температуру элементов блока.

1. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А., Яковенко Л. Ф. и др. Исследование влияния ФКП на циклическую долговечность материалов в условиях реального космического полета. КЭ «Пента—Усталость» // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 33—39.
2. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. Н. Пакет программ TRASSA для расчета тепловых режимов космических аппаратов // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 4.—С. 1—14.

3. Похил Ю. А., Гаврилов Р. В., Яковенко Л. Ф. и др. Научная аппаратура и материалы для реализации КЭ «Пента—Усталость» // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 1.—С. 3—11.

SPACE EXPERIMENT «PENTA — FATIGUE». NUMERICAL MODELING CONDITIONS FOR CYCLIC LOADING UNIT OF SAMPLES IN ON-BOARD FACILITY «CYCLE-1»

*Yu. A. Pokhyl, A. M. Kislov, V. G. Romanenko,
A. Ya. Levin*

The results of numerical modeling of a non-stationary temperature condition of the cyclic loading unit of various materials samples for two variants of the constructive schemes are given depending on thermal-physical properties of structure elements and orbital conditions of space experiment

UDC 520.2+520.874.7

V. Kuz'kov¹, Z. Sodnik², S. Kuz'kov¹, D. Volovyk¹, S. Pukha³

¹Main Astronomical Observatory, NAS of Ukraine, Kyiv
e-mail: kuzkov@mao.kiev.ua

²ESTEC ESA, Postbus 229, 2200 AG Noordwijk, the Netherland,
e-mail: Zoran.Sodnik@esa.int

³NTUU «KPI», Spatial Design Bureau «Shtorm», Kyiv

Laser communication experiments with a geostationary satellite from a ground telescope

Представлено 03.09.07

The Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine is currently developing all necessary hardware to perform laser communication experiments between its 0.7-m telescope and the ARTEMIS satellite. Laser communication equipment will be installed in the Cassegrain focus of the AZT-2 telescope. Continuing the previous developments dealing with receiving and transmitting channels, the acquisition and tracking systems are now being developed, as well as a turbulence compensation system, which will reduce the pointing errors during the communication with ARTEMIS. The description of the performed work and some test results are given in the paper.

INTRODUCTION

The ESA telecommunication satellite ARTEMIS was launched on July 12, 2001. It is located in a geostationary orbit (21.5° East) and equipped with RF terminals (in L-band, S-band, Ku-band and Ka-band) and a laser communication terminal (LCT). The LCT communicates with a similar LCT onboard the low Earth orbiting (LEO) satellite SPOT-4. The optical data relay system onboard ARTEMIS, called Semiconductor Laser Inter Satellite Link Experiment (SILEX), operates at 2 Mbps in transmission and at 50 Mbps in reception. On November 21, 2001 ESA successfully performed the world first laser communication experiments between the LEO satellite SPOT-4 and ARTEMIS [10]. Laser communication between OICETS satellite (JAXA, Japan) [11] and ARTEMIS (ESA) were successfully performed in 2006.

Since 2003 laser communication experiments between ESA's Optical Ground Station (OGS), located at the Teide observatory, and ARTEMIS

are regularly performed [1, 8, 9]. These experiments investigate the influence of atmospheric turbulence on laser beam propagation. In 2007 successful laser communication was performed by Astrium, France, between an airplane and ARTEMIS in the experiment called LOLA.

For future laser communication between ground telescopes and spacecraft in Earth orbits and in orbits around the Moon and Mars [2] it is important to continue the investigation of influence of atmosphere on laser beam propagation and to compare results from different atmosphere regions. This can be done by using different ground telescopes, for example, ESA's OGS (Canary Islands, $h = 2400$ m) and the Main Astronomical Observatory (MAO), Ukraine ($h = 190$ m).

In 2001, MAO investigated the possibility of laser communication experiments between ground telescopes and ARTEMIS and contacted the telecommunication department of ESA. MAO is equipped with several telescopes and has experience in distance measurements from its laser ranging station to LEO satellites.

In 2002, ESA experts visited MAO and discussed the possibility to perform laser communication experiments using MAO equipment. It was concluded that it would be interesting to compare laser link experiments of ESA's OGS ($h = 2400$ m, Atlantic region) with experiments performed in Kyiv ($h = 190$ m, Continental region).

According to the meeting agreement, MAO developed the equipment to be used in laser communication experiments with ARTEMIS in the Cassegrain focus of an astronomical telescope with a small amount of support from the National Space Agency of Ukraine (NSAU) [4–6].

An astronomer from MAO was invited by ESA to visit the OGS in 2004. He participated in laser communication links with ARTEMIS.

MAO is currently developing all necessary hardware to perform laser communication experiments between its 0.7-m telescope and ARTEMIS satellite. The laser communication equipment will be installed in the Cassegrain focus of the AZT-2 telescope. Currently, the acquisition and tracking system is being developed. ARTEMIS is a geostationary satellite with high inclination (its position on the sky is currently fluctuating by $\pm 5.8^\circ$ in North-South direction) so that active tracking is necessary.

In addition, MAO is developing a turbulence compensation system that will reduce the pointing errors during the laser communication with ARTEMIS. The detailed description of the work being performed is given in the report.

PREVIOUS MAO DEVELOPMENTS

The Main Astronomical Observatory of Ukraine plans to use the reflector-type telescope AZT-2 for laser communication with ARTEMIS. The equipment is going to be implemented in the Cassegrain focus of the telescope. The primary telescope mirror has a diameter of 700 mm and the secondary hyperbolic mirror of 215 mm. The focal length of the Cassegrain system is 10500 mm. The AZT-2 telescope is equipped with a refractor guiding telescope with an aperture of 200 mm in diameter and a focal length of 2500 mm.

For several years the preparations for the laser communication experiments with ARTEMIS have been ongoing. We first developed the receiving and

transmitting parts of the communication system.

According to our calculations and data provided by ESA, the density of the power of laser communication signal coming from the satellite to the Earth's surface (taking into account the standard absorption of the atmosphere at the angle of 60° to zenith) is about 35 nW/m^2 in the spectral region of 816–823 nm. The receiving data rate is 2048 kbit/s. For the given spectral band an avalanche Si-photodiode (APD) is used. APD ensures the intrinsic amplification of signal and the possibility of operation in the photon-counting mode. We achieved receiver sensitivity of 0.15 nW in frequency band of 8 MHz. The detailed description of the receiving channel using an APD is presented in previous publications [5, 6].

The ground station must transmit an optical beam with a data rate of 49.4 Mbit/s in the spectral region from 843 to 852 nm and must ensure an irradiance of 90 nW/m^2 (at the geostationary satellite). The laser transmitting module that was developed produces a transmit peak power of up to 200 mW with a modulation current of up to 350 mA.

All laser radiation which is being sent to ARTEMIS should have the left-hand circular polarization (LHCP) with a deviation less than 2.5 % from the ideal LHCP. We use a quarter-wave plate in the spectral region of 800–900 nm for the transformation of linear polarization of laser beam into the required LHCP. An extended description of transformation and measurement equipment is presented in [7]. We achieved the deviation less than 1.7 % from the ideal LHCP. Furthermore, we performed an investigation in atmosphere conditions in the direction towards ARTEMIS [3].

SCHEME OF ORIENTATION

If laser communication is performed between a ground optical station (telescope) and a geostationary satellite, the time delay T_d of signal between received and transmit signals appears (Fig. 1).

Time delay is determined by the equation: $T_d = 2L/C$, where L ° is the distance from the ground station to the satellite. In our case $L = 38000$ km, $T_d = 0.253$ sec. The angle θ_v between the visible position of the satellite and the direction of sent

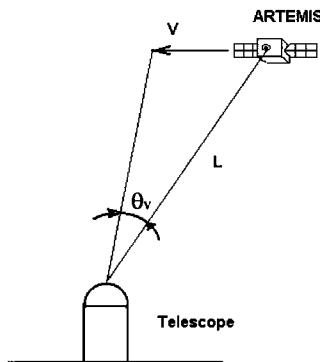


Fig. 1. Scheme of time delay of propagation of laser signals and cone effect

signal is determined by the equation:

$$\theta_v = 15'' \cos \delta, \quad (1)$$

where δ is the angle of inclination of the satellite on the sky. The OGS of ESA has the following coordinates: Longitude 16.5101° W, Latitude 28.2995° N and Altitude 2393 m. The coordinates of MAO are the following: Longitude 30.4967° E, Latitude 50.3642° N and Altitude 190 m. ARTEMIS is a geostationary satellite whose inclination is not controlled. Its deviation is 5.8° from the nominal declination of $\delta = -7^\circ 17''$. According to equation (1), the angle between the receiving and transmitting direction of the laser beams vary between 3.7 arcsec and 3.8 arcsec, which is the so called point ahead angle. For the maximum deviation of $\theta_v = 3.8$ arcsec the distance between laser beams is determined by the equation: $d_L = 2L \cdot \sin(\theta_v/2)$. For $L = 38000$ km, $d_L = 0.7$ km.

The diameter of laser beam has to be optimized for the concrete place of the link with the satellite. The diameter of laser beam spot with a beam divergence of 1 arcsec at the level of ARTEMIS is 166 m. An error of 0.5 arcsec in value of θ_v is significant for the density of communication signal.

The situation is similar in astronomical guide star systems where an artificial laser star in the upper atmosphere is used. In the common case the cone effect exists, where the light from the guide star and the observing star move through different air masses [12].

ACQUISITION AND TRACKING SYSTEMS

MAO is currently developing the acquisition and tracking system for laser communication experiments with ARTEMIS.

The optical pointing scheme for acquisition of the ARTEMIS satellite is shown in Fig. 2. An accuracy of coordinate position of the telescope is two angular minutes. The CCD_1 camera (2000×3000 pixels) was used with a wide angle Maksutov objective ($D = 10$ cm, $F = 1$ m). This camera can work with short time exposures of up to 30 sec or more. The CCD_2 camera (795×596 pixels) works at the guiding telescope ($D = 20$ cm, $F = 2.5$ m) and transmits the image to the computer, where it is recorded and displayed. The CCD_3 camera is planned to be used in Cassegrain focus of 0.7-m telescope ($F = 10.5$ m). It could be TV or faster frame rate CCD or CMOS camera. The signals from the CCD_3 camera could be analyzed by the computer for precise correction of the telescope tracking along α , δ coordinates.

The acquisition and tracking system works in micro-step regime with the computer step of correction $\omega = 0.003$ arcsec/s and maximum speed of correction up to 4.6 arcsec/s. The step regulation is possible directly from block of correction situated near the telescope. Also it is possible to correct the movement of the telescope using the RS-485 interface in remote mode.

We tested the acquisition system by performing the observation of group of ASTRA-1L, ASTRA-

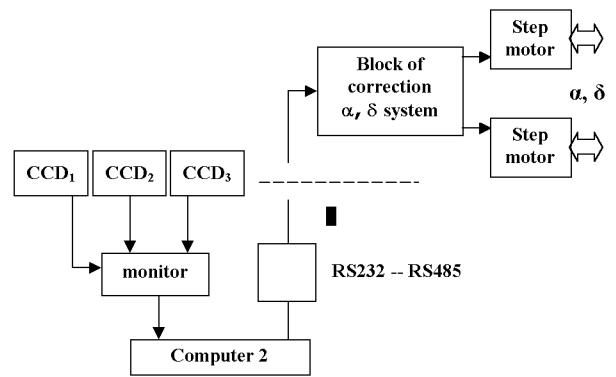


Fig. 2. The optical pointing scheme

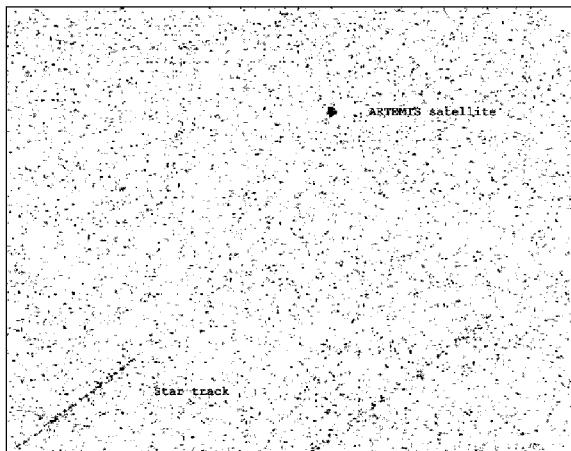


Fig. 3. ARTEMIS geostationary satellite at 21.3° E

1KR, ASTRA-1H, ASTRA-1G, ASTRA-1F and ASTRA-1E geostationary satellites. The CMOS camera (30 s exposition) was used. ARTEMIS satellite's speed is approximately up to 2 arcsec/s. The first observation of ARTEMIS was performed without the tracking correction system. This observation let us calculate the required speed of correction.

Fig. 3 shows the ARTEMIS satellite image with enabled correction system (CMOS camera, 30 sec exposition). At the time of observation ARTEMIS speed was 1.17 arcsec/s. The analysis of ARTEMIS picture led us to the result that real trace accuracy of correction system is less than 1 arcsec/s.

AUTOMATIC TELESCOPE TRACKING ALONG α AND δ COORDINATES. ATMOSPHERE TURBULENCE COMPENSATION

For the precise guiding of the ARTEMIS satellite it would be better to have an automatic tracking telescope system (ATTS) along α and δ coordinates.

Some elements of ATTS can be used in turbulence compensation devices. In simple case these devices can use tip/tilt mirrors with piezoelectric or electromagnetic actuation.

ATTS has a quadrant photodiode with

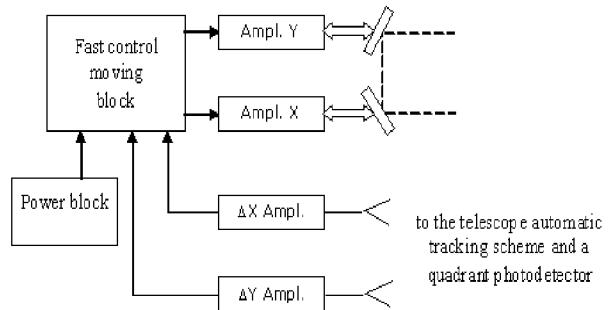


Fig. 4. Block scheme of turbulence compensation system

preamplifiers, differential amplifiers, and filters. The signals from these filters are used by the turbulence compensation system and by other filters of ATTS. After that the signals are digitized and processed by a microcomputer. The digitized signal can also be used by the tracking system to track the satellite.

The output signals of tracking scheme go into the turbulence compensation system (Fig. 4). This system has the amplifiers and the fast moving mirrors for compensation of position of turbulent moving image along X and Y coordinates.

CONCLUSIONS

The result of our calculations and previous experiments from ESA's OGS show that the laser communication link with ARTEMIS requires a laser beam divergence of ≤ 2 arcsec. Such a small divergence requires precise tracking of the geostationary satellite and the implementation of a point ahead angle between the transmit and the receive beams.

We have developed and tested an acquisition and tracking system for our 0.7-m astronomical telescope, which performs the tracking of the geostationary satellite with a maximum speed along α and δ coordinates of up to 4.6 arcsec/s. The tracking speed resolution is 0.003 arcsec/s.

Our workgroup is also developing a turbulence compensation system, which operates with a quadrant photodetector and an auto-tracking system. The turbulence compensation system will reduce the pointing errors during the laser communication with ARTEMIS.

This work is being performed under ESA contract: 19861/06/NL/PA.

REFERENCES

1. Alonso A., Reyes M., Sodnik Z., et al. Performance of satellite-to-ground communications link between ARTEMIS and the Optical Ground Station // Proc. SPIE.—2004.—**5572**.—P. 372—383.
2. Khatri F. I., Boroson D. M., Murphy D. V., et al. Link analysis of Mars-Earth optical communications system // Proc. SPIE.—2004.—**5338**.—P. 143—150.
3. Kuz'kov V., Andruk V., Sodnik Z., et al. Investigation of Atmospheric Instability for Communication Experiments with ESA's Geostationary Satellite ARTEMIS // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.—2005.—N 5.—P. 561—565.
4. Kuz'kov V. P., Medvedskii M. M., Yatskiv D. Ya., et al. Preparation for optical Communication Experiments with the Geostationary Satellite ARTEMIS // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya.—2003.—**9**, N 4.—P. 79—83.
5. Kuz'kov V. P., Nedashkovskii V. N. Receiving system for ground-space laser communication // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. Suppl.—2003.—N 2.—P. 106—109.
6. Kuz'kov V. P., Nedashkovskii V. N. A Receiver with an Avalanche Photodiode for the Optical Communication Channel from a Geostationary Satellite // Instruments and Experimental Techniques.—2004.—**47**, N 4.—P. 513—515.
7. Kuz'kov V. P., Nedashkovskii V. N., Savenkov S. N., et al. Investigation of the polarization of the laser transmitting module for communication experiments with the geostationary satellite ARTEMIS (ESA) // Kosmichna Nauka i Tekhnologiya.—2006.—**12**, N 1.—P. 23—28.
8. Reyes M., Alonso A., Sodnik Z., et al. Ground to space optical communication characterization // Proc. SPIE.—2005.—**5892**.—P. 1—16.
9. Reyes M., Sodnik Z., Lopez P., et al. Preliminary results of the in-orbit test of ARTEMIS with the Optical Ground Station // Proc. SPIE.—2002.—**4635**.—P. 38—49.
10. Tolker-Nielsen T., Oppenhauser G. In-orbit test result of an operational optical inter satellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX // Proc. SPIE.—2002.—**4635**.—P. 1—15.
11. Toyoshima M., Yamakawa S., et. al. Ground-to-satellite optical link tests between the Japanese laser communication terminal and the European geostationary satellite ARTEMIS // Proc. SPIE.—2004.—**5338**.—P. 1—15.
12. Renaud F. Laser guide stars: principle, cone effect and tilt measurement // Proc. NATO Advanced Study Institute on Optics in Astrophysics. Cargese, France, 16—28 September 2002. — Berlin: Springer, 2005.—P. 249—273.—(NATO Sci. Ser. II. Mathematics, Physics and Chemistry.—Vol. 198).

ЛАЗЕРНІ КОМУНІКАЦІЙНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ МІЖ ГЕОСТАЦІОНАРНИМ СУПУТНИКОМ І НАЗЕМНИМ ТЕЛЕСКОПОМ

B. Кузьков, З. Содник, С. Кузьков, Д. Воловик, С. Пуха

В даний час Головна астрономічна обсерваторія НАН України розробляє необхідне устаткування для проведення лазерних комунікаційних експериментів між телескопом та супутником ARTEMIS. Лазерне комунікаційне обладнання буде встановлене в кассегренівському фокусі 0.7-м телескопа АЗТ-2. Продовжуються попередні розробки приймального і передавального каналів, розроблено системи наведення, супроводу та компенсації турбулентності. Остання дозволить зменшити похибку наведення при комунікаційних експериментах. Наводиться опис здійсненої роботи і деякі тестові результати.

УДК 523.3:523.4

**Я. С. Яцків, А. П. Видьмаchenko, А. В. Мороженко,
М. Г. Сосонкин, Ю. С. Іванов, И. И. Синявский**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

Спектрополяриметрическая аппаратура для внеатмосферного исследования тел Солнечной системы

Представлено 03.09.07

Обґрунтовається доцільність використання поляриметричної апаратури при підготовці й реалізації космічних експериментів для проведення безперервного й довгострокового контролю явищ, що відбуваються на поверхні та в атмосфері Землі, у навколоzemному космосі, на Місяці, планетах Сонячної системи й інших порівняно яскравих небесних об'єктах.

Исследование Земли, атмосферных и безатмосферных тел Солнечной системы, межпланетного космического пространства включает контактные и дистанционные методы диагностики атмосфер, ионосфер, магнитосфер и поверхностей исследуемых небесных объектов, которые в совокупности дают возможность осуществления их полного мониторинга.

При подготовке любого космического эксперимента (КЭ) необходимо использовать как можно более полный комплекс наблюдательной аппаратуры, с помощью которой можно проводить исследования в ультрафиолетовом (УФ), в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах. Во всех перечисленных диапазонах применяется метод пассивного контроля без воздействия на исследуемый объект.

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Обычно такие задачи решаются с помощью приборов, ориентированных на исследование интенсивности приходящего от небесных объектов света. В то же время интенсивность является

всего лишь одним из четырех параметров вектора Стокса, который характеризует электромагнитное излучение, идущее от небесного тела. Методы спектрополяриметрии с высокой степенью достоверности позволяют определять [12]:

- величину комплексного показателя преломления вещества частиц облачного слоя планетных атмосфер или на поверхности небесных тел;
- параметры функции распределения частиц по размерам;
- наличие ориентированных частиц в планетных атмосферах;
- разницу положения верней границы облачных слоев над деталями атмосферы.

Известно, что все приемники оптического излучения реагируют лишь на смену интенсивности светового потока, но не реагируют на состояние его поляризации. Поэтому все методы определения степени поляризации света основаны на преобразовании вектора Стокса от источника излучения в скалярную величину. Для этого используют специальные устройства (поляроидные модуляторы), которые устанавливаются пе-

ред приемниками излучения. При прохождении света через такие материалы возникает оптическая разность хода между ортогональными слагаемыми. Величина этой разности пропорциональна квадрату напряжения электрического поля. В двухэлементном модуляторе вращается фазосдвигающая пластина (ФП), а поляризатор установлен неподвижно.

Матрица преобразования ФП с фазовым сдвигом Δ имеет вид

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G + H\cos 4\varphi_1 & H\sin 4\varphi_1 & -\sin \Delta \sin 2\varphi_1 \\ 0 & H\sin 4\varphi_1 & G - H\cos 4\varphi_1 & \sin \Delta \cos 2\varphi_1 \\ 0 & \sin \Delta \sin 2\varphi_1 & \sin \Delta \sin 2\varphi_1 & \cos \Delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

а световой луч модулируется соответственно выражению

$$\begin{aligned} I(\omega_2 t) = 0.5 [I_0 + GQ_0 \cos 2\varphi_2 + \\ + HQ_0 \cos 2(2\varphi_1 - \omega_1 t) + HU_0 \sin 2(2\varphi_1 - \omega_1 t) - \\ - V_0 \sin \Delta \sin 2(\varphi_1 - \omega_1 t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} G = 0.5(1 + \cos \Delta), \\ H = 0.5(1 - \cos \Delta), \end{aligned} \quad (3)$$

При анализе линейно поляризованного света используют ФП со сдвигом фазы на 180° , для которой $G = 0$, а $H = 1$. Тогда выражение (2) сводится к выражению

$$\begin{aligned} I(\omega_2 t) = 0.5 [I_0 + Q_0 \cos 2(2\varphi_1 - \omega_2 t) + \\ + U_0 \sin 2(2\varphi_1 - \omega_2 t)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для анализа эллиптически поляризованного излучения обязательно необходимо использовать поляроидный модулятор. В его состав должен входить неподвижный поляризатор и фазосдвигатель.

Довольно часто используют фазовую пластину (со сдвигом фазы на 90°). Если в таком модуляторе поляризатор неподвижный ($\omega_2 = 0$) или его угловая скорость в два раза превышает угловую скорость обращения ФП ($\omega_2 = 2\omega_1$), то выражение (2) сводится к выражению

$$\begin{aligned} I(t, 90^\circ) = 0.5 [I_0 + 0.5Q_0(1 + \cos 4\omega_1 t) + \\ + 0.5U_0 \sin 4\omega_1 t \pm V_0 \sin 2\omega_1 t]. \end{aligned} \quad (5)$$

Знаки плюс или минус перед четвертым параметром Стокса ставят в случае неподвижного или подвижного поляризатора соответственно.

Широкое использование ФП продолжительное время сдерживалось тем, что фазовый сдвиг одноэлементных пластин сильно зависит от длины волны. Поэтому на небольшой участок спектра необходимо было изготавливать отдельную пластину. При этом эффективно можно было работать только в узких спектральных интервалах. Сейчас эти ограничения сняты. Так, еще в 1954 г. Панчаратман [11] разработал трехэлементную ФП. Каждый ее элемент также представлял набор из двух пластин, изготовленных из разных двупреломляющих материалов (Mg_2 и Si). Для каждого из них величина фазового сдвига и положения оси в спектральном интервале 300—1000 нм изменялись в пределах $\pm 2^\circ$ и $\pm 3^\circ$ соответственно. Она получила название суперхроматической фазосдвигающей пластины (САФП).

В середине 1980-х гг. В. А. Кучеров [7, 8] рассчитал многокомпонентные САФП, которые могли быть изготовлены не только из одного материала (кристаллического кварца), но и из растянутых пленок полипропилена, полиэтилена-мерафталата и т. п. На рис. 1 приведено сравнение СФП, разработанной в ГАО НАНУ, и пластиинки, установленной на телескопе имени Хаббла.

При практической реализации поляриметрических приборов их конструкция определяется

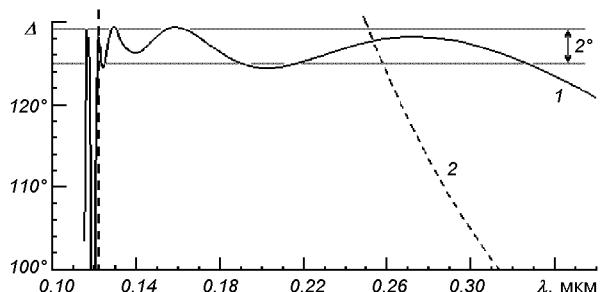


Рис. 1. Сравнение характеристик двух фазовых пластин: 1 — проект T-170, 2 — телескоп Хаббл

типов используемых приемников излучения, устройствами спектральной селекции и т. д.

Так, в своих пионерских поляриметрических исследованиях тел Солнечной системы Лио [10] использовал визуальный поляриметр на принципе интерференционного полярископа Савара. Несмотря на простоту прибора, погрешность при определении степени поляризации света была около 0.1 %.

В пятидесятых годах прошлого столетия на смену визуальным поляриметрам стали использовать панорамные приемники и фотоумножители (ФЭУ). Их принцип работы основан на использовании модуляционной зависимости (2). Использовалась методика с дискретным изменением положения оптической оси поляризатора с шагом $\Delta\varphi$. Значение степени поляризации P и положение плоскости поляризации φ определялись из систем трех или четырех уравнений:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2\varphi_0 + U_0 \sin 2\varphi_0), \\ I_2 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 60^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 60^\circ)), \\ I_3 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 120^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 120^\circ)), \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2\varphi_0 + U_0 \sin 2\varphi_0), \\ I_2 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 22.5^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 22.5^\circ)), \\ I_3 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 45^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 45^\circ)), \\ I_4 &= 0.5(I_0 + Q_0 \cos 2(\varphi_0 + 67.5^\circ) + \\ &\quad + U_0 \sin 2(\varphi_0 + 67.5^\circ)). \end{aligned} \quad (7)$$

Использовались и другие значения шага $\Delta\varphi$. При измерениях необходимо уделять особое внимание точности отработки шагов, чтобы в системе уравнений (6) углы $\Delta\varphi_{12}$ и $\Delta\varphi_{23}$ различались менее чем на $1.5'$. В противном случае систематическая ошибка вычисления степени поляризации превысит 0.1 %.

При наблюдениях с одно канальным приемником используют так называемый метод Мехьюра. В нем поляризатор непрерывно вращается с

небольшой угловой скоростью ω , а интенсивность $I(\omega)$ регистрируется соответствующим приемником света. Тогда значение степени поляризации определяется выражением

$$P = 2(I_{\max} - I_{\min})/(I_{\max} + I_{\min}), \quad (8)$$

где I_{\max} и I_{\min} — наибольший и наименьший отсчет в выражении $P \cos 2(\varphi - \omega)$ уравнения (2).

Все рассмотренные выше методы наблюдений требуют последующей обработки полученной информации для вычисления данных о поляризационных свойствах света. В конце 1950 гг. Л. В. Ксанфомалити [6] предложил использовать систему автоматического регулирования высокого напряжения ФЭУ при наблюдениях в аналоговом режиме. Если система регулирования линейна в широких пределах изменения интенсивности, то вычисленная средняя интенсивность $0.5(I_{\max} + I_{\min})$ будет неизменной. Тогда переменная часть сигнала $P \cos 2(\varphi - \omega)$, деленная на эту постоянную величину $0.5(I_{\max} + I_{\min})$, представляет собой степень поляризации.

Существенным недостатком аналогового режима были тепловые шумы от ФЭУ и от системы усилителей. Это требовало постоянного контроля над дрейфом сигнала с нулевой интенсивностью.

Этот недостаток практически отсутствует при работе в режиме подсчета отдельных фотонов (импульсов). Такой режим работы позволил О. И. Бугаенко с коллегами [2] разработать систему автоматического поляриметра. В нем также использовалось непрерывное вращение поляризатора, но уже с частотой 75 Гц, и впервые было предложено модулированную интенсивность (2) регистрировать четырьмя счетчиками на протяжении половины периода оптической модуляции светового потока. При этом начало регистрации сигнала в каждом счетчике специальными электронными ключами было сдвинуто по фазе на $\pi/2$. Данные в этих счетчиках представляли собой систему величин

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(\pi - 2U) \quad \text{для } 0 \leq 2\omega t \leq \pi, \\ I_2 &= I_0(\pi + 2U) \quad \text{для } \pi \leq 2\omega t \leq 2\pi, \\ I_3 &= I_0(\pi - 2Q) \quad \text{для } (\pi/2) \leq 2\omega t \leq 3\pi/2, \\ I_4 &= I_0(\pi + 2Q) \quad \text{для } 3\pi \leq 2\omega t \leq 5\pi, \end{aligned} \quad (9)$$

комбинация которых определяла значения пара-

метров Стокса:

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 &= 4\pi I_0, \\ I_2 - I_1 &= 4I_0 U = 4u, \\ I_4 - I_3 &= 4I_0 = 4q. \end{aligned} \quad (10)$$

На практике использовалось три счетчика для подсчета этих величин: $4\pi I_0$, $4u$ и $4q$. Если задавать накопление интенсивности $4\pi I_0$, то счетчики 2 и 3 будут уже регистрировать отношение $4u/4\pi I_0$ и $4q/4\pi I_0$, то есть безразмерные параметры Стокса U и Q . При этом количество импульсов $4\pi I_0$ в счетчике задавалась соответственно требованию, чтобы значение параметров Q и U регистрировались с требуемой статистической погрешностью. Оказалось, что благодаря такой большой скорости вращения поляризатора стало возможно практически без потери точности проводить наблюдения даже при нестабильной прозрачности земной атмосферы. Погрешность определения степени поляризации была около 0.05 % [4, 9].

Эта же идея была использована при разработке в ГАО НАН Украины спектрополяриметра [1, 3, 5] с одновременным измерением всех четырех параметров Стокса. 127-градусная САФП вращалась с частотой 61 Гц, а промодулированная интенсивность (2) специальными электронными ключами разбивалась на восемь равных интервалов:

$$\begin{aligned} I_1 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) + \\ &\quad + U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } 0 \leq \pi/8, \\ I_2 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) + \\ &\quad + U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } \pi/8 \leq \pi/4, \\ I_3 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) - \\ &\quad - U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } \pi/4 \leq 3\pi/8, \\ I_4 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) - \\ &\quad - U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } 3\pi/8 \leq \pi/2, \\ I_5 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) + \\ &\quad + U_0/8 \pm 0.146V_0\} \text{ для } \pi/2 \leq 5\pi/8, \\ I_6 &= 0.5\{I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) + \\ &\quad + U_0/8 \pm 0.353V_0\} \text{ для } 5\pi/8 \leq 3\pi/4, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I_7 &= 0.5[I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi - 1) - \\ &\quad - U_0/8 \pm 0.353V_0] \quad \text{для } 3\pi/4 \leq 7\pi/8, \\ I_8 &= 0.5[I_0\pi/8 + (Q_0/8)(0.25\pi + 1) - \\ &\quad - U_0/8 \pm 0.146V_0] \quad \text{для } 7\pi/8 \leq \pi. \end{aligned}$$

Их комбинация позволяла в четырех счетчиках накапливать информацию обо всех четырех параметрах Стокса:

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 &= \\ &= \pi(I_0 + 0.2Q_0)/2 = I'/2, \\ I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 - I_7 + I_8 &= 0.8Q = q, \\ I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 + I_6 - I_7 - I_8 &= 0.8U = u, \\ I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - I_5 - I_6 - I_7 - I_8 &= 0.8V = v. \end{aligned} \quad (12)$$

Если в таком модуляторе использовать 180-градусную фазосдвигающую пластину, то система (12) сводится к системе

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 &= \\ &= \pi I_0/2 = I'/2, \\ I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 - I_6 - I_7 + I_8 &= Q = q, \\ I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 + I_6 - I_7 - I_8 &= U = u, \\ I_1 + I_2 + I_3 + I_4 - I_5 - I_6 - I_7 - I_8 &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку коэффициенты модуляционного выражения (2) зависят от величины Δ , то и связь между нормированными и наблюдаемыми значениями будет также зависеть от фазового сдвига, например

$$\begin{aligned} Q_0(U_0) &= 1.6q(u)/I' \text{ для } \Delta = 127^\circ, \\ Q_0(U_0) &= 2.0q(u)/I' \text{ для } \Delta = 180^\circ. \end{aligned} \quad (14)$$

Рассмотренные ситуации для САФП в 127° и 180° — идеальные. Поскольку даже в случае суперхроматических АФП фазовый сдвиг зависит от длины волны, то без учета этого фактора параметры поляризованного излучения будут определяться с погрешностью. Например, при использовании АФП в 180° погрешность определения параметров Q и U будет вычисляться по формуле

$$\Delta Q(U) = 0.5(1 - \cos\Delta)Q(U). \quad (15)$$

| Δ , град | $Q(U)$, % | | |
|-----------------|------------|-------|-------|
| | 1 % | 10 % | 30 % |
| 180 | 0 | 0 | 0 |
| 175 | 0.0019 | 0.019 | 0.057 |
| 170 | 0.0075 | 0.075 | 0.225 |
| 165 | 0.034 | 0.34 | 1.000 |

Но эта погрешность имеет систематический характер, и ее можно учесть при обработке наблюдений. Отметим, что при использовании полуволновой фазовой пластины нет необходимости синхронизировать положение АФП с началом работы соответствующих ключей для каждого из восьми секторов модуляционной кривой интенсивности. Но при использовании 127° АФП должны быть довольно жесткие требования к синхронизации начала работы всех электронных ключей с положением оптической оси фазосдвигателя.

Два таких прибора было изготовлено в 1985 г. на область спектра 340—760 нм. Они были установлены в фокусах Кассегрена 60 см телескопов и продолжительное время эксплуатировались на наблюдательных базах ГАО НАН Украины в Узбекистане (обсерватория на горе Майданак) и в Боливии (обсерватория Санта Анна около города Тариха). Третий образец спектрополяриметра в 1995 г. был модернизирован, и его спектральный интервал расширен до 1 мкм; в нем используются ФЭУ с InAsGa-фотокатодом.

Исходя из имеющегося в ГАО НАН Украины опыта разработки спектрополяриметрической аппаратуры, сотрудники обсерватории с 2003 года ведут интенсивные работы по созданию технологических макетов и бортовых приборов. Для других приборов производится планирование, разработка и создание соответствующих экспериментальных установок. Так, в настоящее время в ГАО НАН Украины по контракту с Национальным космическим агентством Украины в рамках российско-украинского космического эксперимента (КЭ) «Планетный мониторинг» (ПМ) выполняется изготовление УФ-спектрометра-поляриметра (ПМ-СП), предназначенно го для измерения интенсивности, степени линейной поляризации и положения плоскости поляризации отраженного верхними слоями

планетных атмосфер солнечного излучения в интервале длин волн 230—390 нм. ПМ-СП запланирован как один из четырех приборов, которые намечено установить на «Планетном телескопе Т-400» на российском модуле Международной космической станции (МКС).

Он позволит получить экспериментальные данные для изучения физических и оптических свойств аэрозольной составляющей верхних слоев планетных атмосфер, в том числе и земной атмосферы на высотах более 30 км. Ранее эксперименты такого рода для атмосферы Земли не проводились. С 2006 г. украинская сторона начала разработку еще и второго из четырех запланированных на Т-400 приборов — статического фурье-спектрометра (СФС) на УФ-область спектра.

При разработке прибора ПМ-СП учитывались следующие требования к составу и компоновке поляризационного блока для установки его в инструментальном отсеке планетного телескопа (ПТ) МКС.

1. Спектрополяриметр должен быть автономным прибором с собственным панорамным светоприемником.

2. Материалы, работающие в заданном спектральном диапазоне, имеют пониженное пропускание в области до 230 нм. Поэтому для достижения высокой эффективности необходимо минимизировать как количество элементов, так и их толщины.

3. Для наблюдений протяженных объектов (планет) спектральный блок прибора должен содержать щель. Минимизация количества оптических элементов приводит к децентрировкам схемы; при этом преобладающие aberrации в изображении — астигматизм и кома, расширяющие функцию рассеяния точки (ФРТ) до 40—50 мкм. Эти aberrации должны быть скорректированы (ФРТ не должна быть шире пикселя приемника).

4. Фазовая пластина (ФП) в сходящихся пучках вносит все виды aberrаций. Эти aberrации также должны быть исправлены.

Работа оптической схемы (ОС) ПМ-СП основана на разработках ГАО НАНУ, проводившихся в следующих направлениях:

- расчет, разработка и отработка технологии изготовления суперхроматических фазовых пластин, для которых фазовый сдвиг является

- ся очень незначительным в широком спектральном диапазоне;
- разработка призменных систем с квазиравномерной дисперсией;
 - разработка сепараторов по поляризации с уменьшенными систематическими погрешностями.

Оптическая схема ПМ-СП — пространственная; углы преломления (отражения) рассчитаны так, чтобы обеспечить размещение ОС в заданных габаритах. Ход лучей в ОС представлен на рис. 2. В плоскости приемника строятся две спектральные полосы (в обыкновенных и необыкновенных лучах).

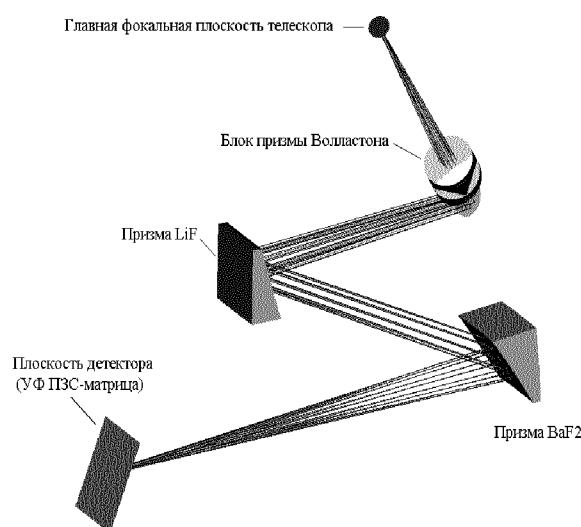


Рис. 2. Ход лучей в ОС ПМ СП

быкновенных лучах). Оптическая схема рассчитана так, что в заданном спектральном диапазоне 230—390 нм дисперсия почти равномерна, что способствует повышению эффективности прибора в целом.

Для проверки принятых решений и отработки соответствующих технологий был разработан и изготовлен макет ПМ-СП. При изготовлении макета было принято единственное упрощающее положение — блок призм был заменен дифракционной решеткой. Конструкция всех остальных элементов и узлов была максимально приближена к полетному варианту.

После входного блока по ходу лучей расположена призма Волластона. Особенностью разработанной схемы является деформация поверхностей призмы для лучшего исправления aberrаций. Такая призма была изготовлена, ее испытания показали полное соответствие расчетным характеристикам. Далее по ходу лучей установлена зеркальная щель, камерное зеркало и диспергирующий узел — дифракционная решетка. Испытания макета показали соответствие его расчетным характеристикам: спектральный диапазон — 0.23—0.45 нм; разрешение по спектру — более 25 элементов; линейное разведение О- и Е-лучей — 2 мм; воспроизводимость поворота фазовой пластины — менее 40".

Для отработки технологии изготовления ПМ-СП, а также для дополнительной возможности проведения наземной калибровки полетного варианта ПМ-СП был изготовлен спектрометр-поляриметр сопровождения (СПС) КЭ ПМ. Опти-

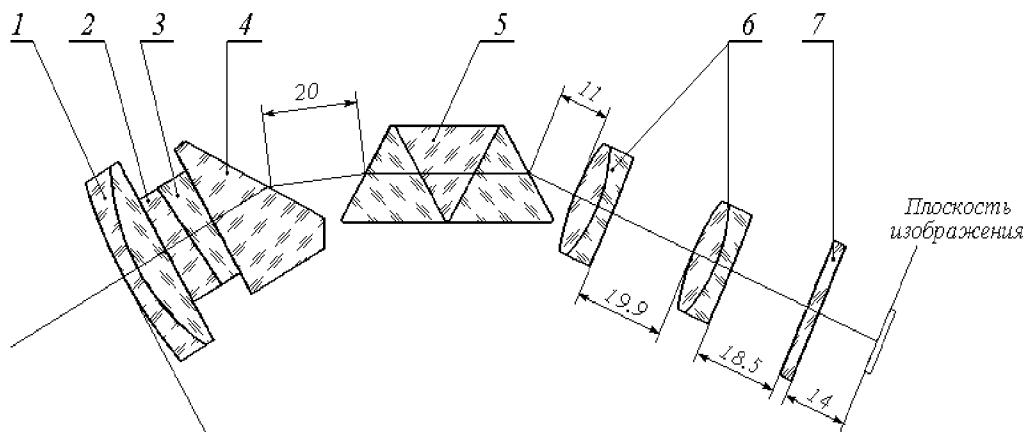


Рис. 3. Оптическая схема СПС: 1 — коллиматор, 2, 3 — призма Волластона, 4, 5 — диспергирующая призменная система, 6 — камерный объектив, 7 — защитное окно матрицы

ческая схема СПС (рис. 3) построена по традиционной схеме с коллиматором, диспергирующим блоком и камерным объективом. В качестве диспергирующего блока применена специальная призменная система, обеспечивающая квазивномерную дисперсию по спектру.

В плоскости приемника строятся изображения двух спектров в обычных и необычных лучах для двух полей — объекта и фона, или же для одной длинной спектральной щели. В спектральном диапазоне 350—900 нм дисперсия почти равномерна. Качество спектра, выделенного диафрагмой или щелью части изображе-

ния, иллюстрируется точечной диаграммой, представленной на рис. 4. Параметры оптических элементов были промерены на специально разработанном стенде и показали хорошее соответствие расчетам.

Конструктивно оптико-механический блок (ОМБ) СПС построен по модульному принципу и состоит из трех модулей, объединенных общим корпусом:

- входной модуль (рис. 5), служащий для присоединения к позиционному подшипнику телескопа, содержит:
 - устройство контроля положения объекта,
 - блок сменных ахроматических фазовых пластин,
 - блок сменных диафрагм (щелей),
 - некоторые другие вспомогательные конструктивные элементы,
- модуль анализа содержит основные анализирующие элементы ОС СПС: блок призмы Волластона с коллиматорной линзой и блок диспергирующих призм;
- модуль регистрации содержит фокусировочное устройство ПЗС-камеры; устройство позиционирования камеры; камерный объектив и собственно ПЗС-камеру.

Остановимся детально на каждой составной части ОМБ СПС.

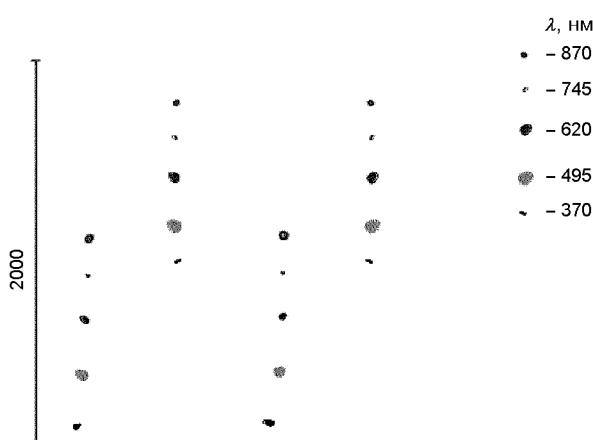


Рис. 4. Точечная диаграмма в плоскости приемника СПС

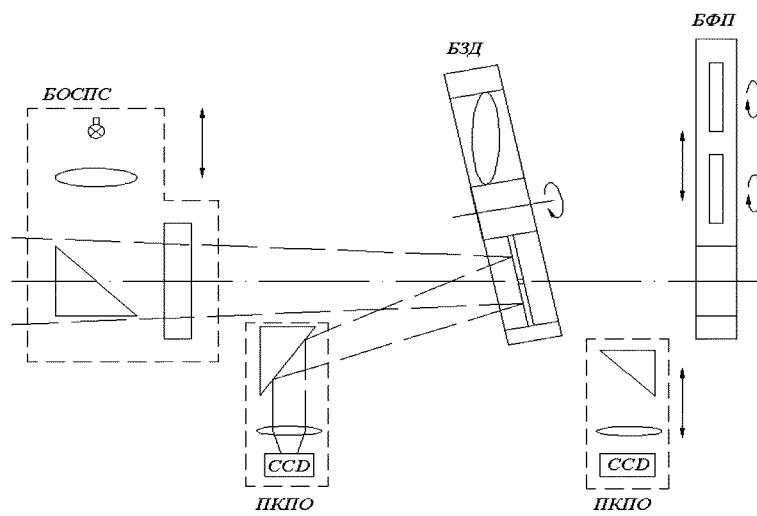


Рис. 5. Схема входного модуля: БОСПС — блок опорного спектрополяриметрического стандарта, БЗД — блок сменных зеркальных диафрагм, БФП — блок фазовых пластинок, ПКПО — устройства контроля положения объекта

Блок сменных зеркальных диафрагм. СПС предназначен для выделения избранных деталей на поверхности протяженного небесного тела или отдельного точечного объекта. В нашем случае это вращающаяся турель с круглыми зеркальными диафрагмами разного диаметра (0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 мм) и щелями (0.1×3.5, 0.2×3.5 мм), которая наклонена под углом 82° к оптической оси. Отверстия сделаны конусоподобными и с расширениями в сторону, противоположную к телескопу, что уменьшает вероятность появления паразитных эффектов взаимодействия светового потока с «телом» диафрагмы. Вместо одной из диафрагм предусмотрено размещение линзы поля, что позволяет проводить еще и панорамные наблюдения небесных объектов. Смена диафрагм осуществляется в автоматическом режиме по заданному алгоритму с помощью шагового двигателя.

Устройство контроля положения объекта представляет собой систему из двух (внешнего и внутреннего) окуляров, которые, соответственно, расположены до и после диафрагмы. При этом внешний окуляр смонтирован стационарно и используется для поиска нужного небесного объекта и его постоянного гидирования относительно рядом расположенных звезд или других деталей протяженного астрономического тела. Внутренний окуляр может при необходимости вводиться на оптическую ось и выводиться из нее; он применяется для эпизодического контроля положения объекта в диафрагме. Окуляры фокусируют световые лучи на телевизионные ПЗС камеры WAT-902Н, с которых на экран монитора по команде наблюдателя выводится либо отображение фокальной части изображения небесной сферы на зеркальной диафрагме (щели), либо изображение объекта, пропущенного через диафрагму (щель).

Блок фазовых пластинок представляет собой движущуюся конструкцию, которая имеет три фиксированных положения: два для ахроматических фазовых пластинок для синего и красного участков спектра и пустого отверстия, которое используется в тех случаях, когда при наблюдениях фазовая пластина не применяется. Вращение ФП осуществляется с помощью шагового двигателя, который поворачивает фазовую пластинку на $22.50 \pm 0.03^\circ$ и фиксирует ее в каждом новом положении на выбранное на-

блюдателем время. Точность вращения и фиксации ФП контролируется оптической автоколлимационной системой.

Блок опорного спектрополяриметрического стандарта предназначен для спектральной калибровки прибора и его поляриметрического тракта. Основным элементом этого блока является лампа с необходимой яркостью в заданной спектральной области. В общем случае лампа должна давать некоторое количество спектральных линий, более-менее равномерно распределенных по заданному спектральному диапазону. Ни один химический элемент такого набора не дает. Поэтому для калибровки по длинам волн в НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета им. И. И. Мечникова была разработана специальная спектральная гелиево-рутная лампа.

Конструктивно лампа представляет собой модифицированную трубку Гейслера. Для повышения спектральной яркости разряд идет вдоль оптической оси. Для получения полностью поляризованного света на выходное окно газоразрядной лампы поставлен поляроид.

Часть оптической схемы на исследовательском стенде прибора СПС показана на рис. 6.

Схема получения спектрополяриметрического скана изображения Луны, вырезаемого щелью спектрополяриметра СПС, показана на рис. 7.

Для изучения свойств стратосферного аэрозоля в атмосфере Земли в ГАО НАН Украины при участии Национального технического университета (КПИ) был разработан и изготовлен упрощенный вариант фотополяриметра УФП, мощности которого рассчитаны на установку на украинский молодежный спутник УМС. Его принципиальная схема представлена на рис. 8. В настоящее время разрабатывается усовершенствованный вариант УФП с вращающимся блоком поляроидного модулятора (рис. 9).

На конкурс проектов по исследованию космического пространства в рамках Глобальной стратегии исследований (GES) Главная астрономическая обсерватория НАН Украины представила следующие проекты, которые объединяет то, что во всех нихлагаются исследования с помощью спектрополяриметрической и/или фотополяриметрической аппаратуры.

1. Разработка перспективных методик исследований и создание нового поколения приборов



Рис. 6. Часть оптической схемы спектрометра поляриметра сопровождения на исследовательском стенде

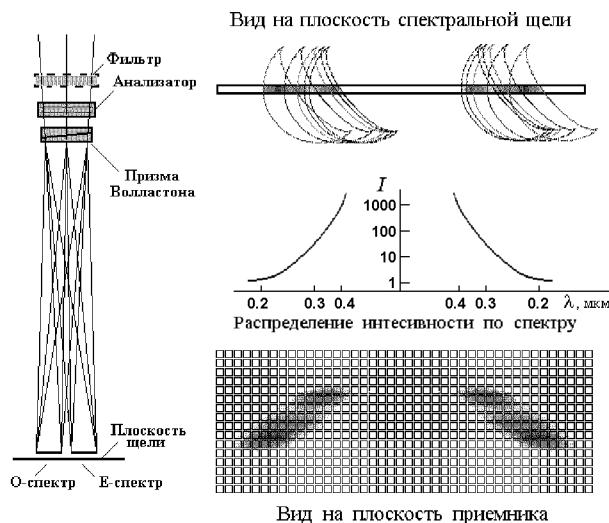


Рис. 7. Схема получения спектрополяриметрического скана изображения Луны, вырезаемого щелью спектрополяриметра СПС

для проведения внеатмосферных астрономических исследований («Астро-2»).

Конечной целью проекта является завершение работ по созданию новых приборов «ультрафиолетовый спектрометр-поляриметр ПМ-СП» и «статический фурье-спектрометр СФС на УФ-область спектра», которые запланированы как два из четырех приборов, входящих в состав научной аппаратуры российско-украинского космического эксперимента на МКС «Планетный мониторинг».

Приборы предназначены для регистрации спектральной и поляриметрической информации о газово-аэрозольных составляющих планетных атмосфер и физико-химических характеристиках поверхностей безатмосферных астрономических тел в диапазоне спектра 230—390 нм. Эти наблюдательные данные позволяют оценить оптические и физические характеристики верхних атмосфер и стратосфер планет, а также обнаружить корреляции между изменениями оптических и тепловых свойств планетных атмосфер и солнечным облучением.

2. Разработка и создание ультрафиолетового спектрополяриметра УФ-СП для изучения аэрозольной составляющей и озона в атмосфере Марса с борта орбитального аппарата планеты («УкрМарс-сателит»).

Целью являются создания нового прибора «Ультрафиолетовый Спектрополяриметр» УФ-СП для изучения аэрозольной составляющей и озона в атмосфере Марса с борта орбитального аппарата. Прибор предназначен для получения

наблюдательных данных о степени линейной поляризации солнечного света, отраженного атмосферой Марса, при фазовых углах в пределах от 0 до 180°. С помощью прибора УФ-СП необходимо на длинах волн в интервале 230—390 нм получить фазовые зависимости интенсивности, степени и положение плоскости поляризации отраженного верхней атмосферой Марса солнечного света. Эти данные разрешат определить физико-химические характеристики аэрозольной и озоновой составляющей атмосферы Марса с точностью, которая превосходит существующие на сегодня данные. Мы предлагаем упростить решение этой задачи путем использования дистанционных наблюдательных данных в ультрафиолетовом участке спектра о значении второго параметра Стокса Q , величина которого главным образом формируется в процессе лишь однократного рассеяния.

3. Разработка и создания ультрафиолетового спектрофотополяриметра УФ-СФП для дистанционного минералогического картирования поверхности слоя Луны с борта лунного орбитального аппарата («Укрселена-сателит»)

Целью являются создания прибора «Ультрафиолетовый спектрофотополяриметр» УФ-СФП для дистанционного минералогического картиро-

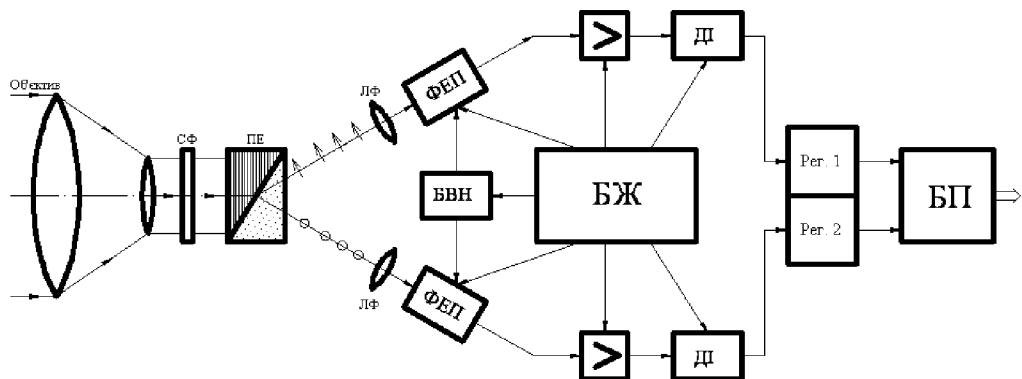


Рис. 8. Принципиальная схема УФП для УМС. СФ — светофильтр, ПЕ — поляризационный элемент, ЛФ — линза Фабри, ФЕП — фотоэлектронный умножитель, ДИ — дискриминатор импульсов, БВН — блок высокого напряжения, БЖ — блок питания, Рег. 1, Рег. 2 — регистры, БП — блок формирования, обработки и передачи информации

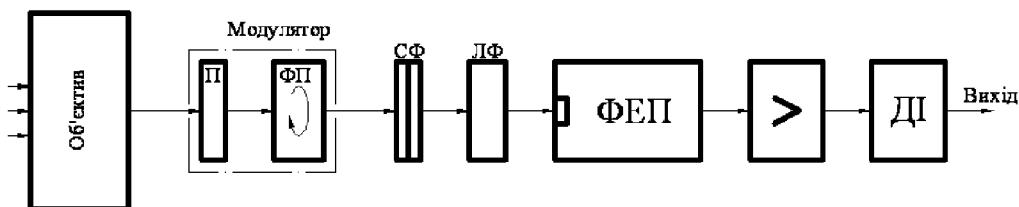


Рис. 9. Функциональная схема фотополяриметра с вращающимся поляроидным модулятором

вания поверхностного слоя Луны. Из зарегистрированной поляриметрической информации о физико-химических характеристиках поверхностного слоя в диапазоне спектра 230—280 (390) нм будут определены значения фазового угла с максимальным значением линейной поляризации солнечного света отраженного лунной поверхностью. Это позволит рассчитать значение комплексного показателя преломления частиц на поверхности и выполнить дистанционное минералогическое картирование поверхности Луны с точностью, которая превосходит существующие на сегодня данные.

4. Разработка и создание аппаратурных комплексов для дистанционного глобального мониторинга экологического состояния Земли с борта микроспутника в лунной точке Лагранжа («Укрселена—Лагранж»).

5. Разработка и создание аппаратурных комплексов для дистанционного глобального мониторинга экологического состояния Земли из лунной базы на поверхности Луны («Укрселена—поверхность»).

Целью проектов 4 и 5 является разработка и создания перспективных методов и средств дистанционного глобального мониторинга экологического состояния Земли с борта микроспутника в лунной точке Лагранжа или из базы на поверхности Луны (исследование Земли как «звезды»). Постановкой данного проекта будет завершена разработка методики и создан комплекс новой научной аппаратуры: 1) низкодисперсные спектрофотометры НС для спектрофотометрии интегральных дисков Земли и Солнца в спектральном диапазоне 0.2—3 мкм с целью мониторинга изменения отражательной способности Земли и солнечной активности, которая позволит зарегистрировать изменение так называемой эффективной температуры Земли; 2) низкодисперсные спектрофотометры НС1 для спектрофотометрии интегрального диска Земли в диапазоне 3—40 мкм для выявления изменения мощности излучаемой Землей тепловой энергии; 3) среднедисперсный спектрофотометр СФ для спектрофотометрии интегрального диска Земли в диапазоне 1—20 мкм для мониторинга измене-

ния химического состава атмосферы; 4) спектрополяриметр СП для спектрополяриметрии интегрального диска Земли в диапазоне длин волн 220—300 нм для изучения оптических свойств стратосферного аэрозоля.

Для исследования эффектов глобального потепления и изменения мощности озонового слоя мы предлагаем на один микроспутник в точке Лагранжа разместить вышеуказанный комплекс научной аппаратуры небольшого веса, и/или разместить его на лунной поверхности с возможностью работать в автономном режиме (лунный стационарный модуль или «ровер»), или полуавтономном (населенная лунная станция). Такие наблюдения могут проводиться как самостоятельно Украиной, так и в рамках международных программ сотрудничества с мировым сообществом. Стоимость такой программы будет невысокой, поскольку для ее реализации будет использовано изготовленную в Украине простую и дешевую научную аппаратуру с небольшими весовыми характеристиками. Стоимость таких приборов будет в 20—100 раз меньше зарубежных аналогов.

6. Создание фотополяриметра для дистанционного исследования физических характеристик стратосферного аэрозоля в атмосфере Земли с борта микроспутников.

Конечной целью проекта является создание перспективного метода и средства дистанционного исследования физических характеристик аэрозоля в стратосфере Земли с борта спутников, которые периодически запускаются на орбиту. Реализация проекта позволит получить новые наблюдательные данные, анализ которых даст возможность впервые определить значение действительной части показателя преломления и размеры стратосферного аэрозоля, величину оптической толщины, исследовать горизонтальную структуру аэрозольного стратосферного слоя и его изменение со временем. Для этого будет завершена разработка методики, разработка и изготовление новой научной аппаратуры — поляриметр на ультрафиолетовый участок спектра (УФП) на длины волн 230—280 нм.

Анализ этих данных позволит нам с высокой достоверностью провести моделирование процессов фотодиссоциации молекул разных газов с учетом ослабления интенсивности излучения Солнца газовой и аэрозольной составляющими в

верхних слоях земной атмосферы; это позволит более однозначно определить механизм появления озоновых дыр.

УФП при серийном производстве будет уже недорогим научным прибором, который можно размещать на разных космических аппаратах и постоянно проводить контроль одной из важных причин изменений озонового слоя земной атмосферы.

Все вышеперечисленные проекты могут быть логическим продолжением и расширением возможностей работ, которые выполняются в ГАО НАН Украины по реализации целевых программ Национальной космической программы Украины на 2003—2007 гг.

ВЫВОДЫ

Итак, несмотря на трудности, а в некоторых случаях и неоднозначность решения, можно отметить, что спектрополяриметрический метод является единственным дистанционным методом, который позволяет определять спектральные значения действительной части показателя преломления. Кроме того, по этим измерениям наиболее точно оцениваются параметры функции распределения частиц по размерам и оптическая толщина чисто газовых надоблачных слоев. Безусловно, что не менее успешным он окажется и при изучении физических характеристик поверхностных слоев для безатмосферных небесных тел. Для таких работ необходимы высокоточные поляризационные измерения, погрешность которых не будет превышать хотя бы величины 0.05 %.

1. Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Гуральчук А. Л. и др. Астрономический спектрополяриметр. III. Информационно-измерительная и регистрирующая система // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 169—177.
2. Бугаенко Л. А., Бугаенко О. И., Кругов В. Д., Парусимов В. Г. Электрофотометр слабых потоков // Астрометрия и астрофизика 1968.—Вып. 1.—С. 193—210.
3. Бугаенко Л. А., Мельников М. А., Рагозина Л. Э., Самойлов В. С. Астрономический спектрополяриметр. II. Оптико-механический блок // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 164—168.

4. Бугаенко О. И., Галкин Л. С., Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. I. Распределение поляризации по диску Сатурна // Астрон. журн.—1971.—48, № 2.—С. 373—379.
5. Бугаенко О. И., Гуральчук Л. С. Астрономический спектрополяриметр. I. Основные принципы работы // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 160—164.
6. Ксанфомалити Л. В. Автоматический электронный поляриметр 1 ЭП 23 // Уч. зап. Харьков. ун-та.—1962.—122, Тр. Астрон. Обсерв.—14.—С. 91—99.
7. Кучеров В. А. Многокомпонентные симметричные ахроматические фазовые пластинки. I. Расширение панчаратнамовской системы на случай произвольного числа компонентов // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 152—160.
8. Кучеров В. А., Самойлов В. С. Суперахроматическая фазовая пластиинка // Оптика-мех. пром-сть.—1987.—№ 9.—С. 57—58.
9. Мороженко А. В. Временные изменения поляризационных свойств света Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 1.—С. 54—59.
10. Lyot B. Recherches sur la polarization de la lumiere des planetes et de queues substance terrestres // Ann. Observatoire Meudon.—1929.—8.—P. 1—161.
11. Pancharatnam S. M. Achromatic combinations of birefringent plates // Proc. Indian Acad. Sci.—1955.—A41.—P. 130—144.
12. Serkowski K. Polarimeters for optical astronomy // Planets, Stars, and Nebular Studies with Photopolarimetry. — Tucson: University of Arizona Press, 1974.—P. 135—174.

SPECTROPOLARIMETRIC DEVICE FOR OVERATMOSPHERIC INVESTIGATIONS OF SOLAR SYSTEM BODIES

*Ya. S. Yatskiv, A. P. Vidmachenko, A. V. Morozhenko,
M. G. Sosonkin, Yu. S. Ivanov, I. I. Syniavskyi*

We justify the advisability of the use of the spectropolarimetric device in preparation for and performance of the space experiments for global continuous long-term control of phenomena on the surface and in the atmosphere of the Earth, in circumterrestrial space, on the Moon, on solar system planets and on other bright celestial objects.

УДК 537.591

В. Н. Ващенко¹, П. И. Голубничий², С. Д. Кривоносов²,
В. Н. Павлович³, В. Д. Русов⁴, А. Д. Филоненко²,
С. П. Фомин⁵, Н. Ф. Шульга⁵

¹Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

²Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

³Інститут ядерних досліджень аціональної академії наук України, Київ

⁴Одеський національний політехнічний університет

⁵Інститут теоретичної фізики ім. А. И. Ахізера ННЦ (ХФТ) Національної академії наук України, Київ

Детектирование потоков космических лучей сверхвысокой энергии на окололунной орбите

Представлено 03.09.07

Представлені основні положення проекту детектора космічного випромінювання надвисокої енергії понад 10^{22} еВ, встановленого на борту супутника Місяця. Показана актуальність проблеми і можливість реалізації такої установки. Потужність радіосигналу, викликаного струмом надлишкових електронів і δ -електронів цілком достатня для енергетичного порогу 10^{22} еВ на орбіті висотою 1000 км. Знайдено, що найбільш придатним діапазоном частот є область 50—100 МГц. Орієнтовна швидкість рахування складе 150 подій у рік.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких десятилетий физика элементарных частиц тесно взаимодействует с космологией, и эта связь позволяет сейчас рассматривать Вселенную во всей ее полноте и единстве. Законы взаимодействия элементарных частиц определяют все известные явления на Земле и в космосе. К настоящему времени разработано квантово-механическое описание трех из четырех известных взаимодействий. Теория сверхслабых и сильных взаимодействий, на которой основана современная физика элементарных частиц, в настоящее время не противоречит экспериментальным данным. Однако, как и любая другая теория, она имеет внутренние проблемы. Естественное стремление к их устранению, а также к объединению всех фундаментальных сил природы приводит, в

частности, к введению сверх массивных частиц, которые недоступны для исследования современному поколению ускорителей. Например, даже в рамках стандартной модели, объединяющей электромагнетизм с другими взаимодействиями, возникают решения типа магнитного монополя, который в 10^{15} раз тяжелее протона, и никакой из ускорителей настоящего или ближайшего будущего не способен «разогнать» частицы до столь высоких энергий. Именно по этой причине Вселенная как возможный источник космического излучения сверхвысокой энергии привлекает внимание исследователей.

Космическое излучение сверхвысокой энергии является «откликом» событий, произошедших далеко за пределами нашей Галактики миллиарды лет назад. Это могут быть процессы, связанные, например, с активными ядрами галактик, со сверхновыми или нейтронными звездами или,

наконец, с самыми мощными источниками излучения во Вселенной — гамма-всплесками. Регистрация сверхмассивных частиц, таких как магнитный монополь $m \sim 10^{16}$ ГэВ, мог бы иметь прямое отношение к процессам, произошедшим в ранней Вселенной. Современная наука не знает определенно, где и в каких космических катализмах рождаются частицы с энергиями более 10^{20} эВ. Однако факт их регистрации является общепризнанным, и поэтому породил парадоксы, которые настолько принципиальны, что наиболее радикальная точка зрения на разрешение этих проблем состоит в пересмотре основных постулатов релятивистской теории.

В настоящее время физики пытаются измерить потоки частиц с энергиями более 10^{20} эВ, однако встречаются здесь с трудно преодолимыми проблемами. Хорошо известен пример, показывающий, что в среднем на каждый квадратный километр падает одна частица за 100 лет. Поэтому исследователи, занимающиеся физикой элементарных частиц, вынуждены думать о том, как увеличить площадь детектора до миллионов и более квадратных километров. Самый большой детектор имеет площадь около 5000 км^2 . За год он зарегистрирует около 30 событий с энергиями более 10^{20} эВ. Элементарные оценки показывают, что традиционные принципы регистрации не в состоянии удовлетворить запросы современных знаний. Поэтому усилия ученых направлены на создание новейших методов детектирования частиц сверхвысокой энергии.

Принципиально новая идея была опубликована более сорока лет назад в работах Аскарьяна [1—2], в основе которых заложена теоретически доказанная возможность регистрации электромагнитных радиоимпульсов, вызванных широким атмосферным ливнем от частицы очень высокой энергии (более 10^{16} эВ). За прошедшие 40—45 лет сделано много для развития этой идеи, о чем свидетельствует масса экспериментальных и теоретических работ за этот период времени (см., например, [6]). Оригинальность этой идеи состоит в том, что при помощи относительно простой антенны можно зарегистрировать радиоимпульс на значительном расстоянии от каскадного ливня. Поэтому установка с небольшим количеством антенн могла бы контролировать большие площади.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИОДЕТЕКТОРА

Энергетический порог радиодетектора можно повысить на несколько порядков, если как рабочую площадь установки использовать поверхность Луны. Существует еще ряд не менее важных причин для размещения радиоприемников с антеннами на лунной орбите. Главная из них — это практически полное отсутствие импульсных радиопомех техногенного и атмосферного происхождения вследствие большой удаленности от Земли. Более того, когда спутник находится на противоположной от нас стороне, Луна играет роль экрана, и поэтому даже самые мощные импульсы, приходящие с Земли, будут ослаблены ниже уровня космических радиошумов. Не менее важным фактором является практически полное отсутствие влаги в лунном реголите.

В работах [3, 10] в 1999 г. был предложен вариант проекта с размещением детекторов на двух окололунных спутниках. Учитывая сложность выполнения такой задачи и требования на ограничения общей массы детектора, ниже предлагается значительно упрощенный вариант радиодетектора, в котором используется только один модуль. Этого достаточно для определения потока частиц с энергиями более 10^{22} эВ. Такой вариант кажется наиболее рациональным, если принять во внимание практическое отсутствие предварительного опыта, так как никто и никогда подобных экспериментов не проводил. Возможность и целесообразность размещения радиодетектора на окололунной орбите обоснована в работе [4] (т. н. проект ЛОРД). Заметим, что возможность размещения детекторов на самой поверхности Луны было указано в работах [1, 2].

Оценка диапазона частот детектора. Будем использовать далее выражение для спектральной интенсивности радиоимпульса [7], вызванного частицей с энергией W_0 на расстоянии r от наблюдателя в лунном реголите

$$\frac{dI(\omega, \theta)}{dv dS} = 2\pi \frac{\mu_0}{c} \omega^2 \left(\frac{eN_0 z_0 \alpha \eta}{4\pi r} \right)^2 \times \\ \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{p\omega \alpha z_0}{c} \right)^2 \right] \exp[-(k\rho_1 \sin \theta)^2] \sin^2 \theta. \quad (1)$$

Пусть, например, высота орбиты будет 1000 км. Далее, исходя из выбранной частоты, определим диаграмму излучения и уточним рабочую площадь детектора. При выборе частоты можно ориентироваться на анализ выражения (1). Оно показывает, что ширина диаграммы излучения сильно зависит от частоты. В таблице приведены для иллюстрации некоторые параметры импульса, вычисленные согласно (1).

Из таблицы и выражения (1) следует, что максимум излучения приходится на частоту $\nu = 630$ МГц. Угловая ширина $\Delta\theta_{1/2}$ черенковского конуса в этом случае составляет всего 5.7° . Однако под каким бы углом ни приходила частица из вакуума в среду, излучение практически не выйдет на поверхность вследствие полного внутреннего отражения, поэтому частоту нужно выбрать так, чтобы диаграмма пространственного распределения излучения должна быть достаточно широкой.

Из таблицы и анализа спектральной интенсивности (1) следует, что предпочтение можно отдать диапазону порядка 50–100 МГц. Этот выбор является компромиссом между двумя несовместимыми требованиями иметь высокую дифференциальную интенсивность излучения и широкую диаграмму направленности. Примем для дальнейшего анализа значение 50 МГц. На рис. 1 представлена диаграмма пространственного распределения излучения для этой частоты. Направление V соответствует скорости движения ливня.

Расчетные параметры радиоимпульса

| ν , МГц | Показатель преломления | $I, 10^{-26}$ $\text{Вт} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ | θ_{max} | $\Delta\theta_{1/2}$ |
|-------------|------------------------|---|-----------------------|----------------------|
| 10 | 1 (1.7) | 5.2 5.2 | 90° 90 | 45–135° 45–135 |
| 30 | 1 (1.7) | 35.6 41.0 | 72 74 | 39–113 41–104 |
| 50 | 1 (1.7) | 80 100 | 65 64 | 35–92 41–88 |
| 100 | 1.7 | 365 | 58 | 42–71 |
| 200 | 1.7 | 1027 | 55 | 46–63 |
| 630 | 1.7 | 3600 | 54 | 5.2 |
| 1900 | 1.7 | 0.47 | 54 | 1.8 |

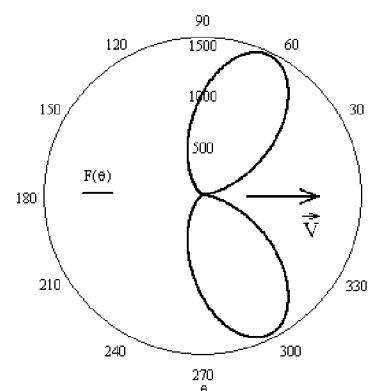


Рис. 1. Диаграмма пространственного излучения для частоты 50 МГц

Оценка скорости счета событий. От этого параметра зависит пороговая энергия детектора, которая непосредственно связана и с допустимо минимальной частотой событий. Ее можно предсказать только весьма ориентировочно на основании известных результатов для энергетического диапазона не выше 10^{20} эВ. Известно, что интегральный поток частиц в интервале $10^{18} \leq W \leq 10^{20}$ эВ выражается как $J (> W) = A(W/W_0)^{1-\gamma} S \Omega t$, где $\gamma \approx 2.7$ — показатель энергетического спектра, S — площадь детектора, Ω — величина телесного угла для возможных направлений прихода космического излучения, t — длительность наблюдения и $A \approx 2 \cdot 10^{-3}$ (год⁻¹ км⁻² стер⁻¹). Более высокой орбите соответствует большая площадь детектора. Однако мощность радиоимпульса падает обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому увеличение высоты орбиты эффективно только до определенного значения.

Для оценки скорости счета событий необходимо определить произведение $\Delta\Omega\Delta S$. Оценим для этого телесный угол возможного прихода частиц и соответствующую этому углу площадь детектора. На рис. 2 показаны направления BA и CA возможного прихода частиц. DF — высота спутника над поверхностью Луны. Для произвольно выбранной точки A полосы AE (радиальная прямая OD является для нее осью симметрии), можно так провести прямые BA и CA в плоскости меридиана FA , что они будут совпадать с границами диаграммы направленности.

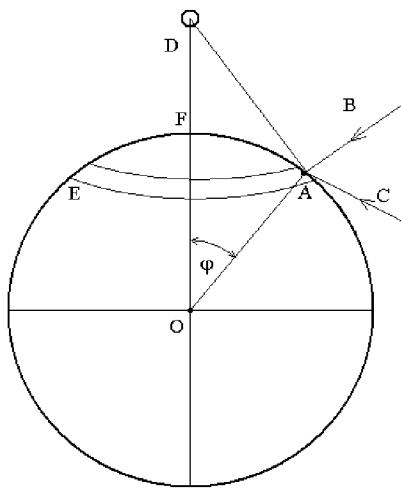


Рис. 2. Направление возможного прихода частиц

Например, если частица приходит по направлению BA , то верхняя (в плоскости чертежа) граница диаграммы направленности (на полувысоте) совпадает с прямой AD , а остальная часть диаграммы направлена в сторону Луны. Если же частица пришла по прямой CA , то нижняя граница диаграммы направленности совпадает с AD , а остальная часть расположена по правую сторону AD , т. е. интервал меридиональных углов прихода частиц, при которых спутник будет в области диаграммы (на уровне мощности $1/2$), составляет $\Delta\theta_{1/2} = 64^\circ$. Из рис. 2 следует, что максимально возможное значение аксиального угла равно $\varphi_{\max} \approx 50^\circ$. При больших углах точка A будет находиться в области геометрической тени. Минимальное значение этого угла φ_{\min} определяется возможностью попадания спутника D в пределы диаграммы направленности. Очевидно, что для выбранных значений частоты наблюдения и высоты орбиты величина φ_{\min} , при которой спутник будет в пределах диаграммы направленности для частиц, приходящих в интервале углов $\Delta\theta_{1/2} = 64^\circ$, приблизительно равна 20° .

Для азимутальных углов α ограничений практически нет. Таким образом, на любой элемент площади $dS = 2\pi R^2 \sin\varphi d\varphi d\alpha$ могут падать частицы в телесном угле $\Delta\theta_{1/2} \cdot 2\pi$, и спутник будет находиться в зоне поля излучения. Поэтому произведение телесного угла на площадь будет

приблизительно равно $\Delta S \cdot \Delta\Omega \approx 2\pi R^2 (\cos\varphi_{\min} - \cos\varphi_{\max}) \Delta\theta_{1/2} \cdot 2\pi$.

Оценка скорости счета событий согласно выражению $J(> W) = A \cdot (W/W_0)^{1-\gamma} S \Omega t$ для частиц с энергией $W > 10^{22}$ эВ дает величину $J(> W) \approx 160$ год $^{-1}$.

Сравнение мощности радиосигнала и мощности космических радиошумов. Средняя температура небесной сферы на частоте 50 МГц приблизительно равна 5000 К. Поэтому $P_N = kT = 0.7 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц. Мощность, выделяемая на нагрузке антенны, равна $P_A = I(\nu) \cdot S_{\text{ант}} / \tau$, где $\tau \sim 1$ мкс — длительность импульса для полосы пропускания 1 МГц. Подстановка данных в выражение (1) дает $P_A = 100 \cdot 10^{-26} \cdot 10 \cdot 10^6 \approx 10^{-17}$ Вт/Гц, т. е. отношение $P_A/P_N \approx 140$. Это отношение можно увеличить, если использовать полуволновые вибраторы с рефлекторами. При этом диаграмма направленности антенны должны быть ориентирована в сторону Луны. Следует также учесть, что не вся энергия первоначальной частицы переходит в энергию каскада. Поэтому отношение P_A/P_N в несколько раз уменьшится.

Таким образом, энергию $W = 10^{22}$ эВ можно считать существенно превосходящей порог чувствительности детектора.

Пусть для определенности антенна детектора представляет собой три взаимно перпендикулярных полуволновых вибратора. Тогда э.д.с., наводимая на каждом из них, равна

$$\begin{aligned} u_x &= W_0 \frac{AA_1}{R} F(\theta) \cos\xi, \\ u_y &= W_0 \frac{AA_1}{R} F(\theta) \cos\zeta, \\ u_z &= W_0 \frac{AA_1}{R} F(\theta) \cos\psi, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\cos\xi$, $\cos\zeta$ и $\cos\psi$ — направляющие косинусы вектора напряженности поля в точке расположения антенны, A — известная константа, связанная с характеристиками приемных антенн, A_1 — множитель, определяемый из (1), и не связанный с направлением θ , $F(\theta)$ — коэффициент, выражющий диаграмму направленности каскадного ливня, W_0 — его энергия (т. е. фактически энергия частицы), R — расстояние от

ливня до антенн. Тогда из выражения (2) можно записать

$$W_0 = R\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}/AA_1F(\theta). \quad (3)$$

Расстояние R для высоты орбиты 1000 км лежит в пределах 1200—1700 км и не слишком влияет на величину э.д.с., $F(\theta)$ всегда меньше единицы, поэтому W_0 , вычисленная согласно (3) при $F(\theta) = 1$, будет нижним пределом энергии частицы.

Кроме значения энергии зарегистрированных частиц, можно сделать некоторые выводы относительно анизотропии потока с такой энергией. Если для каждого события записывать положение спутника относительно небесной сферы, то при достаточно большом наборе событий можно определить преимущественное направление прихода частицы.

Наконец, важным является тот факт, что при проведении эксперимента открывается реальная возможность проверки радиоастрономического метода [5] сравнением момента прихода частицы на поверхность Луны и момента регистрации радиоимпульсов на Земле (с учетом запаздывания) с помощью радиотелескопа в различных частотных диапазонах.

В заключение заметим, что эффект ЛПМ, во много раз «растягивающий» каскадный ливень при высоких энергиях в плотной среде, для адронных ливней не является существенным, так как π_0 -мезоны, ответственные за начало электромагнитного ливня, при больших энергиях взаимодействуют со средой, а не распадаются на γ -кванты [8, 9, 11, 12].

1. Аскарян Г. А. Избыточный отрицательный заряд электрон-фотонного ливня и когерентное излучение от него // ЖЭТФ.—1961.—41, № 2(8).— С. 616—618.
2. Аскарян Г. А. Когерентное радиоизлучение от космических ливней в воздухе и в плотных средах атмосферы // ЖЭТФ.—1965.—48, № 3.—С. 988—990.
3. Голубничий П. И., Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей супервысоких энергий с помощью искусственного спутника Луны // Космічна наука и технологія.—1999.—5, № 4.—С. 87—92.
4. Гусев Г. А., Ломоносов Б. Н., Пичхадзе К. М. и др. Регистрация космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий радиометодом с использованием искусств-

- венных спутников Луны // Космич. исслед.—2006.—44, № 1.—С. 22—42.
5. Филоненко А. Д. Регистрация космических лучей супервысокой энергии декаметровым радиотелескопом УТР-2 // Письма в ЖЭТФ.—1999.—70, № 10.—С. 639—641.
 6. Филоненко А. Д. Детектирование космических лучей по электромагнитной радиоэмиссии ливня и возможности этого метода в диапазоне сверхвысоких энергий // Успехи физ. наук.—2002.—172, № 4.—С. 439—471.
 7. Филоненко А. Д. Радиоастрономический метод измерения потока космического излучения сверхвысокой энергии в декаметровом и дециметровом диапазонах длин волн // Письма в ЖЭТФ.—2007.—86, № 5.—С. 339—343.
 8. Akhiezer A. I., Shul'ga N. F., Fomin S. P. The Landau-Pomeranchuk-Migdal Effect // Phys. Rev.—2005.—22.—P. 1—215.—(Monograph. — Cambridge: Sci. Publs, UK, 2005.—215 p.
 9. Alvarez-Muniz J., Marques E., Vazquez R. A. and Zas E. Radio pulses in dense media: simulation versus approximations // Proc. ICRC-2001, h. 1305—1308.
 10. Golubnichiy P. I., Filonenko A. D. The detecting of space rays of superhigh energies with the help of the artificial satellite of the Moon // The fifth Sino-Russian-Ukrainian Symposium on Space Science and Technology Held Jointly with The First International Forum on Astronautics and Aeronautics. — Harbin, P. R. China, 2000.—P. 543—548.
 11. Rusov V. D., Sharf I. V. One — parameter cascade model of multiple hadrons production in inelastic hh -processes at high energies // Nucl. Phys.—2006.—A764.—P. 460—475.
 12. Rusov V. D., Zelentsova T. N., Kosenko S. I., et al. Cascade parametrization of multiplicity distributions in inelastic $p\bar{p}$ and $p\bar{p}$ — interactions on energy interval in c.m.s. $\sqrt{s} = 20—1800$ GeV // Phys. Lett.—2001.—B504.—P. 213—217.

DETECTION OF FLUX COSMIC RAY OF ULTRAHIGH ENERGY IN THE LUNAR ORBIT

*V. N. Vaschenko, P. I. Golubnichiy, S. D. Krivonosov,
V. N. Pavlovich, V. D. Rusov, A. D. Filonenko,
S. P. Fomin, N. F. Shulga*

We present the main features of the project of the detector of space radiation of an ultrahigh energy of over 10^{22} eV a board the Moon satellite. The urgency of the problem and the possibility of realization of such aggregate are shown. Strength of the radio signal caused by the current of excess electron cascade and δ -electrons is quite sufficient for a power threshold of 10^{22} eV in an orbit at 1000 km. It is found that the most suitable frequency range is 50—100 MHz. Rough speed of the account will make 150 events in a year in this case.

УДК 520.6.05+53.091

Ю. А. Клименко, В. А. Яценко, Ю. В. Шатохина,
Ю. В. Прудко, О. В. Семенив

Інститут космічних досліджень НАНУ і НКАУ, Київ

О возможной реализации спутникового датчика микроускорений на основе нанотрубок

Представлено 03.09.07

Запропоновано ідею використання нанотрубок для створення чутливого елементу супутникового датчика мікроприскорень (наноакселерометра) нового типу. Функціонування пристроя забезпечується зміною електричної провідності нанотрубки під впливом зовнішніх інерційних сил. Обговорюється механізм роботи датчика мікроприскорень та приводяться рекомендації стосовно його реалізації.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей тенденцией в области развития современного космического приборостроения является миниатюризация компонентов и систем [1]. В процессе миниатюризации уже удалось существенно снизить габариты космических аппаратов (КА), что привело к созданию микро-, нано- и пикоспутников (10—100, 1—10 и 0.1—1 кг соответственно). Доля этих аппаратов в космических исследованиях сейчас составляет примерно 10 % и продолжает увеличиваться.

Проблема миниатюризации изделий для микроспутников дает толчок к развитию нанотехнологий [1]. В последние годы обострился интерес исследователей и инженеров к разработке наноэлектромеханических систем (НЭМС), действие которых основано на использовании взаимосвязи электрических и механических характеристик нанометровых объектов [2]. Миниатюрность изделий НЭМС обуславливает исключительно важные свойства изделий — портатив-

ность, высокий срок службы, минимизацию вибрационных и инерционных перегрузок, низкое потребление энергии, простоту в обслуживании и в замене. В качестве примеров успешного применения НЭМС в космической технике следует упомянуть кремниевые гироскопы, клапаны, микроисточники энергии, ячейки памяти, сенсоры для химического и биологического анализа, высокочастотные оптические и механические фильтры и пр. [4].

В настоящее время существенная часть нанотехнологических программ ведущих стран мира базируется на развитии и применении материалов с использованием углеродных нанотрубок (УНТ) [4, 5]. Нанотрубки характеризуются гигантским отношением их длины к диаметру ($10^4 \dots 10^7$), обладают высокой упругостью (модуль Юнга порядка 1 ТПа), прочностью (в 50 раз прочнее стали) и уникальными электрическими характеристиками (по типу проводимости могут быть металлами либо полупроводниками). В то же время нанотрубки являются

чрезвычайно стабильными и обладают достаточно высокой радиационной устойчивостью.

В данной работе обсуждается возможность реализации датчика микроускорений на основе нанотрубок. Традиционные подходы к решению задач измерения ускорений и микрогравитации на борту космических аппаратов основаны на использовании механических гироскопов и пьезодатчиков. Такие системы весьма громоздки и энергоемки, а также подвержены влиянию электромагнитных помех и действию ионизирующих излучений. Популярные ныне волоконно-оптические датчики ускорений требуют наличия источника когерентного оптического излучения и системы трансформации оптического сигнала в электрический ток. Эти типы датчиков имеют большие габариты, массу, высокую стоимость и не вполне пригодны для использования в спутниках сверхмалых размеров и массы.

Несмотря на то, что идея использования нанотрубок в качестве базовых элементов разнообразных приборов и сенсоров не является новой [6], только в настоящее время наблюдается переход от исследования физических характеристик УНТ к созданию прототипов будущих приборов, действие которых основано на необычных свойствах углеродных нанотрубок. Предлагаемый здесь вариант датчика микроускорений на нанотрубках основывается на экспериментально обнаруженной зависимости электрической проводимости нанотрубок от степени их изгиба, что, в свою очередь, обеспечивается за счет приложения к нанотрубке внешних инерционных сил.

ДАТЧИК МИКРОУСКОРЕНИЙ

Электрические характеристики УНТ в значительной степени зависят от степени их изгиба; после снятия внешней нагрузки, вызывающей деформацию нанотрубки, происходит полное восстановление ее первоначальной формы [7]. Как показано в работе [3] на основании квантовомеханических расчетов, электрический ток через нанотрубку с металлическим типом проводимости уменьшается при ее изгибе, а проводимость нанотрубки полупроводникового типа, наоборот, растет. Такая необычная связь между электрическими и механическими характери-

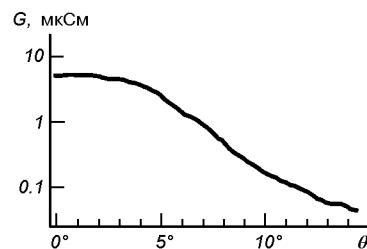


Рис. 1. Зависимость электрической проводимости G нанотрубки от угла θ ее изгиба (по данным [7])

стиками УНТ с различными типами проводимости обусловлена в первую очередь изменениями электронной структуры нанотрубки — под воздействием механической нагрузки изменяется положение уровня Ферми, ширина запрещенной зоны, концентрация носителей в УНТ, что и приводит к изменению тока.

Изменение проводимости УНТ под воздействием внешней механической нагрузки может быть положено в основу действия датчика микроускорений (наноакселометра), преобразующего механическое усилие в электрический сигнал. Для обоснования возможности создания такого прибора мы будем использовать результаты работы [7], где экспериментально обнаружено, что электрический ток через нанотрубку с металлическим типом проводимости уменьшается на два порядка при ее деформации на угол в 15° .

Кривая зависимости проводимости нанотрубки от угла ее изгиба приведена на рис. 1. Как видно, наиболее сильное изменение проводимости наблюдается в интервале углов $5\ldots15^\circ$, где электрическая проводимость нанотрубки достаточно чувствительна к изменению угла изгиба даже в 0.1° .

Будем считать, что сила F деформации нанотрубки вызывается инерциальной массой M , действующей на нанотрубку под влиянием ускорения a . Чтобы оценить силу, которая вызывает деформацию нанотрубки в интересующей нас области углов $5\ldots15^\circ$, воспользуемся данными из работы [7], которые представлены на рис. 2. Здесь приведена зависимость между внешней силой F , вызывающей изгиб нанотрубки, и ее смещением δ вдоль направления действия силы. По порядку величин видим, что изменение

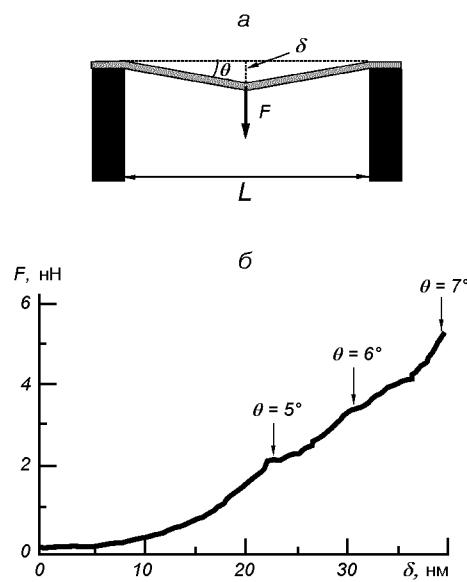


Рис. 2. Зависимость внешней силы F , вызывающей изгиб нанотрубки, от ее смещения δ вдоль вертикальной оси [6]; $L = 605$ нм — длина нанотрубки

внешней силы ΔF на 1 нН приводит к изменению угла изгиба нанотрубки на угол, меньший 1°. Это изменение силы может возникать за счет изменения Δa микроускорения, действующего на прибор. Предполагая, что $\Delta a \sim 10^{-5}$ м/с² (типичные значения для датчика микроускорений), получим значение инерционной массы $M \sim 0.1$ г, которая обеспечивает работу датчика в интересующей нас области микроускорений.

На рис. 3 представлен макет предлагаемого прибора. Нанотрубка 4 с металлическим типом проводимости помещена между двумя металлическими контактами 5. Пружина 2 обеспечивает исходную деформацию нанотрубки на угол $5^\circ < \theta < 15^\circ$, где наблюдается наиболее сильная зависимость между изгибом нанотрубки и током через нее. Под воздействием микроускорений внешняя масса 3 вызывает дополнительную деформацию нанотрубки и изменяет электрический ток между металлическими контактами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанотрубки, которые обладают уникальными механическими и электрическими характеристиками, и в то же время являются стабильными

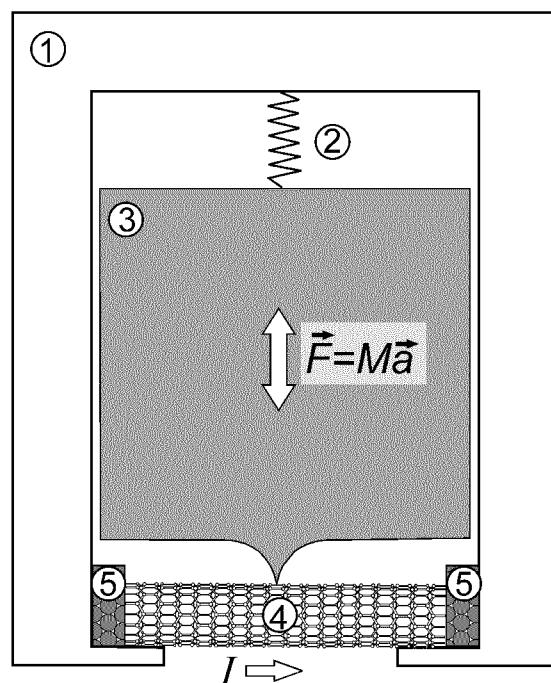


Рис. 3. Макет предлагаемого акселерометра: 1 — корпус, 2 — пружина, обеспечивающая исходный изгиб нанотрубки, 3 — инерционная масса, воздействующая на нанотрубку, 4 — нанотрубка, 5 — внешние металлические контакты. Движение массы под воздействием микроускорений вызывает изгиб нанотрубки и приводит к изменению тока между металлическими контактами

и радиационно устойчивыми. Высокая чувствительность электронных характеристик УНТ по отношению к внешним силам, рекордная величина их модуля упругости делают углеродные нанотрубки перспективной основой для создания сверхминиатюрных датчиков микроускорений. В данной работе предложен акселерометр, принцип работы которого основан на изменении проводимости нанотрубки под влиянием внешних инерционных сил.

1. Клименко Ю. А., Черемных О. К., Яценко В. А., Маслова Н. В. Состояние и перспективы создания микроспутников новых поколений: новые материалы, нанотехнология и архитектура // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 2/3.—С. 53—65.
2. Ekinici K. L., Roukes M. L. Nanoelectromechanical systems // Rev. Sci. Instrum.—2005.—76.—Art. N 061101.
3. Farajian A. A., Yakobson B. I., Mizuseki H., Kawazoe Y. Electronic transport through bent carbon nanotubes:

- nanoelectromechanical sensors and switches // Phys. Rev. B.—2003.—67.—Art. N 205423.
4. Globus A., Bailey D., Han J., et al. NASA applications of molecular nanotechnology // J. Brit. Interplanetary Soc.—1998.—51.—P. 145—152.
5. Sapmaz S., Blanter Y. M., Gurevich L., van der Zant H. S. J. Carbon nanotubes as nanoelectromechanical systems // Phys. Rev. B.—2003.—67.—Art. N 235414.
6. Sinha N., Ma J., Yeow T. W. Carbon nanotube-based sensors // J. Nanosci. and Nanotechnology.—2006.—6.—P. 573—590.
7. Tombler T. W., Zhou C., Alexseyev L., et al. Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation // Nature.—2000.—405, N 15.—P. 769—772.

**ON THE POSSIBILITY OF REALIZATION
OF SATELLITE MICROACCELERATION TRANSDUCER
BASED ON NANOTUBES**

*Yu. A. Klymenko, V. A. Yatsenko, Yu. V. Shatokhina,
Yu. V. Prutsko, O. V. Semeniv*

The idea to use nanotubes for making a sensitive element of a satellite microacceleration transducer (a nanoaccelerometer) is proposed. The device performance is provided by a variation of the nanotube electroconductivity under the influence of external inertial forces. The working mechanism for the microacceleration transducer and some recommendations towards its realization are discussed.

УДК 551.510

Л. В. Козак, А. И. Саливонов

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Вариации ночных измерений температуры верхней атмосферы Земли в течение года

Представлено 03.09.07

Проаналізовано значення температури верхньої атмосфери Землі за 1992 та 1993 рр., отримані приладом WINDII, встановленим на супутнику UARS. Для виключення добових і широтних варіацій окрім розглядалися денні і нічні вимірювання у вузькому широтному діапазоні. Аналіз нічних вимірювань показав збільшення температури на висотах біля 90 км в період із 100—130, 190—230 і 300—340 діб протягом року. Особливостями зміни сонячної і геомагнітної активності пояснити отриманий результат не вдалося. Дане підвищення температури може бути пов'язане із потужними метеорними потоками, які при вторгненні в атмосферу можуть привести до зміни фотохімічних та динамічних процесів в нижній термосфері.

ВВЕДЕНИЕ

Верхняя атмосфера представляет собой очень сложную динамическую и фотохимическую систему, которая работает в условиях жесткого солнечного контроля. Вместе с солнечной активностью на состояние атмосферы могут воздействовать и другие источники энергии. Известен ряд наблюдательных фактов, которые прямо или косвенно указывают на литосферно-ионосферные связи. Неоднократно наблюдались и анализировались свечения атмосферы [7, 17], возмущение атмосферного электрического потенциала, вариации плотности электронной концентрации в Е- и F-слоях [13, 14]. С другой стороны, известна реакция ионосферы на действие акусто-гравитационных волн, которые возникают при землетрясениях, извержениях вулканов и мощных взрывах [1]. Со спутников неоднократно регистрировались широкомасштабные неоднородности ионосферной плазмы; вариации потоков энергичных частиц, которые высипаются в ионосферу из радиационных поясов [8].

В данной работе рассмотрено возможное воздействие метеорных потоков на температуру верхней атмосферы Земли. Масса метеорного

вещества, выпадающего на Землю за год, составляет около 40 тысяч тонн, а средняя скорость столкновения с Землей для них приблизительно равна скорости движения Земли по орбите (30 км/с) [4, 10, 11]. Большая часть этого вещества испаряется на высотах 90—110 км, передавая свою кинетическую энергию атмосфере. Поэтому выпадение метеорного вещества может влиять на температурный баланс атмосферы, особенно во время мощных метеорных потоков, когда увеличивается количество частиц и их скорость до 60—70 км/с. Но насколько существенную роль сыграет эта энергия в балансе атмосферы по сравнению с солнечной, и получится ли ее отделить наблюдательными методами, — спрогнозировать тяжело. Именно исследованию возможного воздействия метеорных потоков на температуру верхней атмосферы Земли и посвящена данная работа. Определение аномалий поведения параметров верхней атмосферы, связанных с возможным воздействием выпадающего метеорного вещества, невозможно без учета фоновых вариаций, обусловленных главным образом особенностями солнечной и геомагнитной активности [2, 3]. Не стоит также забывать о наличии суточных, сезонно-широт-

ных вариаций и флюктуации плотности, которые связаны с гравитационными волнами. Кроме того, изменения температурных профилей в локальном масштабе могут быть вызваны извержениями вулканов, техногенными катастрофами и т. д.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования вариаций температуры в верхней атмосфере были использованы измерения температуры полученные на спутнике UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) [20] (архив GSFC DAAC (NASA Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive Center)). UARS — это совместный проект, спонсируемый Канадским космическим агентством и Французским центром в сотрудничестве с NASA. Спутник был запущен 12 сентября 1991 г. Орбита спутника — почти круговая, средняя высота полета 585 км, наклон 57° , период вращения 97 мин. На спутнике проводились измерения вертикальных профилей температуры, перемещения некоторых газов, горизонтальные составляющие скорости газа, потоки солнечной энергии.

Были проанализированы значения температуры, которые были получены с помощью прибора WINDII (Wind Imaging Interferometer). Данный прибор измерял ветер, температуру и коэффициент эмиссии в высотном диапазоне 80—300 км. По своему устройству WINDII — это оптический интерферометр Майкельсона с девятью фильтрами, для того чтобы выбрать запланированную эмиссию. Наблюдения производились над лимбом двумя телескопами, которые

расположены под углами 45° и 135° относительно вектора скорости спутника. Область зрения каждого телескопа охватывает 4° по горизонтали и 6° по вертикали. Некоторый объем атмосферы попадает последовательно в поле зрения обоих телескопов приблизительно через 7 мин, поэтому измеряемые параметры считаются неизменными на протяжении указанного промежутка времени.

Высотный профиль температуры получали, измеряяphotoхимическое свечение эмиссионных линий [22]:

- в верхней мезосфере — OH;
- в нижней термосфере — O_2 , $O(^1S)$;
- в средней термосфере — $O(^1S)$, $O(^1D)$, $O^+(^2P)$.

Параметры указанных линий и полос приведены в табл. 1.

Для высот ниже 95 км температурные профили определялись по измерению релеевского рассеяния [19, 21]. Сначала строился профиль изменения плотности с высотой, а из него температурный в предположении, что атмосфера вертикально стратифицирована и находится в гидростатическом равновесии.

Данные предоставлены в виде массивов значений температур в диапазоне высот 80—300 км с дискретностью 3—5 км по высоте, и через каждые 4° по широте.

Проанализированный диапазон высот полностью охватывает область вторжения метеоров.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Были рассмотрены отдельно дневные иочные измерения температуры в достаточно узком широтном диапазоне (для исключения широтной вариации) в течение 1993 и 1992 гг. Дневные измерения температуры показывали в основном суточные изменения, связанные с зенитным углом Солнца. Поэтому при дальнейшем рассмотрении дневные измерения не использовались. Это вызвано тем, что изменение температуры в результате вторжения метеоров будет намного меньше, чем при наличии вариаций солнечной и геомагнитной активности.

Ночные изменения температуры на высотах 83—120 км за 1993 г. представлены на рис. 1. Кривые получены скользящим усреднением по семи ночам. Погрешность, представленная на

Таблица 1. Параметры измеренных эмиссионных линий

| Эмиссия | Время жизни, с | λ , нм | h , км | Высота максимальной интенсивности, км |
|------------------------|----------------|----------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Зеленая линия $O(^1S)$ | 0.8 | 557.7 | ниже 80—110 выше 150—300 | 97 200 |
| Красная линия $O(^1D)$ | 110 | 630 | 150—300 | 250 |
| Полоса OH (8—3) | 0.0042 | 730 | 80—110 | 87 |
| Полоса O_2 (0—0) | 14 | 762 | 80—110 | 94 |
| Линия O^+ | 5 | 732 | 200—300 | 150 |

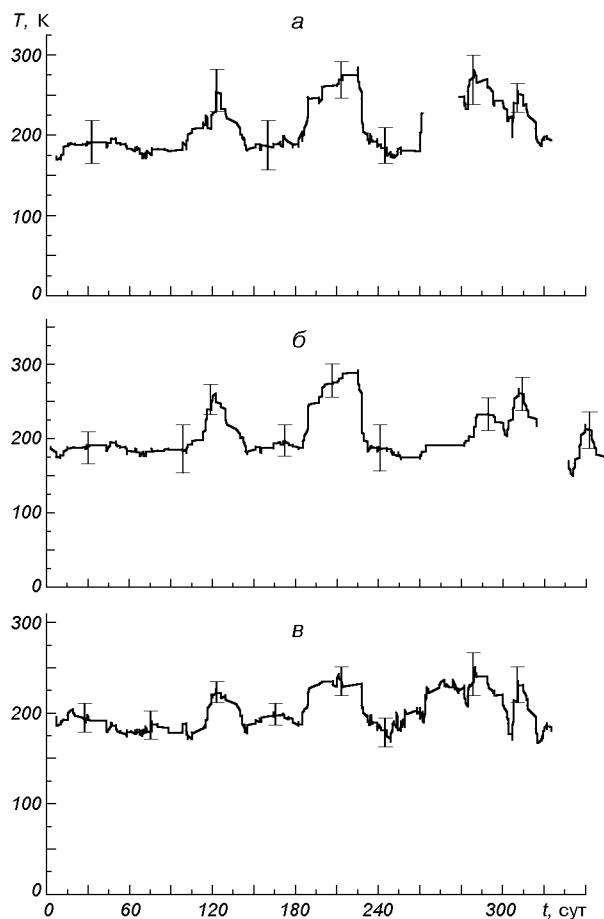


Рис. 1. Ночные измерения температуры на высоте 83—120 км: *а* — 1993 г., широтный диапазон от -15° до $+15^{\circ}$; *б* — 1993 г., широтный диапазон от $+15^{\circ}$ до $+45^{\circ}$; *в* — 1992 г., широтный диапазон от $+15^{\circ}$ до $+45^{\circ}$. Кривые получены скользящим усреднением по семи ночам. Разрыв соответствует отсутствию спутниковых данных

графиках, включает как погрешность измерения температуры прибором WINDII так и погрешность при усреднении данных. На графиках прослеживается увеличение температуры в периоды от 100 до 130 сут, от 190 до 230 сут и от 300 до 340 сут.

Данное увеличение температуры имеет место как при рассмотрении в широтном диапазоне от $+15$ до -15° , так и при рассмотрении в широтном диапазоне от $+15$ до $+45^{\circ}$. При анализе температурных особенностей в широтном диапазоне от $+45$ до $+70^{\circ}$ спутниковых измерений оказалось недостаточно.

Таблица 2. Метеорные потоки за 1993 год

| Название потока | Эпоха активности | Скорость, км/с | ZHR* |
|-------------------|------------------|----------------|-------------|
| Квадрантиды | 27.12—07.01 | 35 | порядка 100 |
| гамма-Нормиды | 25.02—22.03 | 56 | 8 |
| Виргиниды | 12.03—22.03 | 30 | 5 |
| Виргиниды 1 | 26.03—07.05 | 31 | |
| Лириды | 18.04—24.04 | 48 | 18 |
| эта-Аквариды | 21.04—12.05 | 66 | 60 |
| Сагиттариды | 01.06—31.07 | 30 | 5 |
| Цефеиды | 11.06—21.06 | 45 | |
| альфа-Каприкориды | 10.07—20.08 | 30 | 5 |
| дельта-Аквариды | 23.07—22.08 | 42 | 5 |
| Касиопеиды | 17.07—15.08 | 60 | |
| Пегасиды | 18.07—31.07 | 50 | |
| Персеиды | 09.07—17.08 | 61 | порядка 100 |
| Цефеиды (авг.) | 10.08—24.08 | | |
| Авригиды (авг.) | 14.08—31.08 | 69 | |
| Ориониды | 14.10—26.10 | 66 | 20 |
| Леониды | 08.11—18.11 | 72 | 20** |
| Геминиды | 25.11—18.12 | 35 | 120 |
| альфа-Дракон. 1 | 09.12—13.12 | 60 | |
| Урисиды | 22.12—25.12 | 35 | 10 |

* — ZHR (зенитное часовое число метеоров) — количество метеоров потока, приведенное к идеальным условиям наблюдений (количество метеоров, замеченное одним наблюдателем в течение часа с радиантом в зените и видимыми в зените звездами 6.5^m).

** — значение ZHR переменно.

Для проверки отмеченного увеличения температуры были обработаны данные за 1992 г. (рис. 1, *в*). На рисунке также прослеживается увеличение температуры в указанные выше промежутки времени.

При сравнении полученных результатов с метеорными потоками, наиболее мощные из которых представлены в табл. 2 (включены метеорные потоки со скоростью более 30 км/с и с $ZHR > 5$), оказалось, что это увеличение может быть вызвано такими метеорными потоками как: эта-Аквариды — эпоха активности с 21 апреля по 12 мая, скорость 66 км/с; Персеиды — с 9 июля по 17 августа, скорость 61 км/с; Леониды — с 8 по 18 ноября, которые имеют скорости 72 км/с, и Геминиды, которые хоть и имеют скорости около 35 км/с, но длительность их около одного месяца, а $ZHR = 120$.

Для того чтобы быть уверенным, что это повышение температуры не вызвано особенностями

тами солнечной и геомагнитной активности, мы рассмотрели значения потока излучения на длине волны 10.7 см (индикатор солнечной активности), и значения K_p -индекса за 1993 г. (рис. 2). Каких-либо всплесков на графиках, которые могли бы объяснить полученный результат, не наблюдается.

При высотном анализе полученного изменения температуры оказалось, что данное увели-

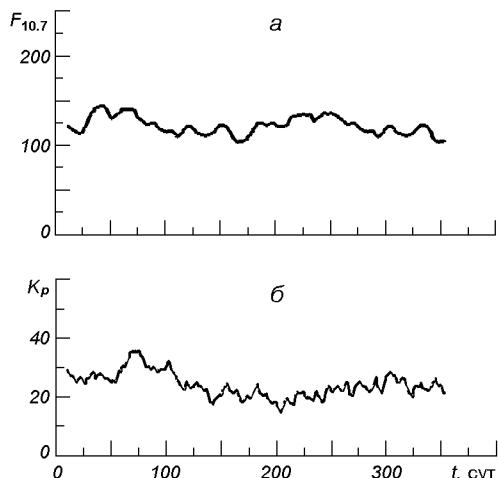


Рис. 2. Значение солнечной и геомагнитной активности за 1993 г.

чения температуры соответствует высотам около 90 км (рис. 3).

Кроме того, был проведен анализ значений температуры для ночных измерений за 1993 г. в высотном диапазоне от 87 до 93 км и в узком широтном диапазоне $\pm 5^\circ$ для зафиксированных ранее областей увеличения температуры (рис. 4). Точки — значения температуры, полученные на спутнике, непрерывная кривая — аппроксимация полиномом 5-й степени. К сожалению, измерений спутника недостаточно, чтобы непрерывно покрыть рассматриваемый диапазон, но на графике прослеживаются максимумы увеличения температуры для эта-Акварид — 125-е сут, для Персеид — 210-е сут, для Леонид и Геминид — 320-е и 348-е сут.

Теоретические оценки возможного увеличения температуры верхней атмосферы Земли на основе данных [12], в предположении, что кинетическая энергия метеоров полностью переходит в тепловую, показали, что несмотря на большую энергетику процесса [18], этой энергии недостаточно для объяснения наблюдаемого увеличения температуры. Поэтому рассмотрим другие механизмы увеличения температуры на высотах 90—100 км, катализатором которых могут быть вторжения метеоров.

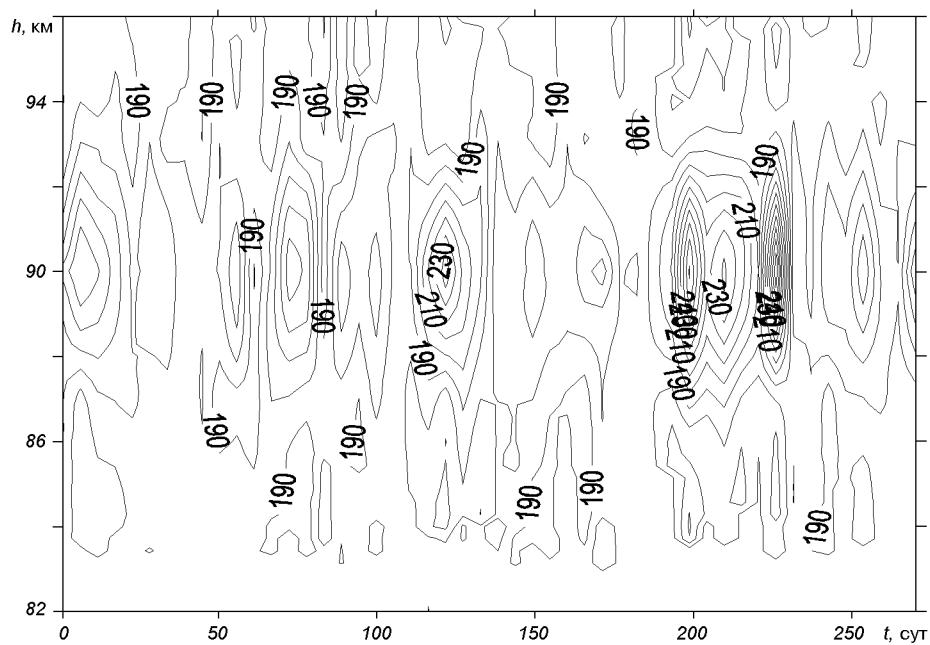


Рис. 3. Высотное распределение значений ночной температуры за 1993 г.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ

Связь между температурой и концентрацией электронов. Рассмотрим ситуацию на уровне нижней термосферы. Основные ионы в данной области — молекулярные ионы O_2^+ и NO^+ , которые исчезают в процессах диссоциа-

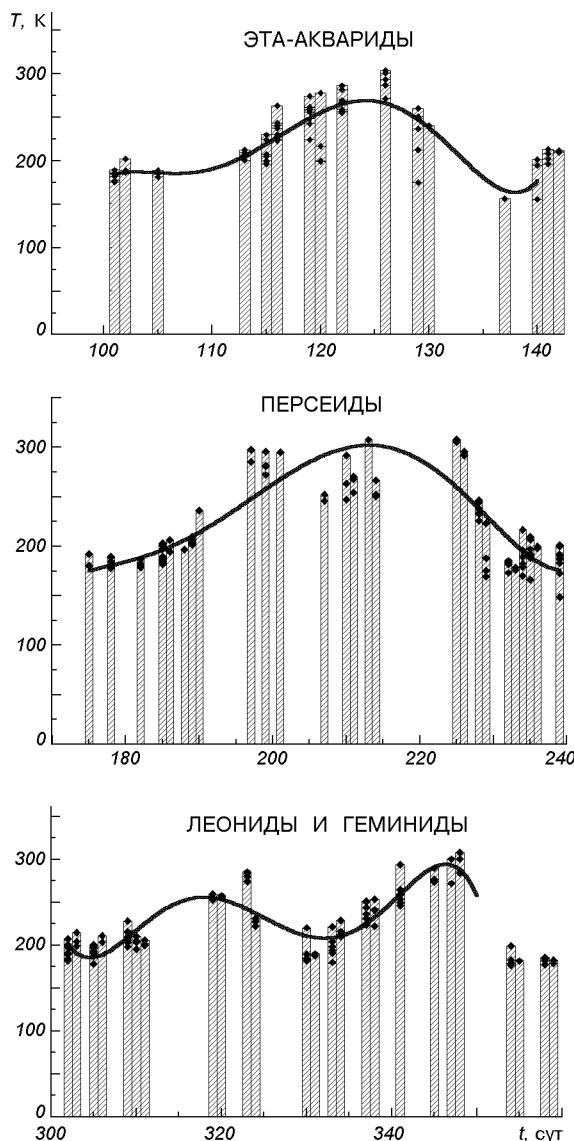
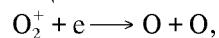
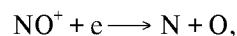


Рис. 4. Значение температуры на высоте 83—90 км (широтный диапазон $\pm 5^\circ$) в период действия метеорных потоков Эта-Акварид, Персеид, Леонид и Геминид. Кривая — аппроксимация полиномом 5-й степени

тивной рекомбинации:



$$\alpha_1 = 2.2 \cdot 10^{-7} (300/T_e) \text{ см}^3/\text{с} \quad (1)$$



$$\alpha_2 = 4.52 \cdot 10^{-7} (300/T_e), \text{ см}^3/\text{с}$$

где T_e — электронная температура, которая на указанных высотах изменяется вместе с изменением температуры нейтрального газа T .

Как видно из выражений (1), коэффициенты скорости данных реакций (α_1 и α_2) связаны с температурой атмосферы обратно пропорциональной зависимостью.

Значение электронной концентрации связано с эффективным коэффициентом рекомбинации также обратной зависимостью

$$N_e \propto (1/\alpha_{\text{эфф}})^{1/2}, \quad (2)$$

где

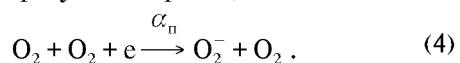
$$\alpha_{\text{эфф}} \approx \frac{\alpha_1 [O_2^+] + \alpha_2 [NO^+]}{[O_2^+] + [NO^+]} \quad (3)$$

— эффективный коэффициент рекомбинации; $[O_2^+]$ и $[NO^+]$ — концентрации упомянутых ионов.

Из выражений (1)–(3) следует, что увеличение концентрации электронов непосредственно связано с увеличением температуры на высотах около 90 км.

При учете ионов-вязок (клластеров) данный эффект изменения температуры будет усиливаться.

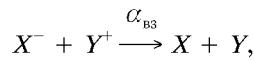
Связь динамики отрицательных ионов в верхней мезосфере и на мезопаузе с температурой и концентрацией электронов. Отрицательные ионы образуются на высотах D-слоя ионосферы в результате реакции



Продуктивность данного процесса определяется как $q = \alpha_n [O_2]^2 N_e$, $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$. Поскольку q связано с концентрацией $[O_2]$ квадратичным законом, тогда концентрация отрицательных ионов очень сильно уменьшается с высотой. Ионы O_2^- в сложной и малоизученной последовательности химических реакций трансформируются в отрицательные ионы других молекул, вплоть до таких ионов-клластеров, как $O_2^-(H_2O)_n$, $CO_3^-(H_2O)_n$,

NO_2^- (HNO_2), CO_4^- (H_2O), NO_2^- (HNO_2) H_2O и других, которые хорошо регистрируются в массспектрометрических космических экспериментах.

Наличие отрицательных ионов в нижней ионосфере приводит к увеличению эффективного коэффициента рекомбинации за счет быстрых реакций взаимной нейтрализации



которые имеют высокий коэффициент скорости $\alpha_{\text{вз}} \sim 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$.

Пусть $\lambda = \sum_i X_i^- / N_e$, где X_i^- — отрицательный ион сорта i , тогда эффективный коэффициент рекомбинации при наличии условия фотохимического равновесия $[\text{O}_2^-] = \text{const}$ равен

$$\alpha_{\text{вз}} = (1 + \lambda)(\alpha_{\text{д}} + \lambda\alpha_{\text{вз}}),$$

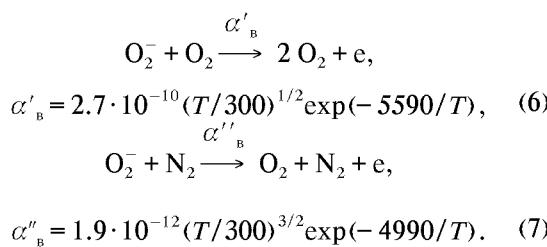
где $\alpha_{\text{д}}$ определяется только реакциями диссоциативной рекомбинации NO^+ , O_2^+ .

По современным данным днем в невозмущенной ионосфере $\lambda \sim 1$ на высоте 75 км, а уже на $h \approx 80$ км $\lambda \ll 1$ [9]. Ночью $\lambda \sim 1$ на $h \approx 80$ км и тоже быстро уменьшается с высотой. В некоторых ракетных экспериментах зарегистрированы слои отрицательных ионов на высоте $h \sim 90$ км. Химический состав отрицательных ионов существенно отличается по данным разных экспериментов.

Для разработки адекватной модели динамики отрицательных ионов в слое D ионосферы данных не достаточно. Поэтому рассмотрим упрощенный вариант на уровне первичных ионов O_2^- , которые образуются в реакции (4). Коэффициент скорости этой реакции при $195 \text{ K} < T < 600 \text{ K}$ [15, 16]:

$$\alpha_{\text{д}} \approx 1.4 \cdot 10^{-29} (300/T) \exp(-600/T), \text{ см}^6/\text{с}. \quad (5)$$

Процесс отлипания, будем предполагать, происходит при столкновении с основными нейтральными молекулами:



Коэффициенты скорости этих реакций определены экспериментально и описываются зависимостями (6), (7) в интервале температур $375 \text{ K} < T < 600 \text{ K}$ [16]. Кроме того, в работе [16] все же считается, что возможна их экстраполяция на более низкие температуры.

Учитывая (4) — (7), получим

$$\frac{\partial [\text{O}_2^-]}{\partial t} = \alpha_{\text{д}} [\text{O}_2]^2 N_e - \alpha'_{\text{в}} [\text{O}_2^-] [\text{O}_2] - \alpha''_{\text{в}} [\text{O}_2^-] [\text{N}_2],$$

а при наличии условия фотохимического равновесия $[\text{O}_2^-] = \text{const}$ получим:

$$[\text{O}_2^-] = \frac{\alpha_{\text{д}} [\text{O}_2]^2 N_e}{\alpha'_{\text{в}} [\text{O}_2] + \alpha''_{\text{в}} [\text{N}_2]}, \quad (8)$$

Внесем в выражение (8) значения $\alpha_{\text{д}}$, $\alpha'_{\text{в}}$ и $\alpha''_{\text{в}}$ в их эмпирическом виде (5) — (7):

$$[\text{O}_2^-] = \frac{0.52 \cdot 10^{-19} [\text{O}_2] N_e (300/T)^{3/2} \exp(4390/T)}{\exp(-600/T) + 0.007 (T/300) [\text{N}_2]/[\text{O}_2]}.$$

Отсюда следует уменьшение концентрации отрицательных ионов $[\text{O}_2^-]$ при увеличении температуры атмосферы, или уменьшение λ , а вместе с ним и эффективного коэффициента рекомбинации. Электронная концентрация увеличивается, таким образом, не только за счет интенсификации процессов отлипания, а и за счет уменьшения темпа рекомбинации.

Динамические процессы. Даже небольшое увеличение температуры атмосферы в результате перехода кинетической энергии метеоров в тепловую, и неравномерное локальное распределение составляющих (в данном случае электронов) может вызвать диффузионные процессы, и как следствие — интенсификацию турбулентности на высотах мезопаузы. Изменение турбулентности на данных высотах также приводит к увеличению температуры на высотах около 90 км [5, 6].

ВЫВОДЫ

Подводя итоги проведенных исследований, можно отметить следующие изменения температуры верхней атмосферы:

- увеличение температуры для ночных измерений в периоды от 100-х до 130-х сут, от 190-х до 230-х сут, от 300-х до 340-х сут;

- увеличение температуры можно отождествить с такими мощными метеорными потоками: эта-Аквариды (скорость 66 км/с); Персеиды (скорость 61 км/с); Леониды (скорость 72 км/с) и Геминиды (скорость 35 км/с, длительность с 25 ноября по 18 декабря);
- увеличение температуры характерно для высот около 90 км.

Мощные метеорные потоки в данном случае выступают как возможные катализаторы photoхимических и динамических процессов в нижней термосфере.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта CRDF UKP2-2644-KV-05.

1. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Сорокин В. М., Федорович Г. В. О генерации геомагнитных вариаций акустическими колебаниями во время землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли.—1979.—№ 3.—С. 58.
2. Антонова Л. А., Иванов-Холодный Г. С. Солнечная активность и ионосфера. — М.: Наука, 1989.—168 с.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
4. Волошук Ю. И., Кащеев Б. Л., Кручиненко В. Г. Метеоры и метеорное вещество. — Киев: Наук. думка, 1989.—294 с.
5. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н. О роли турбулентности и инфракрасного излучения в тепловом балансе нижней термосферы // Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова. — М.: Наука, 1982.—С. 29—47.—(Тр. ФИАН, Т. 130).
6. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н., Марков М. Н., Маров М. Я. Численное моделирование нагрева и охлаждения газа в околосземном космическом пространстве // Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова. — М.: Наука, 1982.—С. 3—28.—(Тр. ФИАН, Т. 130).
7. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле.—2000.—2, № 1.
8. Гримальский В. В., Ивченко В. Н., Лизунов Г. В. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 21—30.
9. Данилов А. Д., Власов М. Н. Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере. — Л.: Гидрометеоиздат, 1973.—176 с.
10. Катасев Л. А. Исследования метеоров в атмосфере Земли фотографическим методом. — Л.: Гидрометеоиздат, 1966.—334 с.
11. Крамер Е. Н., Шестака И. С. Метеорная материя в атмосфере Земли и околосолнечном космическом пространстве // Результаты исследований по МГП. — М.: Наука, 1983.—184 с.
12. Кручиненко В. Г. Приток космических тел на Землю в

широком интервале масс // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 2.—С. 114—127.

13. Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия.—1983.—23, № 5.—С. 842.
14. Липеровский В. А., Похотов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—304 с.
15. Мак-Ивен М., Филлипс Л. Химия атмосферы. — М.: Мир, 1978.—376 с.
16. Феллс А. В. Лабораторные исследования аэрономических процессов прилипания и отлипания электронов // Лабораторные исследования аэрономических реакций. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970.—С. 39—57.
17. Фишкова Л. М. Торошелидзе Т. И. Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба // Полярные сияния и свечение ночного неба.—1989.—№ 33.—С. 17—23.
18. Черногор Л. Ф. Энергетика процессов на Земле, в атмосфере и околосземном космосе в свете проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія.—1999.—5, № 1.—С. 38—47.
19. Evans W. F. J., Laframboise L. R., Shepherd G. G. Mesospheric temperatures from Rayleigh scattering measurements by the WINDII instrument on UARS // Adv. Space Res.—1994.—14, N 9.—Р. 285—288.
20. Reber C. A., Trevathan C. E., McNeal R. J., et al. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) Mission // J. Geophys. Res.—1993.—98D, N 6.—Р. 10643—10647.
21. Shepherd G., Dudhia A., Lopez-Puertas M., et al. Upper mesosphere temperatures in summer: WINDII observations and comparisons // Geophys. Res. Lett.—1997.—24, N 4.—Р. 357—360.
22. Shepherd G., Thuillier G., Gault W. A., et al. WINDII — The Wind Imaging Interferometer on the Upper Atmosphere Researcrh Satellite // J. Geophys. Res.—1993.—98D, N 6.—Р. 10725—10750.

VARIATIONS OF NIGHT MEASUREMENTS OF THE UPPER EARTH'S ATMOSPHERE TEMPERATURE OVER THE COURSE OF A YEAR

L. V. Kozak, A. I. Salivonov

The temperature values for the upper Earth's atmosphere during 1992 and 1993 obtained with the device WINDII installed onboard the satellite UARS were analysed. The measurements made in daytime and at night were processed separately. To avoid the latitudinal variations, the data sample was separated into subsamples within narrow latitudinal ranges. Our analysis of the night measurements showed some increase of the temperature at an altitude of around 90 km in the periods near 100—130, 190—230 and 300—340 days during the year. The obtained temperature changes cannot be explained by solar or geomagnetic activity features. The temperature variations detected may be caused by powerful meteor showers which can produce some changes in photo-chemical and dynamical processes in lower thermosphere during their activity.

УДК 550.385

Ю. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

Геомагнітна активність та динаміка секторної структури міжпланетного магнітного поля

Представлено 03.09.07

Показано, що з ростом сонячної активності двосекторна структура міжпланетного магнітного поля перетворюється у багатосекторну. За даними середньоширотної обсерваторії продемонстровано залежність геомагнітної активності від зміни секторної структури.

ВСТУП

Основним параметром сонячного вітру, який визначає рівень геомагнітної активності, є орієнтація і величина міжпланетного магнітного поля (ММП). Найбільш інтенсивні геомагнітні збурення спостерігаються при проходженні біля Землі швидкісних потоків плазми з вмороженими у них магнітними полями Сонця, які мають південну ($B_z < 0$) складову, спрямовану протилежно силовим лініям дипольного поля Землі.

Необхідною умовою розвитку геомагнітної бурі є тривале підсилення магнітосферно-іоносферної конвекції [11]. Конвекція підсилюється при наявності в сонячному вітрі південної складової ММП [10, 17]. У спокійному сонячному вітрі B_z близька до нуля [16]. Для генерації суттєвої B_z -складової в сонячному вітрі повинна появитись неоднорідність. Така неоднорідність може створитися корональними викидами маси [13], взаємодією між корпускулярними потоками [5] та ін.

Важливою особливістю ММП є секторна структура, тобто збереження напрямку поля у площині екліптики від Сонця або до Сонця відносно лінії Сонце — Земля протягом декількох діб, і яка обертається разом з Сонцем. У

спокійних умовах переважає двосекторна структура, яка ускладнюється в збурених умовах при появі на Сонці активних областей. Активні області зароджуються на Сонці переважно поблизу секторних границь [4, 5], що веде до появи так званих активних довгот [12]. На границях секторної структури збільшуються флюктуації вертикальної складової [9], підсилюється геомагнітна активність [14].

Метою роботи є вивчення залежності геомагнітної активності від зміни секторної структури ММП. Для дослідження вибрано інтервал часу з 1 липня 1966 р. до 28 травня 1974 р., один з найспокійніших у двадцятому столітті. Це дає можливість прослідкувати за зміною секторної структури. В даному інтервалі часу ряди даних про ММП найбільш повні.

ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Середньогодинні значення складових ММП у сонячно-екліптичній системі координат взяті із каталогу Кінга [15] і узгоджені з даними Свальгарда [20], який визначав знак сектора ММП за наземними даними. Дані про сонячні спалахи одержані з каталогу [3]. Мірою геомагнітної

активності вибрані добові суми відхилень середньогодинних значень горизонтальної складової поля на середньоширотній обсерваторії «Львів» ($\lambda = 49.90^\circ$, $\varphi = 23.75^\circ$) від відповідних середніх значень цієї ж складової по п'яти міжнародно-спокійних днях ($\Sigma(H-S_q)$). Як показано в роботі [19], величина $\Sigma(H-S_q)$ добре корелює з виправленими AE-індексами магнітної активності [8] як у спокійних, так і у збурених умовах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В досліджуваному інтервалі часу відбулось 106 обертів Сонця навколо його осі, з них у 62 обертах спостерігалась двосекторна структура ММП, у 44 обертах двосекторна структура порушувалась і ставала багатосекторною.

Як зазначалось в роботі [6], у варіаціях секторної структури можна виділити три типи динамічних процесів: перший — поступове зародження нового сектора протилежного знаку в межах існуючого протягом кількох обертів Сонця; другий — поступове зменшення тривалості сектора і повне його зникнення; третій — зменшення границь між секторами, як за годинниковою стрілкою, так і проти неї. Рух границь між секторами за годинниковою стрілкою відповідає збільшенню тривалості попереднього сектора, проти годинникової стрілки — зменшення його тривалості. Пояснення таких змін секторної структури можна дати, використавши модель дископодібного струму, який оточує Сонце. Він розміщений його екваторіальній площині і ділить міжпланетне середовище з додатним і від'ємним напрямами ММП [18]. Хвилеподібна деформація цього струму веде до того, що супутник, який рухається за межами магнітосфери, позмінно знаходиться то північніше, то південніше дископодібного струму і спостерігає зміну знаку радіальної складової ММП.

Квазістационарні корпускулярні потоки сонячного вітру, а також потоки плазми від сонячних спалахів деформують дископодібний струм [2], що веде до варіацій секторної структури ММП. Поступове зародження нового сектору в межах існуючого у більшості випадків проявляється як порушення структури.

На рис. 1 показано зародження від'ємного сектора в 1840—1844-му обертах Сонця. Зарод-

ження його відмічено квадратними дужками. По осі абсцис відкладені дати, по осі ординат — кут Φ , який показує відхилення радіальної складової ММП від напряму на Сонце. Кут Φ відраховується проти годинникової стрілки в градусах. В спокійних умовах ММП в площині екліптики направлене по спіралі Архімеда, тобто кут між ММП та напрямком на Сонце повинен бути рівним 135° (додатний сектор) або 315° (від'ємний сектор). На рис. 1 появі додатного сектора показана суцільною напрямленою вниз стрілкою, від'ємного — вгору. Сектором називаємо таку структуру ММП, у якій значення радіальної складової поля лягають в один і той же квадрант координатної сітки не менше трьох діб. Якщо напрямок поля змінюється за інтервал часу, менший за три доби — це є відхилення від секторної структури (показано на рис. 1 пунктирними вертикальними стрілками). Зліва вгорі нанесено номер оберту Сонця по Бартельсу, справа знак сектора. Верхній ряд послідовних чисел — номер дня в кожному оберти. Під кривою значень Φ нанесені значення величин $\Sigma(H-S_q)$ в цей же день. Тут же показано наявність спалахів на Сонці у близькій (Б), проміжній (П) та дальній (Д) зонах Сонця. Позначення зон взято із роботи [3]. Близня зона відраховувалась від екватору Сонця по геліошироті до $\pm 15^\circ$, проміжна — від ± 15 до $\pm 30^\circ$, а дальня — від $\pm 30^\circ$ і до полюсів. Геліопроекція Землі завжди перебувала на нульовому меридіані і на екваторі Сонця.

Рис. 1 показує, що в 1840-му оберти Сонця спостерігалась типова спокійна двосекторна структура ММП. 28 січня 1968 р. відбулась зміна знаку сектора з додатного на від'ємний, яка супроводжувалась серією із шістнадцяти сонячних спалахів в проміжній зоні. 5—10 лютого спалахи не спостерігались. 11 лютого знак сектора знову помінявся на додатний, за яким відбулася серія з семи спалахів у близькій та проміжній зонах. Даний сектор стає нестабільним. 16 лютого, у 1841-му оберти у межах додатного сектора поле змінило знак на короткий проміжок часу. У 1842-му оберти Сонця це відхилення було тривалишим (14—16 березня) і фактично стало новим від'ємним сектором під час 1843—1844 оберть. Надалі структура стала багатосекторною. Уже у 1845-му оберти спостерігаються дві потужні серії сонячних спа-

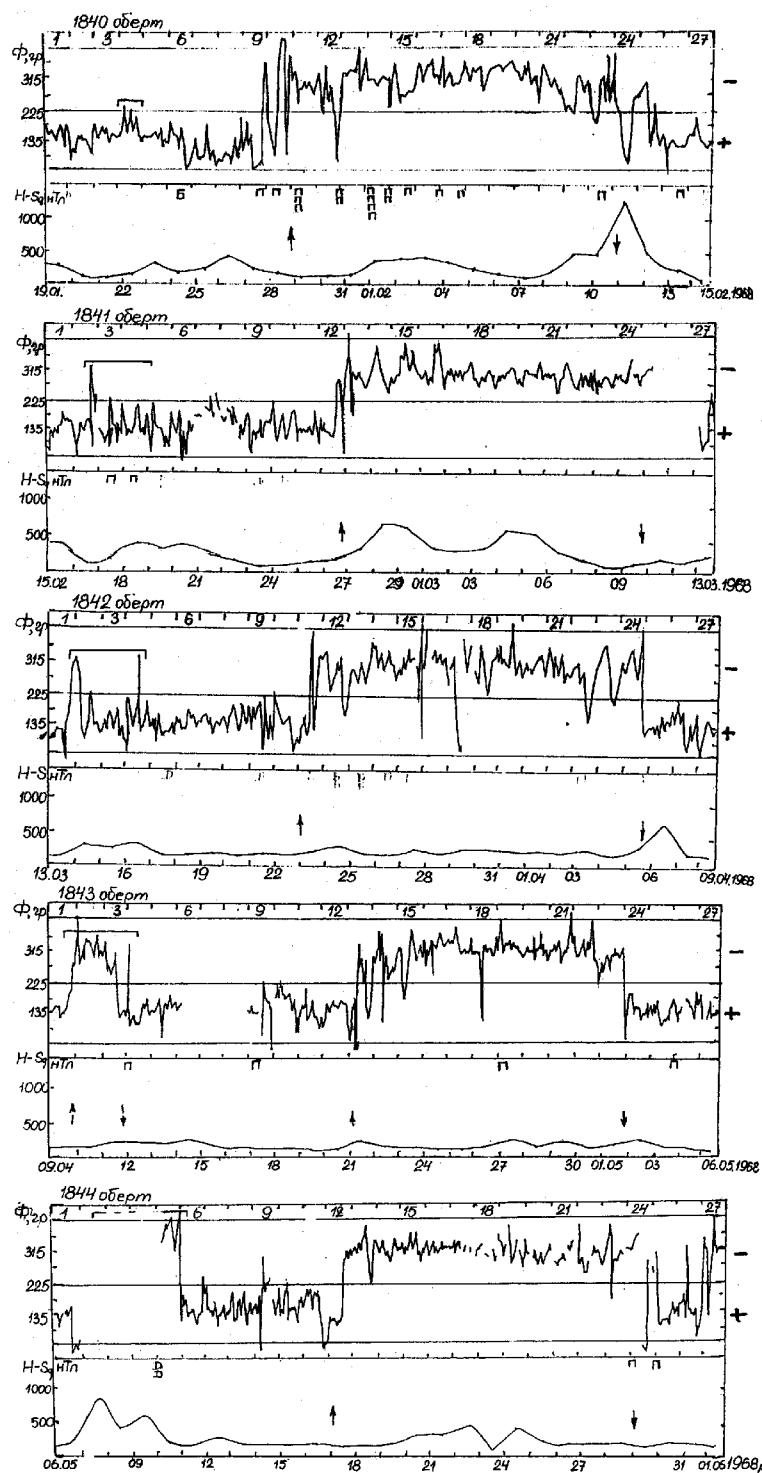


Рис. 1. Зміна відхилення радіальної складової ММП від напрямку на Сонце (Φ) протягом 1840—1844-го обертів Сонця та зміна геомагнітної активності ($H-S_q$) за цей же період

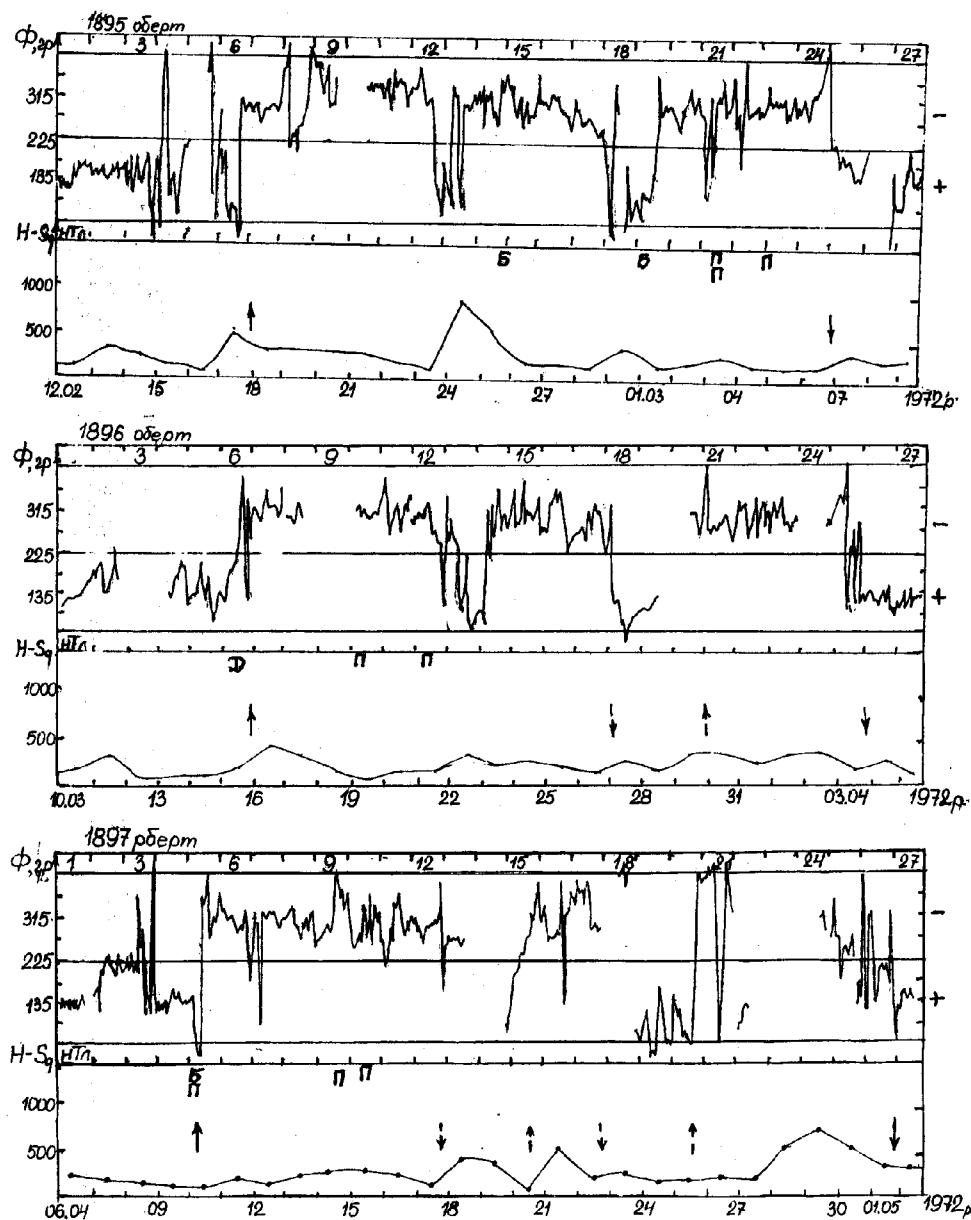


Рис. 2. Приклад дестабілізації двосекторної структури та її перехід у багатосекторну

лахів: 20 спалахів з 2 до 14 червня 1968 р. та шість спалахів з 17 до 21 червня. Як можна бачити з рис. 1, зміни знаків секторів ММП, а також відхилення від секторної структури веде до значного росту геомагнітної активності, що добре видно на кривих зміни $H-S_g$. Перехід

двосекторної структури у багатосекторну супроводжується значним ростом активності.

В 1840—1844-му обертах спостерігалися переміщення границь секторів як за годинниковою стрілкою, так і проти неї.

На рис. 2 показано типовий приклад де-

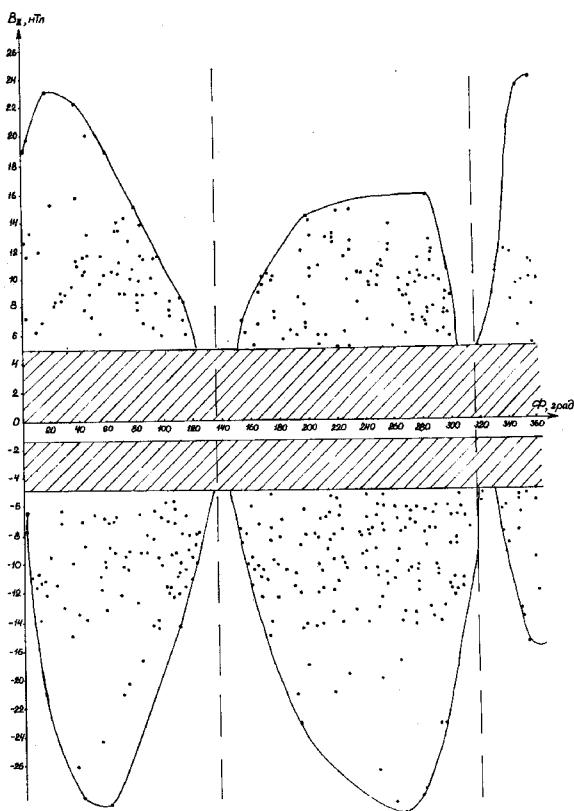


Рис. 3. Залежність величини вертикальної складової ММП від напрямку поля у площині екліптики

стабілізації двосекторної структури та її перехід у багатосекторну та впливу короткочасних відхилень ММП від секторної структури на величину геомагнітного збурення під час 1895—1897-го обертів Сонця. Від'ємний сектор ММП, який спостерігається з 18 лютого до 7 березня 1972 р. в 1895-му оберті Сонця переривався відхиленнями у додатній сектор 24—25 лютого, 29 лютого—1 березня та 3—5 березня. З першим відхиленням зв'язана помірна геомагнітна буря ($\Sigma(H-S_q) = 901$ нТл), друге та третє — зі збуреннями $\Sigma(H-S_q) = 180$ та 228 нТл відповідно. Всі відхилення супроводжувалися сонячними спалахами у близькій та проміжній зонах Сонця. При зміні знаку сектора 18 лютого та 7 березня також спостерігались магнітні бурі ($\Sigma(H-S_q) = 570$ та 588 нТл). В наступних обер-

тах тривалість відхилень значно збільшилась, і двосекторна структура трансформувалась у багатосекторну, яка проіснувала на протязі пяти обертів Сонця, і тільки в 1901-му оберті структура стала двосекторною, причому початок розглядуваного від'ємного сектора, який спостерігався 18 лютого, перемістився за годинниковою стрілкою на дев'ять днів. У цей інтервал часу, під час 1899-го обертута Сонця 18—20 червня 1972 р., спостерігалась дуже велика магнітна буря (максимальне значення $\Sigma(H-S_q) = 2093$ нТл).

Оскільки стабільність секторної структури ММП зв'язана з активністю Сонця, поява перпендикулярної до екліптики складової ММП, повинна залежати від напрямку ММП у площині екліптики.

На рис. 3 показано залежність величини вертикальної складової ММП за весь досліджуваний інтервал часу від напрямку поля у площині екліптики, положення спіралі Архімеда відмічені вертикальними штриховими лініями. Величина B_z зростає під час відхилень ММП в площині екліптики від спіралі Архімеда та на границях секторів. Величина напруженості ММП в такі проміжки часу також значно збільшується. Максимальних значень $|B_z|$ набуває при $\Phi = 20\ldots 60^\circ$ та $220\ldots 260^\circ$. У спокійних умовах $|B_z| \leq 5$ нТл і не викликає великих геомагнітних збурень. На рис. 3 площа при $|B_z| \leq 5$ нТл заповнена косими лініями. В ті інтервали часу, коли порушення секторної структури супроводжується великими додатними значеннями B_z , в зоні полярних сяйв та в середніх широтах магнітних збурень не спостерігається. При $B_z > 0$ відбувається через'єдання ММП і силових ліній дипольного поля в районі каспів [1]. Магнітопауза в такі години віддаляється від Землі, широта каспів збільшується, а у полярних шапках Землі спостерігається особливий тип геомагнітних варіацій [7].

На рис. 4 показана сумарна картина розвитку секторної структури ММП за 1819—1858 оберті Сонця. Номери обертів нанесені зліва. Початок додатного сектора позначене стрілкою, направленою вниз, від'ємного — вгору, штрихові стрілки — зародження нового сектора в межах попереднього. Косими лініями затемнені дні, коли спостерігались відхилення від секторної структу-

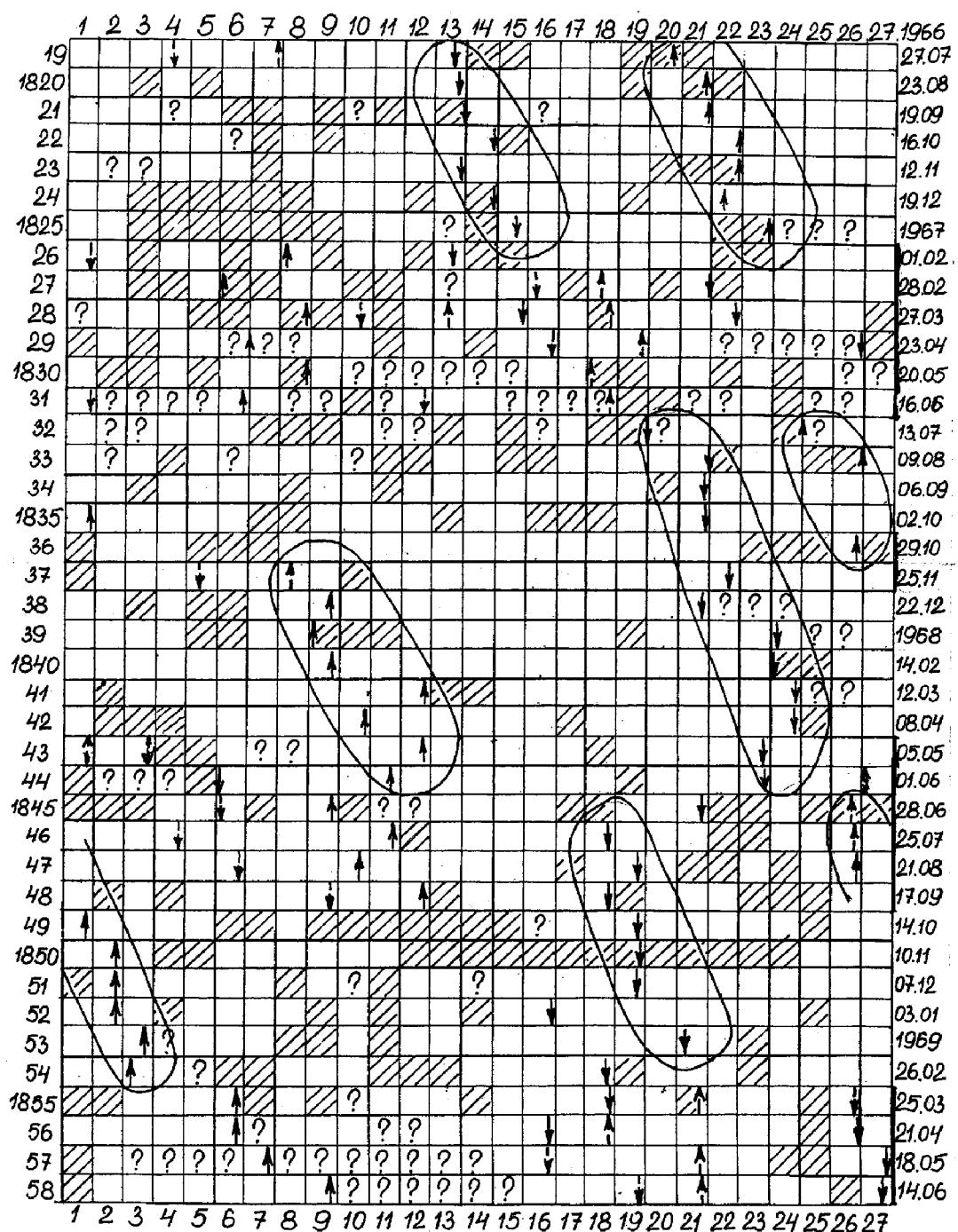


Рис. 4. Сумарна картина розвитку секторної структури ММП у 1819—1858-му обертах Сонця

ри, знаки запитання — напрямок ММП непідомий. Дати останнього дня відповідного оберту показані справа, послідовна нумерація днів в обертах нанесена вгорі і знизу. Оберти Сонця, у яких спостерігалась багатосекторна структура, відмічені на рис. 4 справа товстими лініями.

На початку 1819-го оберту Сонця спостерігалась серія із одинадцяти спалахів в дальній зоні Сонця, що призвело до утворення пятисекторної структури та помірної магнітної бурі 8—10 липня 1966 р. В наступному 1820-му оберту Сонця кількість спалахів зменшилась, і секторна структура стабілізувалася. Двосекторна структура зберігалась в 1820—1825-му обертах Сонця. Однак при появлі сонячних спалахів спостерігались відхилення від секторної структури. У 1821-му оберту 29 серпня о 22 годині UT спостерігався екскурс поля з від'ємного сектора у додатний на 8 годин, після якого на Землі спостерігалась велика магнітна буря ($\Sigma(H-S_q) = 752$ нТл). Така ж подія відбулась у цьому секторі 3—5 вересня, що призвело до дуже великої магнітної бурі ($\Sigma(H-S_q) = 1727$ нТл).

На кінець 1825-го та протягом 1826—1831-го обертів кількість спалахів на Сонці значно зросла. Спостерігалися серії із 17, 23 і 25 спалахів [3]. Секторна структура ММП у 1826—1831-му обертах стала багатосекторною. Двосекторна структура відновилась у 1832-му оберти. На Землі в цей час спостерігались малі магнітні бурі ($\Sigma(H-S_q) \leq 600$ нТл). Така ж послідовність подій відбувалася протягом наступних обертів Сонця у всьому інтервалі часу. На рис. 4 положення однієї і тієї ж граници між секторами у послідовних обертах Сонця окреслено суцільною замкнутою лінією.

ВИСНОВКИ

Аналіз секторної структури ММП за період з 1 липня 1966 р. до 28 травня 1974 р. показав, що зміна знаку сектора ММП, а також недовготривалі порушення секторної структури, тобто відхилення поля від напряму по спіралі Архімеда, ведуть до генерації вертикальної складової ММП. Максимальних значень $|B_z|$ складова ММП набуває при значеннях кута $\Phi = 20\ldots60^\circ$ в додатному секторі та $220\ldots260^\circ$ — у від'ємному секторі ММП. Збільшення сонячної активності

веде до перебудови двосекторної структури в багатосекторну, до появи $|B_z|$ -складової ММП значної величини і до збільшення геомагнітної активності.

1. Беленькая Е. С. Структура магнитосферного магнітного поля при различных направлениях магнитного поля солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрон.—2004.—44, № 4.—С. 435—441.
2. Бобров М. С. О деформации плоскости токового слоя потоками солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрон.—1980.—20, № 5.—С. 929—932.
3. Иванов К. Г., Микерина Н. В., Завойкина А. И., Трещеткина В. М. Каталог вспышечных ситуаций 1966—1974 гг. применительно к межпланетным и магнитосферным возмущениям. — М.: ИЗМИРАН, 1979.—63 с.
4. Иванов К. Г., Харшиладзе А. Ф. Серия солнечно-земных экстрабур мая—октября 2000 г. 1. Структура и динамика открытого магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрон.—2004.—44, № 1.—С. 3—8.
5. Иванов К. Г., Харшиладзе А. Ф. Серия солнечно-земных экстрабур мая—октября 2000 г. 2. Открытое магнитное поле и солнечные пятна // Геомагнетизм и аэрон.—2004.—44, № 2.—С. 147—154.
6. Сумарук П. В. Вариации секторной структуры межпланетного магнитного поля // Солнеч. данные.—1984.—№ 6.—С. 74—80.
7. Сумарук П. В., Левитин А. Е., Фельдштейн Я. И. и др. Вариации магнитного поля, продольных токов и электрических полей в период $B_z > 0$ компоненты ММП // Геофиз. журн.—1987.—9, № 1.—С. 11—20.
8. Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Индексы магнитной активности АЕ во время магнитной бури // Геофиз. журн.—1994.—16, № 4.—С. 51—53.
9. Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И. Изменчивость Z_{SE} составляющей ММП на границе секторной структуры // Астрон. вестник.—1973.—7.— С. 111—113.
10. Arnoldy R. L. Signature in the interplanetary medium for substorm // J. Geophys. Res.—1971.—76.—Р. 5189—5202.
11. Axford W. L., Hines C. O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys.—1961.—39.—Р. 1433—1443.
12. Bumba V., Obridko V. N. «Bartels» active longitudes, sector boundaries and flare activity // Solar Phys.—1969.—6, N 1.—Р. 104—110.
13. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99.—Р. 5771—5792.
14. Hirshberg J., Colburn D. S. Geomagnetic activity at sector boundary // EOS.—1973.—54.—Р. 425—430.
15. King J. R. Interplanetary Medium Data Book. — WDC-A, Rockets and Satellites.—1977.—385 p.
16. Ness N. F., Wilcox J. M. Extension of photospheric magnetic field into interplanetary space // Astrophys. J.—1966.—143, N 1.—Р. 23—35.
17. Rostoker G., Faethammar C. G. Relationship between changes in the IMF and variations in the magnetic field at

- the Earth surface // J. Geophys. Res.—1967.—72.—P. 5853—5863.
18. Smith E. J., Tsurutani B. T., Rosenberg R. L. Observations of the interplanetary sector structure up to heliographic latitude of 16°: Pioneer-11 // J. Geophys. Res.—1978.—83.—P. 717—724.
19. Sumaruk T., Sumaruk Yu. A new index of geomagnetic activity // Program and abstracts XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Belsk, Poland, June 19—24, 2006.—P. 58.
20. Svalgaard L. On the use of Godhavn H-component as an indicator of the interplanetary sector structure // J. Geophys. Res.—1975.—80, N 19.—P. 2717—2722.

**GEOMAGNETIC ACTIVITY AND DYNAMICS
OF SECTOR STRUCTURE OF THE INTERPLANETARY
MAGNETIC FIELD**

Yu. P. Sumaruk

It is shown that two-sector structure of the interplanetary magnetic field developed to multisector one with solar activity increasing. The dependence of geomagnetic activity on the sector structure change is revealed on the basis of middle latitude observatory data.

В. В. Яковлев, В. Д. Лишина

Харківська національна академія міського господарства

Актуальные вопросы использования воды в космических экспедициях средней продолжительности

Представлено 03.09.07

Запропоновано використання окремого питного водозабезпечення космічних місій середньої тривалості, оскільки до цього часу не вирішена проблема повноцінної регенерації питної води. Зазначено недоліки йодування і срібління — технологій знезаражування та тривалого зберігання води в системах водопостачання на космічних кораблях та запропоновано альтернативну технологію — за допомогою кременю. Обґрунтовано джерела екологічно чистої і фізіологічно повноцінної питної води у зв'язку з необхідністю забезпечення нею космічних місій. Поставлені питання щодо вивчення принципової придатності води з позаземних джерел і засобів її адаптації для питних цілей.

Человечество открывает новую страницу космической эры. Сразу несколько стран готовит программы экспансии ближних окрестностей Солнечной системы — Луны, Марса, астероидов и спутников планет-гигантов с участием людей. В ближайшие десятилетия предстоят экспедиции, продолжительность которых будет до 2-3 лет.

Одним из непростых вопросов жизнеобеспечения, которые необходимо решить, является обеспечение экипажей космических миссий водой. В случае непредвиденных обстоятельств космонавтам, находящимся на околоземной орбите или Луне, может быть оказана оперативная помощь вплоть до их возвращения на Землю. В случае же полетов к другим планетам на такую помочь рассчитывать нельзя. Поэтому надежность систем жизнеобеспечения должна быть значительно увеличена.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ ВОДОЙ В КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕДИЦИЯХ СРЕДНЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ

Бесспорно, что водообеспечение длительных космических экспедиций должно базироваться

на оборотных системах, в которых вода после использования полностью регенерируется. Это в первую очередь обусловлено тем, что в массе грузов, предназначенных для жизнеобеспечения, вода составляет основную долю.

Однако в настоящее время нет уверенности в том, что системы регенерации воды обеспечивают полноценное водоснабжение, особенно это касается обеспечения качества питьевой воды. В земных условиях практически ни одна крупная система питьевого водоснабжения не базируется на сточной воде, которая подвергается лишь интенсивной очистке. Вода в той или иной мере проходит реабилитацию на земных «биоплато» — отстойниках, биологических прудах, в проточных или непроточных водоемах. В противоположность этому дефицит пространства космических модулей для регенерации воды заставляет применять интенсивную технологию, основанную на обратном осмосе, устраниющем из воды практически все растворенные вещества. Реминерализация такой воды обязательна: до определенного уровня минерализации она агрессивна по отношению к организму и активно растворяет все, с чем соприкасается [4, 6, 7]. Интенсивное выделение металлов из материа-

лов, контактирующих с водой, и низкие защитные (антитоксические) свойства воды, бедной кальцием, приводят к поступлению токсичных металлов в питьевую воду, вызывая тем самым отравления.

Исследования, проводившиеся в разных странах, показали, что есть связь между возросшим числом различных заболеваний, а также возникновением водной интоксикации (гипонатриемического шока) и употреблением мягкой воды. Риск такой «интоксикации» возрастает с уменьшением минерализации воды [4].

Искусственно обессоленная вода обладает недостаточными вкусовыми качествами для утоления жажды, а при длительном употреблении (начиная от полугода) приводит к серьезным отклонениям здоровья, требующим гораздо большего времени на восстановление. Также следует учитывать, что большинство питательных веществ в организме поступает с продуктами питания, а приготовление пищи на слабоминерализованной воде может заметно снизить общее поступление некоторых элементов. Причем эта нехватка гораздо серьезнее, чем при использовании этой воды только в питьевых целях.

После оценки гигиенических, органолептических свойств и другой информации ученые ВОЗ дали рекомендации по составу деминерализованной воды:

1) минимальная минерализация 100 мг/л; содержание гидрокарбонат-ионов 30 мг/л; кальций 30 мг/л;

2) оптимальный сухой остаток (250—500 мг/л для хлоридно-сульфатных вод и 250—500 мл для гидрокарбонатных вод);

3) максимальный уровень щелочности (6.5 мэkv/l), натрий (200 мг/л), бор (0.5 мг/л) и бромид-ион (0.01 мг/л) [4, 8].

Если реминерализация обессоленной воды — обязательное условие, возникает логичный вопрос: есть ли методики обработки воды, способные восстанавливать содержание некоторых важных минеральных веществ? При всех наших познаниях о воде мы не владеем технологиями, аналогичными тем, которые обеспечивает земная природа. Можно сказать, что в плане приемлемости для организма искусственно насыщенная различными элементами и минералами, очищенная осмосом вода почти так же далека от природной, как и ненасыщенная.

Биофильные элементы, такие как кальций, магний, калий, фосфор, цинк, марганец, фтор, йод и др. извлекаются организмами из воды, и в дальнейшем требуется их восполнение в системах водоснабжения. Хотя исследования в этом направлении ведутся, биологическая роль многих других элементов в настоящее время еще не определена. Это подтверждается тем, что существующие стандарты воды [2, 3, 8] не регламентируют минимальные количества многих других микроэлементов.

В тоже время собственно питьевая вода как в обычных земных условиях, так и в космических экспедициях составляет не более 10 % от всего объема используемой воды, остальная идет на гигиенические, бытовые, технические и другие нужды.

Учитывая вышесказанное, до накопления опыта в практике полной регенерации воды, для космических экспедиций средней продолжительности (1—3 года) мы предлагаем применять такую систему водообеспечения, при которой питьевые нужды экипажа постоянно обеспечиваются новой водой, запасенной специально для этой цели. При этом количество воды на корабле не изменяется, никакие стоки не выбрасываются за борт, вода просто переходит из питьевого запаса в непитьевой, — т. е. поступает в систему регенерации, и дальше используется для непитьевых нужд. При этом системы регенерации должны быть рассчитаны на такое постоянное увеличение объема и соответствующее замедление водообмена. При наличии на космической станции оранжереи для выращивания свежих продуктов вышеуказанное добавление воды в водооборотную систему может использоваться на увеличение биомассы и изменение соотношения консервированных и свежих продуктов в пользу последних.

До настоящего времени на российских станциях «Мир» для обеззараживания и поддержания бактерицидности воды использовалось серебрение, на американских шаттлах и станции МКС — йодирование. Однако йод не является обычным компонентом природных вод, поэтому его избыточное содержание может иметь негативное влияние на организм человека. К тому же йод может реагировать с различными органическими компонентами, например с фенолом, и образовывать йодсодержащие органические вещества,

такие как тригалометаны и диметилфенолы [11].

Выраженный бактерицидный эффект серебрения, по данным ВОЗ, наблюдается при концентрациях ионов серебра выше 150 мкг/л. При концентрациях 50—100 мкг/л ионы серебра обладают бактериостатическим действием (т. е. способностью сдерживать рост и размножение бактерий). Однако величина 50 мкг/л согласно российскому СанПиНу 2.1.4.539-96 является предельной для содержания его в питьевой воде, и ее превышение может приводить к токсическому действию серебра. Налицо противоречие.

На космических станциях, где использовалось серебро как бактерицидная добавка, конденсат воды не имел в своем составе растворенного серебра, что свидетельствует об аккумуляции серебра организмом. При длительном накоплении серебра возможно проявление признаков аргироза — отравления серебром [1].

Следует отметить также, что ионы серебра убивают отнюдь не все бактерии. Целый ряд микроорганизмов, например, спорообразующие бактерии более устойчивы к их воздействию.

В качестве альтернативы серебру и йоду для обеззараживания и сохранения воды, а также для кондиционирования воздуха космических станций мы предлагаем использовать кремень — опалово-халцедоновое соединение с окаменевшей органикой. Кремень является биокатализатором, способным ускорять окислительно-восстановительные реакции. При соединении с водой он угнетает рост бактерий гниения и брожения, выводит в осадок болезнетворную микрофлору, которая погибла, и соединения растворенных в воде тяжелых металлов: цинка, свинца, кадмия, железа, ртути. Нейтрализует хлор, нитратные соединения и сорбирует радионуклиды (сотрудники Института радиоэкологических проблем НАН Белоруссии выявили повышение сорбции цезия-137 кремневой водой до 90—98 %).

Доказано, что кремневая вода препятствует накоплению стронция (в том числе и радиоактивного), а также и ускоряет его выведение из организма. Кремневая вода имеет выраженный радиозащитный эффект, который прямо зависит от времени ее использования [5].

Таким образом, задача предстоящих научных исследований — понять, чем отличается искус-

ственно подготовленная вода от воды, подготовленной природой. Если процессы так различаются физическими, химическими, биологическими параметрами, то они должны приводить к различным результатам. Поэтому необходимо начать исследования в актуальных для практики космических экспедиций направлениях:

- определение минимального объема биосферы для обеспечения полной регенерации воды в космических экспедициях;
- определение роли микроэлементов в формировании физиологической полноценности воды;
- обеспечение бактерицидности воды при ее длительном хранении;
- изменение качественных характеристик воды при ее извлечении из природной среды и последующем хранении.

источники запасания воды для космических экспедиций

Если мы пришли к тому, что питьевая вода должна запасаться как отдельный ресурс, то возникает следующий вопрос: из каких источников ее запасать? Очевидно, что запасаемая вода должна быть из природного экологически чистого источника. Тогда определимся с этим понятием. При строгом подходе экологически чистой может считаться та вода, которая не несет следов антропогенного воздействия. Такой может быть вода, полностью очищенная природой (после антропогенного ее загрязнения), или вода, никогда не подвергавшаяся антропогенному загрязнению. Очевидно, что вторая категория надежнее. Запасы реликтовых пресных вод (сформированные в доиндустриальную эпоху) сосредоточены в нижних слоях крупных ледников и глубоких частях некоторых артезианских бассейнов [10].

Однако питьевая вода должна быть не только экологически чистой, но и физиологически полноценной. В настоящее время физиологически полноценной принято называть воду, показатели которой определяют адекватность ее минерального состава биологическим потребностям организма. Они основаны на необходимости для ряда биогенных элементов учета не только мак-

симально допустимых, а и минимально необходимых уровней их содержания в воде [2].

Показателями, которыми в настоящее время количественно определяется физиологическая полноценность (ФП), являются граничные содержания в воде (минимальные и максимальные) суммы растворенных веществ, солей жесткости, фтора, магния и показатель щелочности. Есть тенденция к расширению перечня этих показателей. Например, медики предлагают обращать внимание на соотношение кальция и магния, минимальное содержание натрия, калия, цинка, меди, марганца, кобальта [4].

Экологически чистая вода может быть одновременно физиологически неполнценной. Например, лед обычно имеет недостаток солей, теряемых при замерзании воды, а реликтовая подземная вода в силу своей старости может содержать избыток некоторых элементов — фтора, натрия, хлора, брома, бора, лития и др.

Физиологическую полноценность вода приобретает в биосфере Земли — в зоне активного водообмена при контакте с минеральным веществом и биотой. Животные и человек в естественных природных условиях приспособлены к использованию воды, имеющей определенные органолептические свойства: это речная, дождевая, а также грунтовая: родниковая, колодезная. По большому счету ФП — это свойство земной воды. Многие органолептические показатели воды, определяющие ее ФП (температура, газовый и бактериальный состав, вязкость и др.), при изъятии из природного резервуара изменяются, и за сравнительно короткий срок вода, хранимая в искусственных резервуарах, перестает быть в полном смысле физиологически полноценной.

Тем не менее, вода, изначально физиологически полноценная, имеет большое преимущество перед любой другой в силу именно приспособленности к живым системам. Потому другим подходом к источнику запасания воды для космических экспедиций является использование физиологически полноценной воды из зоны активного водообмена в наименее загрязненных местах планеты (заповедники, незаселенные территории), последующее максимальное поддержание ФП воды при ее хранении и максимально возможное восстановление ФП перед употреблением.

Поскольку ФП воды связана с приспособлени-

ем живых организмов к ее свойствам, необходимо учитывать также и аспект привыкания к воде определенного состава. Питьевая вода в арктических и в пустынных зонах имеет различный состав и свойства, и в тоже время она может быть в обоих случаях физиологически полноценной. Процесс привыкания конкретных индивидов, животных и людей, к воде определенного состава и свойств до недавнего времени мог длиться всю их жизнь.

Медики до недавнего времени рекомендовали не менять свое место жительства после достижения возраста 30—35 лет, поскольку вода в новой местности другая, и в сложившемся организме могут произойти неблагоприятные перестройки, вызванные нарушением баланса веществ. Действительно, есть различия состава растворенных в воде веществ для различных ландшафтов и континентов Земли. Например, средние содержания основных ионов в речных водах различных континентов изменяются в 2—8 раз [9]. Медики еще не изучили последствий этих аспектов глобализации — изменения качественных показателей потребляемой людьми воды и пищевых продуктов, доставляемых потребителям со всего мира. Поэтому при запасании воды необходимо обеспечивать то разнообразие воды, которое определяется участниками международных составов экспедиций.

Таким образом, актуальным является определение конкретных надежных источников экологически чистых и физиологически полноценных вод с целью запасания для космических экспедиций с учетом обеспечения необходимого разнообразия их составов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДЫ ВНЕЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕДИЦИЙ

Источниками внеземной воды могут быть марсианский лед, кометы, лед, возможно находящийся на южном полюсе Луны, спутник Юпитера Европа, другие спутники планет-гигантов и многочисленные объекты пояса Койпера.

Пригодна ли внеземная вода для питьевых и гигиенических целей при первом контакте с организмом — это вопрос, на который положительного ответа пока нет. Мы считаем, что

определения свойств внеземной воды по перечню показателей, которыми мы пользуемся в земной практике, недостаточно. Кроме показателей химической токсичности, радиоактивных свойств, бактерицидности и общих органолептических свойств, обязательным должно быть проведено биотестирование.

Весьма вероятно, что биотестирование покажет отрицательный результат — трудно ожидать, что вода, миллионы лет не контактировавшая с биотой, окажется для нее благоприятной средой. В этом случае биологический метод также наиболее пригоден для «приспособления» внеземной воды — адаптации для использования в системах водообеспечения. В этой связи актуальны:

— применение биотестирования для определения пригодности воды внеземного происхождения для использования ее человеком;

— разработка «биологического реактора» для адаптации внеземной воды с целью ее использования для питьевых и гигиенических нужд. Принцип работы такого реактора заключается в ступенчатом приспособлении воды к микроорганизмам и биологическим системам вообще путем достижения равновесия между организмами и водой с депонированием неблагоприятных компонентов в отмершей биоте. Перед подачей в систему водообеспечения производится обычная (в земном понимании) водоподготовка с доведением до требуемых кондиций по бактериальным, органолептическим и, при необходимости, иным показателям.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Поскольку человек еще не готов обеспечить качество и надежность систем водообеспечения в космических полетах средней продолжительности необходимо при их осуществлении предусматривать отдельное питьевое водообеспечение.

- Источником для запасания воды в космические экспедиции должны быть сформированные в доиндустриальную эпоху реликтовые пресные воды ледников и глубоких горизонтов артезианских бассейнов.

- Вода внеземного происхождения требует предварительной оценки с точки зрения ее пригодности и адаптации к нуждам человека с помощью биологических систем.

- Большая Медицинская Энциклопедия.—23.—С. 190—192; 2.—С. 142—143, 523—525; 18.—С. 106.
- Державні санітарні правила і норми «Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання». — Київ, № 383 від 23.12.96.
- Европейская Директива 98/83/EC от 3 ноября 1998 по качеству питьевой воды, предназначенной для употребления человеком // Журн. Европейского Сообщества.—1998.—L330.—С. 32—54.
- Колізек Ф. Последствия для здоровья, возникающие при употреблении деминерализованной питьевой воды // Нутриенты в питьевой воде — Вода, санитария, охрана здоровья и окружающей среды: Сб. науч. тр. — Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2004.—С. 6—28.
- Малярчиков А. Д. Кремень и человечество, или Кремень вновь обретает славу. — М.: АНК «ИТМО» им. А. В. Лыкова, 1998.—352 с.
- Плитман С. И., Новиков Ю. В., Тулакина Н. В. и др. К вопросу коррекции стандартов по деминерализованной воде с учетом жесткости питьевой воды // Гигиена и санитария.—1989.—С. 7—10.
- Рахманин Ю. А., Михайлова Р. И., Филлипова А. В. и др. Некоторые аспекты биологического влияния дистиллированной воды // Гигиена и санитария.—1989.—С. 92—93.
- Руководство по обеспечению качества питьевой воды. Третье издание. — Женева: ВОЗ, 2006.—Том 1: Рекомендации.—121 с.
- Сытник К. М., Брайон А. В., Гордецкий А. В. Биосфера. Екология. Охрана природы: Справочное пособие. — Киев: Наук. думка, 1987.—206 с.
- Яковлев В. В. О реликтовых пресных водах // Вісник Харків. нац. ун-та. Геологія-географія-екологія.—2003.—№ 610.—С. 12—15.
- Methods for Developing Spacecraft Water Exposure Guidelines. — Washington: National Academy Press, 2000.—174 p.

TOPICAL ISSUES OF THE USE OF WATER IN SPACE FLIGHTS OF MODERATE DURATION

V. V. Yakovlev, V. D. Lishchyna

We propose to use the separate potable water provision of space flights of moderate duration, as the problem of sufficient regeneration of potable water has not been resolved up to the present. We point to some shortcomings of iodation and silvering for disinfection and long-term storage of water in water supply systems aboard spacecrafts and propose an alternative technology with the use of flint. The sources of ecologically clean and physiologically complete potable water are substantiated in relation to the needs of water supply during space flights. We raise some problems concerning the examination of the acceptability of the water in out-of-Earth sources and some means to adapt it to drinking.

НАШІ АВТОРИ

АНФІМОВ Микола Аполлонович — генеральний директор Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Росавіакосмосу (м. Корольов, Росія), академік РАН.

Напрям науки — теплофізика і масоперенесення, системні дослідження в галузі РКТ.

ВАЩЕНКО Володимир Миколайович — заступник директора з наукової роботи Національного Антарктичного наукового центру Міністерства освіти і науки України, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — астрофізика, геофізика.

ВІДЬМАЧЕНКО Анатолій Петрович — завідувач відділу фізики тіл Сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, професор, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика тіл Сонячної системи, екзопланети, фотоспектрополяриметрія небесних тіл, приладобудування.

ВОЛОВИК Дмитро Володимирович — провідний інженер відділу експериментальної астрофізики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — розробка електронної і мікро-процесорної апаратури, програмування.

ВОЛОШИН В'ячеслав Іванович — директор Державного підприємства «Дніпрокосмос», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — системи дистанційного зондування Землі та методики обробки космічної інформації; безпека життєдіяльності і екологічний моніторинг.

ГОЛУБНИЧИЙ Петро Іванович — завідувач кафедри фізики Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, доктор фізико-математичних наук, професор, засłużений діяч науки і техніки України.

Напрям науки — фізика ядра і елементарних частинок, космофізика, фізика енергій високої густини.

ІВАНОВ Юрій Стратонович — науковий співробітник лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — приладобудування, розрахунок оптичних схем різної складності.

КАПУСТИН Євген Іванович — перший заступник директора Державного підприємства «Дніпрокосмос».

Напрям науки — дистанційне зондування Землі та систематизація космічної інформації.

КИСЛОВ Олександр Матвійович — начальник сектору Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — математичне моделювання фізичних процесів і технічних систем, теплофізика.

КЛИМЕНКО Юрій Олександрович — старший науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика твердого стану, теоретична фізика.

КОЗАК Людмила Володимирівна — асистент кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика атмосфери Землі та навколоzemного космічного простору.

КОЗЛОВА Анна Олексandrівна — аспірантка Наукового центру аерокосмічних дослідень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України.

Напрям науки — дослідження біологічного різноманіття з використанням аерокосмічної інформації і геоінформаційних технологій.

КРИВОНОСОВ Сергій Дмитрович — декан факультету природничих наук Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, кандидат технічних наук, доцент.
Напрям науки — фізика ядра, нетрадиційна енергетика.

КУЗЬКОВ Володимир Павлович — старший науковий співробітник лабораторії атмосферної оптики відділу експериментальної астрофізики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — дослідження в інфрачервоному діапазоні хвиль, наземно-космічні системи лазерного зв'язку, вплив атмосфери на розповсюдження лазерного випромінювання.

КУЗЬКОВ Сергій Володимирович — інженер Лабораторії атмосферної оптики відділу експериментальної астрофізики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — моделювання систем наведення і супроводження космічних об'єктів; наземно-космічні системи лазерного зв'язку.

ЛЕВЕНКО Олександр Сергійович — провідний інженер Державного підприємства «Дніпрокосмос», член Спілки журналістів України.

Напрям науки — безпека життєдіяльності регіонів і сталій розвиток суспільства, моніторинг природно-техногенних процесів аерокосмічними засобами, вітроенергетика, аналіз ракетно-космічної діяльності, проектування і технології виробництва ракетної техніки.

ЛЕВІН Аркадій Якович — головний конструктор проекту відділу Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Напрям науки — кріогенна та космічна техніка.

ЛІЩИНА Вікторія Дмитрівна — аспірант Харківської національної академії міського господарства, інженер-еколог геологічної компанії «Шерл».

Напрям науки — екологія підземних вод.

ЛУК'ЯЩЕНКО Василь Іванович — заступник генерального директора центрального науково-дослідного інституту машинобудування Росавіакосмосу (м. Корольов, Росія), доктор технічних наук.

Напрям науки — системні дослідження в галузі РКТ, розробка програм досліджень.

ЛЯЛЬКО Вадим Іванович — директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, член-кореспондент НАН України, доктор геолого-мінералогічних наук, професор, Лауреат премії імені В. І. Вернадського, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — гідрогеологія, дистанційне зондування земної поверхні.

МОРОЖЕНКО Олександр Васильович — головний науковий співробітник відділу фізики тіл Сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, професор, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика тіл Сонячної системи, фотоспектрополяриметрія небесних тіл, приладобудування, оптика атмосфери Землі.

ОЛЬШАНСЬКИЙ Валерій Михайлович — начальник відділу Роскосмосу, Москва, Росія.

ПАВЛОВИЧ Володимир Миколайович — завідувач відділу теорії ядерних реакторів Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Напрям науки — фізика ядра і елементарних частинок, фізика ядерних реакторів, комп'ютерне моделювання фізичних процесів.

ПОПОВ Михайло Олексійович — заступник директора Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України з наукової роботи, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України.

Напрям науки — дистанційне зондування земної поверхні, автоматичне інтерпретування даних дистанційного зондування.

ПОХИЛ Юрій Онисимович — виконувач обов'язків директора Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, іноземний професор Харбінського політехнічного університету, почесний працівник космічної галузі України, кандидат фізиго-математичних наук.

Напрям науки — кріогенно-вакуумне і космічне матеріалознавство, наземна імітація факторів космічного простору, бортове дослідницьке устаткування.

ПУХА Сергій Петрович — керівник відділу СКБ «Штурм» НТУУ КПІ.

Напрям науки — розробка електронної апаратури системи наведення та супроводження.

ПРУЦКОЮЛІЯ В'ячеславівна — провідний інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — телекомуникації.

РОМАНЕНКО Володимир Григорович — провідний математик Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з кріогенної техніки Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, кандидат технічних наук.

Напрям науки — математичне моделювання фізичних процесів і технічних систем, теплофізики.

РУСОВ Віталій Данилович — завідувач кафедри теоретичної і експериментальної ядерної фізики Одеського національного політехнічного університету, доктор фізиго-математичних наук, професор, заслужений робітник освіти України, нагороджений медаллю «10 років антарктичної станції «Академік Вернадський» та знаком Софії Русової.

Напрям науки — стохастична ядерна динаміка, фізика елементарних частинок і високих енергій, астрофізика, космічні промені та глобальний клімат, проблема малих доз радіації у клітинах еукаріот.

САЛИВОНОВ А. І. — Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

САХАЦЬКИЙ Олексій Ілліч — провідний науковий співробітник відділу енергомасообміну в геосистемах Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат геолого-мінералогічних наук, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — енергомасообмін в геосистемах.

СЕМЕНІВ Олег Володимирович — молодший науковий співробітник Інституту космічних досліджень Національної академії наук та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — системний аналіз, математичне моделювання, оптимізація, нанотехнології.

СИНЯВСЬКИЙ Іван Іванович — молодший науковий співробітник лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрям науки — приладобудування, розрахунок оптичних схем різної складності, оптика атмосфери Землі.

СОДНИК Зоран — Ph. D. Старший оптик-дослідник Європейського наукового і технологічного центру (ESTEC) Європейського космічного агентства (ESA).

Напрям науки — наземно-космічні системи лазерного зв'язку.

СОСОНКІН Михайло Григорович — завідувач лабораторії атмосферної оптики Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук.

Напрям науки — приладобудування, оптика атмосфери Землі.

СТАНКЕВИЧ Сергій Арсенійович — провідний науковий співробітник Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, кандидат технічних наук, доцент.

Напрям науки — оцінка інформативності оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі, цифрова обробка та інтерпретація матеріалів аерокосмічного моніторингу.

СТЕФАНИШИН Ярослав Іванович — заступник начальника відділу стратегічного планування Національного космічного агентства України.

Напрям науки — дистанційні аерокосмічні дослідження, радіочастотна радіометрія.

СУВОРОВ Вадим Валентинович — заступник начальника Науково-технічного центру Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія).

Напрям науки — розробка програм досліджень, системне проектування пілотованих космічних польотів.

СУМАРУК Юрій Петрович — старший науковий співробітник Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України (Київ), кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — дослідження джерел геомагнітних варіацій.

ФІЛОНЕНКО Анатолій Дмитрович — професор кафедри фізики Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, доктор фізико-математичних наук.

Напрям науки — фізика ядра і елементарних частинок, космофізика.

ФОМІН Сергій Петрович — старший науковий співробітник Інституту теоретичної фізики ім. А. І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», кандидат фізико-математичних наук.

Напрям науки — квантова електродинаміка, взаємодія частинок високих енергій з речовиною, фізика ядерного реактора.

ЦИМБАЛЮК Михайло Михайлович — начальник лабораторії Центрального науково-дослідного інституту машинобудування Федерального космічного агентства (м. Корольов, Росія), кандидат технічних наук.

Напрям науки — машинобудування.

ШАТОХІНА Юлія В'ячеславівна — провідний інженер Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України.

Напрям науки — біофізика, математичне моделювання, нанотехнології, квантові комп'ютери.

ШУЛЬГА Микола Федорович — директор Інституту теоретичної фізики ім. А. І. Ахієзера, заступник генерального директора Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України, лауреат премії ім. А. С. Давидова Національної академії наук України та Державної премії України в галузі науки і техніки.

Напрям науки — квантова електродинаміка, взаємодія частинок високих енергій з речовиною, нелінійні системи і динамічний хаос.

ЯКОВЛЄВ Валерій Володимирович — головний гідрогеолог геологічної компанії «Шерл», кандидат технічних наук, доцент.

Напрям науки — екологія підземних вод.

ЯЦЕНКО Віталій Олексійович — провідний науковий співробітник відділу космічної плазми Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, член Вченої Ради наукового фонду вчених та спеціалістів з молекулярної кібернетики та інформатики та член Вченої Ради з присудження наукових ступенів, доктор технічних наук.

Напрям науки — системний аналіз та теорія оптимальних рішень, космічна сенсорика.

ЯЦКІВ Ярослав Степанович — директор Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, завідувач відділу космічної геодинаміки, академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, засłużений діяч науки і техніки України, лауреат Державних премій СРСР та України.

Напрям науки — космічна геодинаміка та позатмосферна астрономія.