

КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 18
4 + 2012

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ ЗА РІК + КИЇВ

ЗМІСТ

Яцків Я. С., Мищенко М. І., Розенбуш В. К., Шаховскої Д. Н., Синявський І. І., Миліневський Г. П., Киселев Н. Н., Іванов Ю. С., Петухов В. Н., Данилевський В. А., Бовчалюк А. П. Проект «Аерозоль-УА»: дистанційне зондування аерозолів в земній атмосфері со спутника

Макаров А. Л. О спутникової зйомки протяжених територій складної конфігурації

Білокриницька Л. М., Крученицький Г. М., Міщишина І. Г. База даних коефіцієнтів аерозольного послаблення на чотирьох довжинах хвиль за спостереженнями SAGE II

Крючков Е. І., Федоренко А. К., Черемных О. К. Влияние неоднородного состава верхней атмосферы на распространение акустико-гравитационных волн

Донец В. В., Цымбал А. Ю., Бровченко В. В. Моноблочные конструкции бортовых и полевых гиперспектрометров

Жолобак Г. М., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М., Дугін С. С. Дослідження вегетаційних індексів червоного краю спектрів відбиття посівів озимої пшениці, вирощеної у польових умовах степової зони України

CONTENTS

3 *Yatskiv Ya. S., Mishchenko M. I., Rosenbush V. K., Shakhovskoy D. N., Sinyavsky I. I., Milinevsky G. P., Kiselev N. N., Ivanov Yu. S., Petukhov V. N., Danylevsky V. O., Bovchalyuk A. P.* Satellite project «Aerosol-UA»: Remote sensing of aerosols in the Earth's atmosphere

16 *Makarov A. L.* On satellite imaging of lengthy territories with complex configuration

20 *Belokrinitskaya L. M., Kruchenitsky G. M., Mischishina I. I.* The database of aerosol extinction coefficients from measurements by SAGE II mission instruments at four wavelengths

30 *Kryuchkov Ye. I., Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K.* Influence of the upper atmosphere inhomogeneity on acoustic gravity wave propagation

37 *Donets V. V., Tsybal A. Yu., Brovchenko V. V.* Monoblock constructions of on-board and field hyperspectrometers

45 *Zholobak G. M., Shportiuk Z. M., Sibirtseva O. N., Dugin S. S.* Study of vegetation red edge indices of reflectance spectra for crops of winter wheat cultivated in the steppe zone of Ukraine

- Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Халалей М. И., Чернозуб В. М.* Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства **52** *Shulga O. V., Kozoryev Y. S., Sybiryakova Y. S., Khalaley M. I., Chernozub V. M.* The mobile telescope complex of RI MAO for observation of near-Earth space objects
- Хода О. А.* Обработка эталонной тестовой кампании EPN в центре анализа ГНСС-данных ГАО НАН Украины **59** *Khoda O. A.* The processing of EPN benchmark test campaign at the GNSS data analysis centre of the Main Astronomical Observatory
- Ищенко М. В.* Оценка качества репроцессинга GPS-наблюдений на перманентных станциях региональной сети для GPS-недель 1236—1399 **66** *Ischenko M. V.* Quality estimation of reprocessing of GPS observations at the permanent stations of regional network for GPS weeks 1236—1399

НАШИ АВТОРИ

74 OUR AUTHORS

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

Підписано до друку 24.07.12. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.
Ум. друк. арк. 8,4. Обл.-вид. арк. 8,82. Тираж 100 прим. Зам. № 3347.

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України,
01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

УДК 520.85:528.835

Я. С. Яцків¹, М. І. Мищенко², В. К. Розенбуш¹, Д. Н. Шаховской³, І. І. Синявський¹, Г. П. Милиневський⁴,
Н. Н. Киселев¹, Ю. С. Іванов¹, В. Н. Петухов¹, В. А. Данилевський⁴, А. П. Бовчалюк⁴

¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

² Годдардівський інститут космічних досліджень НАСА, Нью-Йорк, США

³ Науково-дослідний інститут «Кримська астрофізична обсерваторія», Научний, Крим

⁴ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ПРОЕКТ «АЭРОЗОЛЬ-UA»: ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ СО СПУТНИКА

Відомо, що атмосферні аерозолі мають значний вплив на клімат і довкілля. Проте надійних кількісних оцінок цього впливу, особливо внеску антропогенних аерозолів, немає, що утруднює вивчення змін клімату Землі і прийняття науково обґрунтованих соціальних та економічних програм розвитку багатьох країн світу. Описано перспективний космічний проект «Аерозоль-UA», основними науковими і соціально-економічними завданнями якого є: 1) моніторинг просторового розподілу основних характеристик тропосферних і стратосферних аерозолів в атмосфері Землі; 2) створення бази спостережних даних для отримання більш точних кількісних оцінок внеску аерозолів в енергетичний баланс кліматичної системи; 3) визначення впливу антропогенних аерозолів на кліматичні та екологічні процеси. Детально проаналізовано і обґрунтовано концепцію дистанційного зондування аерозолів з супутника за допомогою високоточних вимірювань інтенсивності та поляризації сонячного світла, розсіяного атмосферою і поверхнею. Показано, що Україна має в розпорядженні необхідні інтелектуальні ресурси і виробничий потенціал для проектування, виготовлення і запуску на орбіту спеціалізованого супутника, оснащеного багатofункціональним прецизійним поляриметром, і може зробити істотний внесок у вивчення природних і антропогенних аерозолів і їхнього впливу на клімат і екологію.

ВВЕДЕНИЕ

Аэрозолями называют микроскопические частицы естественного и искусственного происхождения, взвешенные в атмосфере Земли (рис. 1, а, б). Аэрозольными частицами могут быть как сферические капельки водных растворов солей и кислот, так и морфологически сложные частицы пыли, сажи, морской соли или льда (рис. 1, в–е). Часто встречаются и частицы биологического происхождения. Наибольшее влияние на окружающую среду и климат имеют тропосферные аэрозоли, в том числе находящиеся в приземном слое атмосферы. Вместе с тем увеличение концентрации стратосферных аэрозолей вследствие вулканических извержений может резко усилить

их влияние на климат [37]. Например, есть предположение, что сильное и во многом катастрофическое похолодание 1600—1700-х гг., названное малым ледниковым периодом, было вызвано высокой концентрацией стратосферных аэрозолей, обусловленной несколькими последовательными вулканическими извержениями.

Влияние тропосферного аэрозоля на степень загрязнения окружающей среды хорошо изучено [70]. Рассеивая и поглощая как солнечное излучение, так и инфракрасное излучение, испускаемое земной поверхностью, аэрозольные частицы оказывают *прямое энергетическое влияние на климат* [11, 36, 38]. Они также могут служить ядрами конденсации для облачных частиц и частиц осадков. Кроме того, поглощая солнечное излучение, частицы сажи и пыли могут вызывать нагрев облаков и влиять на продолжительность их жизни [2, 25]. Поэтому изменения в количестве, распределении и микрофизических

© Я. С. ЯЦКІВ, М. І. МИЩЕНКО, В. К. РОЗЕНБУШ,
Д. Н. ШАХОВСКОЙ, І. І. СИНЯВСЬКИЙ, Г. П. МИЛИНЕВСЬКИЙ,
Н. Н. КИСЕЛЕВ, Ю. С. ІВАНОВ, В. Н. ПЕТУХОВ,
В. А. ДАНИЛЕВСЬКИЙ, А. П. БОВЧАЛЮК, 2012

свойствах тропосферного аэрозоля могут приводить к существенным изменениям в облачности и осадках и сопутствующим изменениям энергетического баланса атмосферы [11, 36]. Это явление получило название *косвенного (или непрямого) климатического эффекта аэрозолей*.

В настоящее время точность количественных оценок прямого и косвенного аэрозольных эффектов остается совершенно неудовлетворительной. По общепринятому мнению эти эффекты сопоставимы с эффектом парниковых газов, таких как углекислый газ и метан [71]. Однако неопределенность количественных оценок аэрозольных эффектов и их антропогенного компонента, сравнимая с их величиной, не позволяет сделать окончательные выводы по этой проблеме [24, 39, 67, 69].

Очевидно, что незнание конкретных источников сильных аэрозольных эффектов является недопустимым на современном этапе развития науки о Земле, поскольку точная информация о влиянии аэрозолей крайне необходима для оценки возможных климатических изменений в будущем [24]. Согласно работам [4, 31, 39, 41, 59, 63] неопределенность оценки влияния аэрозольных эффектов настолько велика, что делает невозможным сравнение результатов климатических моделей с наблюдаемыми изменениями температуры приземного слоя атмосферы, установление причин вариаций климата и предсказание будущих климатических изменений.

Для получения надежных оценок таких вариаций необходимо устранить существенные пробелы в нашем понимании физики и химии аэрозолей и их влияния на климат [11, 36, 67]. Решению этой ключевой задачи в США была посвящена орбитальная миссия «Gloag», в состав которой входил уникальный поляриметр Aerosol Polarimetry Sensor (APS) [52]. Этот инструмент был специально спроектирован для высокоточных измерений интенсивности и поляризации солнечного излучения, рассеянного атмосферой и поверхностью Земли. Ожидалось, что детальные фотополяриметрические измерения в широком спектральном диапазоне и в широком диапазоне углов рассеяния позволят определить все необходимые параметры аэрозольных час-

тиц с заданной точностью и оценить их влияние на климат планеты.

Неудача с запуском миссии «Gloag» в марте 2011 г. поставила под угрозу решение этой задачи, поскольку возможность повторного запуска инструмента APS в США остается неопределенной [9]. С другой стороны, исключительная сложность задачи количественного анализа влияния аэрозолей на климат и окружающую среду и ее глобальный характер обуславливают необходимость комплексного подхода к ее решению с привлечением всех возможных интеллектуальных и технических ресурсов многих стран мира.

В этой ситуации Украина имеет уникальную возможность внести свой вклад в решение проблемы атмосферных аэрозолей. Действительно, в значительной степени благодаря многолетним исследованиям украинских ученых [32] поляриметрия стала одним из самых точных и информативных методов дистанционного зондирования [49–50, 76]. Подтверждением этого является то, что группе украинских специалистов в области спутниковой и астрофизической поляриметрии была присвоена Государственная премия Украины в области науки и техники за 2010 г., а их основополагающая монография [57] была удостоена премии Международной академии астронавтики. Кроме того, Украина обладает необходимыми интеллектуальными ресурсами и производственными мощностями для ускоренного проектирования, изготовления и запуска на околоземную орбиту многофункционального поляриметра с техническими параметрами, мало уступающими характеристикам американского поляриметра APS, а в некотором отношении их превосходящими. Успешное осуществление проектов дистанционного зондирования Земли (в частности «Січ-1», «Січ-1М» и «Січ-2») показало возможность создания в Украине космических комплексов, включающих в себя надежные орбитальные платформы, оптико-электронные системы, сопоставимые по сложности с инструментом APS, наземные средства связи и управления.

Целью настоящей статьи является формулировка научных и socioэкономических задач перспективного космического проекта «Аэро-

золь-UA» и обсуждение оптимального его технического решения, предназначенного для глобального измерения основных характеристик тропосферных и стратосферных аэрозолей. В качестве первого шага в этом направлении по инициативе Научного совета Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям проводится детальный научный и технический анализ возможностей осуществления такого проекта. Ниже мы приводим некоторые данные этого анализа.

НАУЧНЫЕ И СОЦИОЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЦЕЛИ ПРОЕКТА «АЭРОЗОЛЬ-UA»

Детальное описание физических и химических процессов, определяющих климат на Земле, понимание причин климатических изменений в прошлом и предсказание будущего состояния климата возможны только в рамках достаточно полных и точных количественных моделей климатической системы. В настоящее время такие модели климата являются несовершенными и нуждаются в дальнейшем количественном уточнении. Это позволило бы [64, 65, 75]:

- оценить точность современных моделей и их способность «воспроизвести» изменения климата в современную эпоху;
- внести необходимые коррективы в модели;
- улучшить модельную параметризацию компонентов климатической системы и основных физических и химических процессов;
- выявить неучтенные эффекты и интегрировать их в модели;
- количественно оценить возможное влияние человеческой деятельности на изменения климата.

Важность последнего пункта невозможно переоценить, поскольку он в значительной мере определяет социоэкономическую значимость научных исследований климата и окружающей среды и их вклад в обоснование социальных и экономических программ развития земной цивилизации.

В силу вышесказанного *главной научной целью миссии «Аэрозоль-UA» является создание базы точных наблюдательных данных о глобальном распределении основных микро- и макрофизических*

свойств аэрозолей. Основные требования к этой базе данных обусловлены необходимостью:

- радикального улучшения модельной параметризации аэрозолей, их источников, механизмов переноса и процессов взаимодействия с другими компонентами атмосферы [6, 43, 66];
- получения надежных количественных оценок прямого и косвенного аэрозольных эффектов;
- количественного описания антропогенных аэрозолей и их влияния на климат и окружающую среду.

Ввиду глобального характера аэрозольных эффектов и глобальной взаимозависимости процессов, определяющих распределение аэрозольных и облачных частиц, такая база данных может быть создана только в результате непрерывного дистанционного зондирования аэрозолей и облаков со спутника на протяжении достаточно длительного промежутка времени. Ввиду исключительной мобильности аэрозольных частиц наблюдения только над одним регионом (например, над территорией Украины) не позволили бы выявить климатическое и экологическое влияние аэрозолей, привнесенных из других регионов, и надежно разделить местные и удаленные источники антропогенных аэрозолей.

Безусловно, создание требуемой наблюдательной базы аэрозольных данных является сложной задачей. Основное препятствие — это чрезвычайная сложность, разнообразие и изменчивость ситуаций, попадающих в поле зрения орбитального инструмента (рис. 2, а). Как правило, свет, попадающий в приемник излучения, рассеивается вертикально- и горизонтально-неоднородной атмосферой и горизонтально неоднородной поверхностью. Атмосфера может состоять из нескольких слоев, образованных смесью воздуха и частиц различных типов. В отличие от облаков, химический состав аэрозолей и аэрозольных смесей может изменяться в широких пределах (рис. 2, б). Разнообразие типов земной поверхности не поддается простой классификации, а поверхность океана может сильно изменяться с изменением скорости и направления ветра. При этом все многочисленные модельные параметры, описывающие исключительно сложную

систему атмосфера — поверхность, должны определяться одновременно путем анализа измененных параметров рассеянного света.

В качестве примера на рис. 3 показан временной ряд оптической толщины аэрозолей, полученный в рамках программы NASA «Global Aerosol Climatology Project» (GACP) [53, 55] по данным орбитального инструмента Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). Отдельно приведены глобальное месячное среднее значение и месячные средние величины оптической толщины аэрозолей в атмосфере Южного и Северного полушарий. Во всех случаях хорошо видны последствия выброса огромных количеств вулканического аэрозоля в стратосферу в результате извержений вулканов El Chichon (март 1982 г.) и Mt Pinatubo (июнь 1991 г.). Кроме того, результаты программы GACP свидетельствуют о существенном уменьшении оптической толщины тропосферного аэрозоля за период с конца 1980-х до начала 2000-х годов. Эта тенденция согласуется с результатами наземных наблюдений, указывающих на переход от так называемого глобального «потемнения» к глобальному «посветлению» в конце 1980-х и начале 1990-х гг. [79]. Вместе с тем данные рис. 3 поставили целый ряд фундаментальных вопросов, на которые еще не найдены ответы.

Во-первых, не известна точность определения оптической толщины по данным AVHRR, в результате чего можно усомниться в самом наличии долговременного спада оптической толщины аэрозоля, якобы внесшего вклад в переход от глобального «потемнения» к глобальному «посветлению».

Во-вторых, если этот спад реален, то он должен был внести существенный вклад в глобальное потепление, наблюдающееся на протяжении последних десятилетий [23]. Поэтому было бы исключительно важно знать поведение именно антропогенных аэрозолей с начала 1980-х годов. Эту информацию пока что невозможно получить.

В-третьих, недавно было установлено, что спад оптической толщины аэрозолей, показанный на рис. 3, может быть артефактом из-за неучтенного изменения химического состава

аэрозолей и их поглощающей способности [56]. Опять-таки, надежной глобальной информации о химическом составе и альbedo однократного рассеяния аэрозолей нет.

В-четвертых, периоды, следующие за мощными вулканическими извержениями, особенно интересны с точки зрения тестирования моделей климата, поскольку они характеризуются резкими изменениями состава атмосферы и сопутствующими климатическими изменениями [37]. К сожалению, ни один из современных орбитальных инструментов не в состоянии определить одновременно основные параметры как тропосферных, так и стратосферных аэрозолей.

Из вышесказанного следует, что адекватный подход к проблеме дистанционного зондирования аэрозолей и их климатических и экологических эффектов должен включать ответы на следующие вопросы:

1) какие количественные характеристики аэрозольных и облачных частиц необходимо определить из спутниковых наблюдений и какова должна быть точность этого определения?

2) какие конкретные оптические измерения необходимо выполнить для решения задачи 1?

3) какая конструкция инструмента позволит решить задачу 2?

4) какие теоретические и модельные средства необходимы для адекватного решения обратной задачи и извлечения необходимой информации из конкретных оптических измерений?

Ниже мы последовательно проанализируем возможные ответы на эти четыре вопроса в рамках проекта «Аэрозоль-UA».

Следует отметить, что есть два класса спутниковых инструментов для дистанционного зондирования аэрозолей и облаков. Пассивные инструменты используются для измерения характеристик отраженного солнечного излучения или испущенного земной поверхностью теплового излучения. Активные инструменты включают в себя достаточно мощные искусственные источники излучения, такие как лазеры и радиоизлучатели [72, 80]. Поскольку результаты пассивных и активных измерений дополняют друг друга в смысле информационного содержания, можно ожидать, что со временем орбитальные

миссии будут включать инструменты обоих типов. Последующее обсуждение будет относиться только к пассивным средствам дистанционного зондирования.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЭРОЗОЛЕЙ И ОБЛАКОВ

Левая часть табл. 1 суммирует общие научные задачи проекта «Аэрозоль-УА». Правая часть перечисляет минимальный набор характеристик аэрозоля и облаков, знание которых необходимо для получения надежных количественных оценок глобального распределения аэрозолей и их климатических эффектов [51].

Требуемый набор характеристик аэрозоля включает полную оптическую толщину, средние по вертикали значения эффективного радиуса и эффективной дисперсии распределения частиц по размерам, показатель преломления, форму частиц и альbedo однократного рассеяния. Поскольку аэрозольная составляющая атмосферы часто является бимодальной [19, 42], то все эти характеристики необходимо определить для каждого компонента (моды). Показатель преломления должен быть определен на нескольких длинах волн в широком спектральном диапазоне от близкого ультрафиолета до коротковолновой инфракрасной области, поскольку только так можно оценить из космоса химический состав аэрозолей. Составной частью любого анализа

данных должно быть обнаружение несферических аэрозолей, таких как пылевые частицы и частицы морской соли и сажи, поскольку неучет сложной морфологии частиц может существенным образом повлиять на оценку других характеристик аэрозоля [20, 48].

Необходимый набор характеристик облаков включает полную оптическую толщину, агрегатное состояние облачных частиц, а также усредненное по высоте распределение по размерам частиц и оценку их формы [5, 7].

Требуемые точности в оценке различных характеристик аэрозоля и облаков, указанные в правой части табл. 1 [22, 51], диктуются необходимостью:

- обнаружить и количественно описать изменения в аэрозольных климатических и экологических эффектах, считающиеся вероятными на протяжении последующих 20 лет;
- количественно определить влияние естественных и антропогенных аэрозолей на энергетический бюджет климатической системы.

Например, по имеющимся модельным [58, 62] и наблюдательным [55] (рис. 3) оценкам изменение аэрозольной оптической толщины за 20 лет может составить 0.04, тогда как глобальное изменение оптической толщины, необходимое для изменения полного потока электромагнитной энергии у земной поверхности на 0.25 Вт/м^2 , составляет 0.01. Эти оценки и диктуют требуемую

Таблица 1. Конкретные требования к «пассивным» дистанционным измерениям аэрозолей и облаков, вытекающие из общих научных задач

Научные задачи	Требования к пассивным дистанционным измерениям
<ol style="list-style-type: none"> 1. Глобальное распределение свойств аэрозольных и облачных частиц 2. Прямой эффект аэрозолей на энергетический баланс климатической системы 3. Эффект аэрозолей на облака и осадки 4. Влияние аэрозолей на экологию 	<p style="text-align: center;">ПАРАМЕТРЫ АЭРОЗОЛЕЙ (для двух компонентов)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Спектральная оптическая толщина (± 0.03 или $\pm 10 \%$) • Эффективный радиус ($\pm 10 \%$) • Эффективная дисперсия ($\pm 40 \%$) • Спектральный ход показателя преломления аэрозолей (± 0.02) • Форма частиц • Спектральный ход альbedo однократного рассеяния (± 0.03) <p style="text-align: center;">ПАРАМЕТРЫ ОБЛАКОВ</p> <ul style="list-style-type: none"> • Оптическая толщина ($\pm 8 \%$) • Эффективный радиус ($\pm 10 \%$) • Эффективная дисперсия ($\pm 50 \%$) • Термодинамическая фаза/форма частиц

высокую точность восстановления оптической толщины аэрозоля.

Требуемые точности определения характеристик распределения аэрозоля по размерам следуют из необходимости точно оценить количество аэрозольных и облачных частиц в единице объема и тем самым выявить и количественно описать косвенный эффект аэрозолей. Дополнительным определяющим фактором является сильная зависимость эффективности конденсации на аэрозольных частицах от их размера.

Необходимая точность определения действительной части показателя преломления следует из требования оценить химический состав аэрозольных частиц, и следовательно, их происхождение (естественное или антропогенное). Более того, действительный показатель преломления служит хорошим индикатором гигроскопичных частиц, являющихся более эффективными ядрами конденсации облачных капель, и служит косвенным индикатором поглощающих частиц, и следовательно, тестом при определении альbedo однократного рассеяния.

Требуемые точности оценки характеристик облаков обусловлены необходимостью обнаружения и количественного описания таких определяющих признаков косвенного аэрозольного эффекта как изменения оптической толщины облаков, а также концентрации и размера облачных частиц [21, 40, 68].

МЕТОДИКА ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Хотя многие орбитальные инструменты использовались и продолжают использоваться для изучения глобального распределения аэрозолей и облаков [11], определение характеристик аэрозольных и облачных частиц с требуемой точностью остается нерешенной проблемой. Это объясняется исключительной сложностью и изменчивостью системы атмосфера — поверхность и необходимостью описания этой системы большим количеством модельных параметров, которые все одновременно должны быть восстановлены из данных измерений. Очень часто необходимое количество модельных параметров оказывается большим, чем количество *независимых* (т. е. взаимодополняющих в смысле инфор-

мационного содержания) единиц измерения, полученных инструментом для определенной площадки на земной поверхности, что приводит к плохой обусловленности обратной задачи. В таких случаях процедура восстановления дает не одно, а диапазон модельных решений, которые являются равно приемлемыми в том смысле, что они одинаково хорошо воспроизводят данные измерений в пределах экспериментальной точности. Единственным способом улучшить обусловленность обратной задачи является увеличение количества единиц измерения для каждой наблюдаемой площадки до тех пор, пока последнее не превысит количество восстанавливаемых модельных параметров в несколько раз, то есть получить избыточную систему уравнений. Тогда процедура восстановления может стать устойчивой и дать единственное решение, например с использованием метода наименьших квадратов.

С учетом вышесказанного пассивные орбитальные инструменты для дистанционного зондирования аэрозолей и облаков можно классифицировать по следующим ключевым признакам [57] (см. рис. 4):

- измеряет ли инструмент только интенсивность или все параметры Стокса излучения, падающего в детектор;
- точность и стабильность фотометрических и в особенности поляриметрических измерений;
- количество спектральных каналов и полный спектральный диапазон;
- количество и диапазон углов, под которыми инструмент «смотрит» на каждую площадку земной поверхности.

Согласно этой классификации к наименее «способным» пассивным инструментам относится AVHRR [53]. С другой стороны, практически идеальным был бы инструмент, позволяющий с высокой точностью измерять все параметры Стокса в большом количестве спектральных каналов внутри спектрального диапазона, простирающегося от ближнего ультрафиолета до коротковолновой инфракрасной области, при большом количестве углов отражения, охватывающих широкий угловой диапазон.

Этот фундаментальный вывод подтверждается всем ходом развития теории и практики дис-

танционного зондирования аэрозолей и облаков [10, 12—15, 18, 26—29, 33, 34, 44, 74, 77, 78]. К настоящему времени надежно установлено, что именно поляризация отраженного солнечного излучения является максимально чувствительной к микрофизическим свойствам аэрозольных и облачных частиц [1] и что без привлечения поляриметрических наблюдений решение проблемы аэрозолей невозможно в принципе [54].

Согласно детальному анализу, выполненному в работе [52], орбитальный инструмент, предназначенный для точного и комплексного дистанционного зондирования аэрозолей и облаков, должен иметь несколько узких спектральных каналов, распределенных по спектральному интервалу приблизительно от 400 до 2000 нм. Кроме того, прибор должен измерять по крайней мере три первых параметра Стокса во всех спектральных каналах, причем фотометрическая точность измерений должна быть не хуже 4 %, а точность измерения степени поляризации должна быть не хуже 0.2 %. Сканирование вдоль траектории полета должно позволить инструменту «увидеть» каждый элемент поверхности примерно под 100 различными углами, что радикально увеличивает информационное содержание измерений. Более того, высокое угловое разрешение позволит определять эффективный радиус облачных капель с исключительно высокой точностью [3, 8]. Алгоритмы обработки поляриметрических данных должны включать все новейшие теоретические разработки (см. ниже).

Центральные длины волн всех каналов должны быть выбраны с целью обеспечения максимальной чувствительности прибора к определенным свойствам аэрозольных и облачных частиц. Для примера на рис. 5 показано расположение девяти спектральных каналов инструмента APS. В частности, спектральный канал, центрированный на $\lambda = 1380$ нм, находится в пределах сильной полосы поглощения водяного пара. Поскольку водяной пар в основном сосредоточен в нижней тропосфере, этот канал позволяет изолировать сигнал, приходящий от расположенных высоко циррусных облаков, и тем самым разделить задачи определения свойств аэрозолей и циррусов. Более того, этот канал исклю-

чительно важен для разделения тропосферных и стратосферных аэрозолей в случае мощного вулканического извержения (см. рис. 3). Каналы на 1610 и/или 2200 нм позволяют определять свойства аэрозолей над яркими участками земной поверхности [77]. Каналы на 410 и 865 нм особенно важны для зондирования аэрозолей над океаном [1, 13, 29].

Ввиду ограниченных технических характеристик орбитальной платформы (микроспутник типа MC-2-8 разработки КБ «Южное» имеет примерно в три раза меньшую массу и мощность системы электропитания чем «Glory»), на которой планируется разместить аэрозольный поляриметр, представляется затруднительным включение всех девяти спектральных каналов, которыми был оснащен инструмент APS. Поэтому для орбитальной миссии «Аэрозоль-UA» мы предлагаем ограничиться наиболее информационно насыщенными каналами, центрированными на длины волн $\lambda = 410, 865, 1380$ и 2200 (или 1610) нм. Вместе с тем мы предлагаем дополнить их каналом на $\lambda = 370$ нм, которого не было на APS. Он может быть особенно полезен для оценки поглощающей способности тропосферных аэрозолей и их вертикального распределения.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СКАНИРУЮЩЕГО ПОЛЯРИМЕТРА

Из всех орбитальных поляриметров, изготовленных к настоящему времени, только инструмент APS позволяет осуществить всю совокупность наблюдений, описанных в предыдущем разделе. По сути единственным недостатком этого инструмента по сравнению с французским поляриметром POLDER [74] является отсутствие панорамных наблюдений, поскольку концепция APS нацелена на высокоточные поляриметрические измерения и допускает наблюдения только вдоль траектории полета. Однако с точки зрения климатических исследований этот недостаток является несущественным [9, 22, 35, 52]. В то же время более узкий спектральный диапазон инструмента POLDER в совокупности с меньшим количеством углов рассеяния и невозможностью точной бортовой калибровки поляризации и интенсивности делает этот инструмент значи-

тельно менее пригодным для получения требуемой климатической информации о ключевых параметрах аэрозолей и облаков.

Ввиду сказанного выше представляется естественным принять за основу для украинского сканирующего поляриметра («СканПол») оптическую концепцию поляриметра APS [52, 60]. Как уже указывалось, практические соображения требуют уменьшения количества спектральных каналов с девяти до пяти. Вместе с тем включение спектрального канала на $\lambda = 370$ нм является существенным новшеством и позволяет расширить круг конкретных научных задач, решаемых в рамках проекта «Аэрозоль-УА».

Предполагаемая оптическая схема поляриметра «СканПол» миссии «Аэрозоль-УА» показана на рис. 6. Она включает в себя четыре телескопические системы, первая пара из которых работает в ближнем ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра (370—410 нм), а вторая пара перекрывает спектральный диапазон 865—2200 нм. Каждая телескопическая система состоит из входного объектива и коллиматора. Диаметр входного объектива для видимого спектрального диапазона составляет порядка 10 мм. Для инфракрасного спектрального диапазона диаметр входного объектива увеличен до 15 мм для получения необходимого отношения сигнал/шум. В фокальной плоскости входного объектива каждого из каналов установлена диафрагма, задающая поле зрения прибора.

Призмы Волластона, расположенные за коллиматором, расщепляют входное излучение на две составляющие S и P с ортогональными поляризациями и, таким образом, служат анализаторами. В каждой паре телескопов ориентация одной из призм Волластона позволяет определять составляющие поляризации 0° и 90° , а другая призма, повернутая на угол 45° по отношению к первой, определяет составляющие 45° и 135° . Таким образом, одновременно определяются четыре линейно поляризованные составляющие для пяти спектральных полос (т. е. 20 одновременных отсчетов).

Вслед за призмами Волластона излучение проходит через систему дихроичных светоделителей, каждый из которых обеспечивает необходи-

мую спектральную селекцию. Ось наклона дихроичных фильтров выбрана таким образом, чтобы избежать инструментальной поляризации, связанной с разной поляризационной чувствительностью интерференционного покрытия фильтров для компонентов S и P .

Объективы камер каждого из пяти каналов строят два изображения диафрагмы в S - и P -лучах на приемниках излучения. Узкополосные фильтры, установленные перед объективами, обеспечивают окончательную спектральную селекцию в заданных диапазонах для каждого из каналов. В качестве детекторов в спектральных полосах 370, 410 и 865 нм используются кремниевые фотодиоды, в полосе 1380 нм — фотодиоды на основе InGaAs, не требующие охлаждения.

Уменьшение отношения сигнала к шуму до нужного уровня на длине волны 2200 нм может потребовать использования сложной системы охлаждения и специальных фотодетекторов. В случае невозможности реализации такой схемы канал 2200 нм может быть заменен каналом 1610 нм, с использованием фотодиодов такого же типа, что и для канала 1380 нм.

Сканирование вдоль траектории полета осуществляется при помощи вращающейся пары взаимно перпендикулярных зеркал, образующих поляризационно-нейтральную комбинацию (рис. 6). Это устройство позволяет наблюдать каждую площадку на земной поверхности под разными углами (рис. 7), тем самым значительно увеличивая информационное содержание измерений. В зависимости от времени накопления сигнала, количество углов рассеяния может превышать 100, что является важным условием точного определения эффективного радиуса облачных капель.

Диапазон углов сканирования составляет $\pm 60^\circ$ от надира. Поскольку сканирование осуществляется непрерывным и равномерным вращением зеркал, интервал времени, в течение которого зеркала находятся вне этого диапазона, не может быть задействован для сканирования земной поверхности, но может быть использован для измерения калибровочных источников. Последнее является необходимым условием для достижения необходимой точнос-

ти измерений (4 % для интенсивности и 0.2 % для поляризации).

Предполагается, что прибор будет иметь такой же набор калибровочных источников, как и поляриметр APS:

- эталон темноты, представляющий собой пластину с низкоальбедным черным покрытием;
- солнечный эталон интенсивности — аттестованное матовое стекло, освещаемое Солнцем;
- эталон нулевой поляризации — кристаллический деполяризатор, освещаемый отраженным Землей светом через диффузор;
- эталон полной поляризации — кристаллический поляризатор, также освещаемый отраженным Землей светом.

Возможна дополнительная калибровка путем изменения ориентации спутника таким образом, чтобы лимб Земли или Луна попадали в диапазон сканирования. Однако возможность таких маневров зависит от деталей конструкции орбитальной платформы и не является гарантированной.

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И НАЗЕМНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ

Существовало достаточно распространенное мнение, что обработка поляриметрических наблюдений связана с большими теоретическими трудностями и значительными затратами компьютерного времени. Однако в настоящее время в распоряжении исследователей находятся все необходимые теоретические разработки, программное обеспечение и компьютерное оборудование для эффективной и продуктивной обработки поляриметрических данных и определения необходимых параметров аэрозолей и облаков [5, 15, 20, 44—50, 57, 76]. Известные алгоритмы были, в частности, отработаны на данных с самолетного прототипа инструмента APS и наглядно продемонстрировали исключительную информационную насыщенность детальных и точных поляриметрических измерений [10, 12—15, 33, 34, 77].

Предполагается, что в рамках настоящего проекта будет организована наземная поддержка измерения аэрозоля на пунктах международной сети AERONET [19, 30], в том числе установлен-

ных недавно в Украине [16, 17]. Сравнение результатов, полученных с помощью инструмента «Аэрозоль-UA» и солнечных фотометров CIMEL CE318 сети AERONET, позволит повысить точность спутниковой базы данных. Именно такой путь организации космического проекта вместе с его наземной составляющей мы считаем наиболее оптимальным.

ВЫВОДЫ

Предлагаемые технические параметры проекта «Аэрозоль-UA» просуммированы в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Ориентировочные технические характеристики орбитальной платформы «Аэрозоль-UA»

Орбита	солнечно-синхронная
Наклон	98°
Высота	670 км
Точность ориентации	0.1°
Суммарная масса научной аппаратуры	50 кг
Максимальное энергопотребление научной аппаратуры	40 Вт
Номинальная продолжительность наблюдений	3 года

Таблица 3. Предполагаемое приборное обеспечение орбитальной миссии «Аэрозоль-UA»

<i>Многоканальный прецизионный сканирующий фотополяриметр «СканПол»</i>	
Сканирование: вдоль траектории полета	±60° от надира на поверхности Земли
Пространственное разрешение	6 км в надире
Спектральные каналы	370, 410, 865, 1380 и 2200 (1610) нм
Спектральная ширина каналов	10—20 нм
Измеряемые параметры Стокса	I, Q, U
Фотометрическая точность	4 %
Поляриметрическая точность	0.2 %
Бортовые калибраторы всех трех параметров Стокса	
<i>Простая одно- или двухканальная панорамная камера</i>	
Пространственное разрешение	0.5 км
Ширина захвата	±200 км от траектории полета
Спектральные каналы	440 и/или 865 нм с шириной ~10 нм

Помимо прецизионного многофункционального поляриметра «СканПол» предполагается использовать одно- или двухканальную камеру с высоким пространственным разрешением, которая позволит получать независимые оценки облачной составляющей в пределах относительно большого поля зрения поляриметра и тем самым облегчит извлечение информации о свойствах как аэрозолей, так и облаков в условиях частичной облачности [26]. Кроме того, эта камера позволит оценивать оптическую толщину и показатель Ангстрема аэрозоля в полосе с поперечным захватом ± 200 км от траектории полета при условии, что размер и химический состав аэрозоля мало изменяются по ширине захвата и могут быть оценены из поляриметрических данных, полученных вдоль наземной траектории.

Что касается поляриметра «СканПол», то мы уже отмечали, что инструмент такого типа планировался к запуску в составе космической миссии NASA «Glory» [52]. Предлагаемый нами вариант поляриметра включает четыре самых информационно-насыщенных спектральных канала инструмента APS. Более того, ожидается, что включение канала 370 нм позволит улучшить определение некоторых ключевых параметров аэрозолей.

Наземные испытания показали, что все технические характеристики инструмента APS были не хуже, а некоторые даже лучше проектных [61]. Это обстоятельство в совокупности с уникальными результатами, полученными путем обработки данных с самолетного прототипа APS, свидетельствует о детальной продуманности и практической осуществимости научной и технической концепции прецизионного многофункционального поляриметра. Украина в кооперации с другими странами располагает нужными интеллектуальными ресурсами и производственным потенциалом для проектирования, изготовления и запуска аналогичного инструмента и последующей обработки спутниковых наблюдений. Таким образом, может быть сделан определяющий вклад в решение проблемы аэрозолей, имеющей важное социальное, экономическое и научное значение на современном этапе развития земной цивилизации.

Работа выполняется в рамках Договора №7/12 «Исследование атмосферного аэрозоля» между НАН Украины и ГАО НАН Украины. Частичная поддержка работы осуществляется в рамках проекта UKG2-2969-KV-09 Фонда CRDF США.

1. Мищенко М., Розенбуш В., Кисельов М. Поляризация света: невидимый, але незамінний помічник дослідників // Світогляд. — 2009. — № 2 (16). — С. 56—61.
2. Ackerman A. S., Toon O. B., Stevens D. E., et al. Reduction of tropical cloudiness by soot // Science. — 2000. — **288**. — P. 1042—1047.
3. Alexandrov M. D., Cairns B., Mishchenko M. I. Rainbow Fourier transform // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. — 2012. — **113**. — doi:10.1016/j.jqsrt.2012.03.025.
4. Allen R. J., Sherwood S. C., Norris J. R., Zender C. S. Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone // Nature. — 2012. — **485**. — P. 350—354.
5. Baran A. J. From the single-scattering properties of ice crystals to climate prediction: a way forward // Atmos. Res. — 2012. — **112**. — P. 45—69.
6. Bauer S. E., Wright D. L., Koch D., et al. MATRIX (Multiconfiguration Aerosol TRacker of mIXing state): an aerosol microphysical module for global atmospheric models // Atmos. Chem. Phys. — 2008. — **8**. — P. 6003—6035.
7. Baum B. A., Yang P., Heymsfield A. J., et al. Improvements to shortwave bulk scattering and absorption models for the remote sensing of ice clouds // J. Appl. Meteorol. Climatol. — 2011. — **50**. — P. 1037—1056.
8. Bréon F. M., Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements // Geophys. Res. Lett. — 1998. — **25**. — P. 1879—1882.
9. Cairns B., Mishchenko M., Ackerman A., et al. The need for aerosol and cloud measurements from space: Essential contributions from a rapid reflight of the Aerosol Polarimetry Sensor // NASA Goddard Space Flight Center/Goddard Institute for Space Studies, 2012. — <http://glory.giss.nasa.gov>.
10. Cairns B., Waquet F., Knobelspiesse K., et al. Polarimetric remote sensing of aerosols over land surfaces // Satellite aerosol remote sensing over land / Eds A. A. Kokhanovsky, G. de Leeuw. — Chichester: Springer, 2009. — P. 295—325.
11. Chin M., Kahn R. A., Schwartz S. E. (Eds). Atmospheric aerosol properties and climate impacts. — Washington: U. S. Climate Change Science Program, 2009. — 128 p.
12. Chowdhary J., Cairns B., Travis L. D. Case studies of aerosol retrievals over the ocean from multiangle, multispectral photopolarimetric remote sensing data // J. Atmos. Sci. — 2002. — **59**. — P. 383—397.
13. Chowdhary J., Cairns B., Mishchenko M., Travis L. Retrieval of aerosol properties over the ocean using multi-

- spectral and multiangle photopolarimetric measurements from the Research Scanning Polarimeter // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — **28**. — P. 243–246.
14. Chowdhary J., Cairns B., Mishchenko M. I., et al. Retrieval of aerosol scattering and absorption properties from photopolarimetric observations over the ocean during the CLAMS experiment // *J. Atmos. Sci.* — 2005. — **62**. — P. 1093–1118.
 15. Chowdhary J., Cairns B., Waquet F., et al. Sensitivity of multiangle, multispectral polarimetric remote sensing over open oceans to water-leaving radiance: analyses of RSP data acquired during the MILAGRO campaign // *Remote Sens. Environ.* — 2012. — **118**. — P. 284–308.
 16. Danylevsky V., Ivchenko V., Milinevsky G., et al. Aerosol layer properties over Kyiv from AERONET/PHOTONS sunphotometer measurements during 2008–2009 // *Int. J. Remote Sens.* — 2011. — **32**. — P. 657–669.
 17. Danylevsky V., Ivchenko V., Milinevsky G., et al. Atmospheric aerosol properties measured with AERONET/PHOTONS sun-photometer over Kyiv during 2008–2009 // Use of satellite and in-situ data to improve sustainability / Eds F. Kogan, A. Powell, O. Fedorov. — Dordrecht: Springer, 2011. — P. 285–294.
 18. Dubovik O., Herman M., Holdak A., et al. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations // *Atmos. Meas. Tech.* — 2011. — **4**. — P. 975–1018.
 19. Dubovik O., Holben B., Eck T. F., et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // *J. Atmos. Sci.* — 2002. — **59**. — P. 590–608.
 20. Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., et al. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* — 2006. — **111**. — P. D11208 (34 p).
 21. Fridlind A. M., Ackerman A. S. Estimating the sensitivity of radiative impacts of shallow, broken marine clouds to boundary layer aerosol size distribution parameter uncertainties for evaluation of satellite retrieval requirements // *J. Atmos. Oceanic Technol.* — 2011. — **28**. — P. 530–538.
 22. Hansen J., Rossow W., Carlson B., et al. Low cost long term monitoring of global climate forcings and feedbacks // *Climatic Change*. — 1995. — **31**. — P. 247–271.
 23. Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K. Global surface temperature change // *Rev. Geophys.* — 2010. — **48**. — P. RG4004 (29 p.).
 24. Hansen J., Sato M., Kharecha P., von Schuckmann K. Earth's energy imbalance and implications // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — **11**. — P. 13421–13449.
 25. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Radiative forcing and climate response // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 6831–6864.
 26. Hasekamp O. P. Capability of multi-viewing-angle photopolarimetric measurements for the simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties // *Atmos. Meas. Tech.* — 2010. — **3**. — P. 839–851.
 27. Hasekamp O. P., Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over the ocean from multispectral single-viewing-angle measurements of intensity and polarization: retrieval approach, information content, and sensitivity study // *J. Geophys. Res.* — 2005. — **110**. — P. D20207.
 28. Hasekamp O., Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over land surfaces: capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements // *Appl. Opt.* — 2007. — **46**. — P. 3332–3344.
 29. Hasekamp O., Litvinov P., Butz A. Aerosol properties over the ocean from PARASOL multi-angle photopolarimetric measurements // *J. Geophys. Res.* — 2011. — **116**. — P. D14204.
 30. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., et al. AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* — 1998. — **66**. — P. 1–16.
 31. Kiehl J. T. Twentieth century climate model response and climate sensitivity // *Geophys. Res. Lett.* — 2007. — **34**. — P. L22710.
 32. Kiselev N. N., Mishchenko M. I. Astrophysical polarimetry in Ukraine // *Polarimetric detection, characterization, and remote sensing* / Eds M. I. Mishchenko, Ya. S. Yatskiv, V. K. Rosenbush, G. Videen. — Dordrecht: Springer, 2011. — P. 233–260.
 33. Knobelspiesse K., Cairns B., Ottaviani M., et al. Combined retrievals of boreal forest fire aerosol properties with a polarimeter and lidar // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — **11**. — P. 7045–7067.
 34. Knobelspiesse K., Cairns B., Redemann J., et al. Simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties during the MILAGRO field campaign // *Atmos. Chem. Phys.* — 2011. — **11**. — P. 6245–6263.
 35. Koffi B., Schulz M., Bréon F.-M., et al. Application of the CALIOP Layer Product to evaluate the vertical distribution of aerosols estimated by global models: Part 1. AeroCom phase I results // *J. Geophys. Res.* — 2012. — **117**. — P. D10201 (26 p.).
 36. Kondratyev K. Ya. Climatic effects of aerosols and clouds. — Chichester: Praxis, 1999. — 267 p.
 37. Lacis A., Hansen J., Sato M. Climate forcing by stratospheric aerosols // *Geophys. Res. Lett.* — 1992. — **19**. — P. 1607–1610.
 38. Lacis A. A., Mishchenko M. I. Climate forcing, climate sensitivity, and climate response: a radiative modeling perspective on atmospheric aerosols // *Aerosol forcing of climate* / Eds R. Charlson, J. Heintzenberg. — New York: Wiley, 1995. — P. 11–42.
 39. Loeb N. G., Su W. Direct aerosol radiative forcing uncertainty based on a radiative perturbation analysis // *J. Clim.* — 2010. — **23**. — P. 5288–5293.
 40. Lohmann U., Feichter J. Global indirect aerosol effects: a review // *Atmos. Chem. Phys.* — 2005. — **5**. — P. 715–737.

41. *Lohmann U., Ferrachat S.* Impact of parametric uncertainties on the present-day climate and on the anthropogenic aerosol effect // *Atmos. Chem. Phys.* — 2010. — **10**. — P. 11373–11383.
42. *Maring H., Savoie D. L., Izaguirre M. A., et al.* Mineral dust aerosol size distribution change during atmospheric transport // *J. Geophys. Res.* — 2003. — **108**. — P. 8592 (6 p.).
43. *Miller R. L., Cakmur R. V., Perchwitz J., et al.* Mineral dust aerosols in the NASA Goddard Institute for Space Sciences Modele atmospheric general circulation model // *J. Geophys. Res.* — 2006. — **111**. — P. D06208 (19 p.)
44. *Mishchenko M. I., Travis L. D.* Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 16989–17013.
45. *Mishchenko M. I., Hovenier J. W., Travis L. D. (Eds).* Light scattering by nonspherical particles: theory, measurements, and applications. — San Diego: Academic Press, 2000. — 690 p.
46. *Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A.* Scattering, absorption, and emission of light by small particles. — Cambridge: University Press, 2002. — 445 p.
47. *Mishchenko M. I., Travis L. D., Lacis A. A.* Multiple scattering of light by particles: radiative transfer and coherent backscattering. — Cambridge: University Press, 2006. — 478 p.
48. *Mishchenko M. I., Travis L. D., Kahn R. A., West R. A.* Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a mixture of randomly oriented polydisperse spheroids // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102**. — P. 16831–16847.
49. *Mishchenko M. I., Videen G., Rosenbush V. K., Yatskiv Ya. S. (Eds).* Polarimetric detection, characterization, and remote sensing // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer (Special Issue)*. — 2011. — **112**, N 13 — P. 2041–2248.
50. *Mishchenko M. I., Yatskiv Ya. S., Rosenbush V. K., Videen G. (Eds).* Polarimetric detection, characterization, and remote sensing. — Dordrecht: Springer, 2011. — 550 p.
51. *Mishchenko M., Cairns B., Hansen J., et al.* Monitoring of aerosol forcing of climate from space: analysis of measurement requirements // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. — 2004. — **88**. — P. 149–161.
52. *Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., et al.* Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* — 2007. — **88**. — P. 677–691.
53. *Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Cairns B., et al.* Aerosol retrievals over the ocean by use of channels 1 and 2 AVHRR data: sensitivity analysis and preliminary results // *Appl. Opt.* — 1999. — **38**. — P. 7325–7341.
54. *Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Liu L., et al.* Toward unified satellite climatology of aerosol properties: what do fully compatible MODIS and MISR aerosol pixels tell us? // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. — 2009. — **110**. — P. 402–408.
55. *Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Rossow W. B., et al.* Long-term satellite record reveals likely recent aerosol trend // *Science*. — 2007. — **315**. — P. 1543.
56. *Mishchenko M. I., Liu L., Geogdzhayev I. V., et al.* Aerosol retrievals from channel-1 and -2 AVHRR radiances: long-term trends updated and revisited // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. — 2012. — **113**. — doi:10.1016/j.jqsrt.2012.05.006
57. *Mishchenko M. I., Rosenbush V. K., Kiselev N. N., et al.* Polarimetric remote sensing of Solar System objects. — Kyiv: Akadempriodyka, 2010. — 292 p.
58. *Nakićenović N., Swart R. (Eds).* Emissions scenarios. Summary for policymakers // IPCC special report. — Cambridge: University Press, 2000. — 20 p.
59. *Penner J. E., Xu L., Wang M.* Satellite methods underestimate indirect climate forcing by aerosols // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. — 2011. — **108**. — P. 13404–13408.
60. *Peralta R. J., Nardell C., Cairns B., et al.* Aerosol Polarimetry Sensor for the Glory Mission // *Proc. SPIE*. — 2007. — **6786**. — P. 67865L.
61. *Persh S., Shaham Y. J., Benami O., et al.* Ground performance measurements of the Glory Aerosol Polarimetry Sensor // *Proc. SPIE*. — 2010. — **7807**. — P. 780703.
62. *Pham M., Boucher O., Hauglustaine D.* Changes in atmospheric sulfur burdens and concentrations and resulting radiative forcings under IPCC SRES emission scenarios for 1990–2100 // *J. Geophys. Res.* — 2005. — **110**. — P. D06112 (10 p.).
63. *Ramanathan V., Crutzen P., Kiehl J., Rosenfeld D.* Aerosols, climate, and the hydrological cycle // *Science*. — 2001. — **294**. — P. 2119–2124.
64. *Randall D. A. (Ed).* General circulation model development. — San Diego: Academic Press, 2000. — 815 p.
65. *Sato M.* Atmospheric circulation dynamics and general circulation models. — Chichester: Praxis, 2004. — 643 p.
66. *Schulz M., Textor C., Kinne S., et al.* Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations // *Atmos. Chem. Phys.* — 2006. — **6**. — P. 5225–5246.
67. *Schwartz S. E.* Uncertainty requirements in radiative forcing of climate change // *J. Air Waste Manage. Assoc.* — 2004. — **54**. — P. 1351–1359.
68. *Schwartz S. E., Slingo A.* Enhanced shortwave cloud radiative forcing due to anthropogenic aerosols // *Clouds, chemistry and climate / Eds P. J. Crutzen, V. Ramanathan*. — Berlin: Springer, 1996. — P. 191–236.
69. *Schwartz S. E., Charlson R. J., Rhode H.* Quantifying climate change — too rosy a picture? // *Nature Rep. Clim. Change*. — 2007. — **1**. — P. 23–24.
70. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. — New York: Wiley, 2006. — 1203 p.

71. Solomon S., Qin D., Manning M., et al. (Eds). Climate change 2007: the physical science basis. — Cambridge: University Press, 2007. — 996 p.
72. Stephens G. L., Vane D. G., Boain R. J., et al. The CloudSat mission and the A-Train: a new dimension of space-based observations of clouds and precipitation // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2002. — **83**. — P. 1771–1790.
73. Stier P. Towards the assessment of the aerosol radiative effects — a global modelling approach // PhD Thesis. — 2005. — 113 p.
74. Tanré D., Bréon F. M., Deuzé J. L., et al. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission // Atmos. Meas. Tech. — 2011. — **4**. — P. 1383–1395.
75. Trenberth K. E. (Ed.) Climate system modeling. — Cambridge: University Press, 2009. — 820 p.
76. Videen G., Yatskiv Ya., Mishchenko M. Photopolarimetry in remote sensing. — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. — 503 p.
77. Waquet F., Cairns B., Knobelspiesse K., et al. Polarimetric remote sensing of aerosols over land // J. Geophys. Res. — 2009. — **114**. — P. D01206 (23 p.).
78. Waquet F., Riedi J., Labonnote L.-C., et al. Aerosol remote sensing over clouds using A-Train observations // J. Atmos. Sci. — 2009. — **66**. — P. 2468–2480.
79. Wild M. Enlightening global dimming and brightening // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2012. — **93**. — P. 27–37.
80. Winker D. M., Pelon J., Coakley J. A. Jr., et al. The CALIPSO Mission: a global 3D view of aerosols and clouds // Bull. Amer. Meteorol. Soc. — 2010. — **91**. — P. 1211–1229.

Надійшла до редакції 13.06.12

Ya. S. Yatskiv, M. I. Mishchenko, V. K. Rosenbush,
D. N. Shakhovskoy, I. I. Sinyavsky, G. P. Milinevsky,
N. N. Kiselev, Yu. S. Ivanov, V. N. Petukhov,
V. O. Danylevsky, A. P. Bovchalyuk

SATELLITE PROJECT «AEROSOL-UA»: REMOTE SENSING OF AEROSOLS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

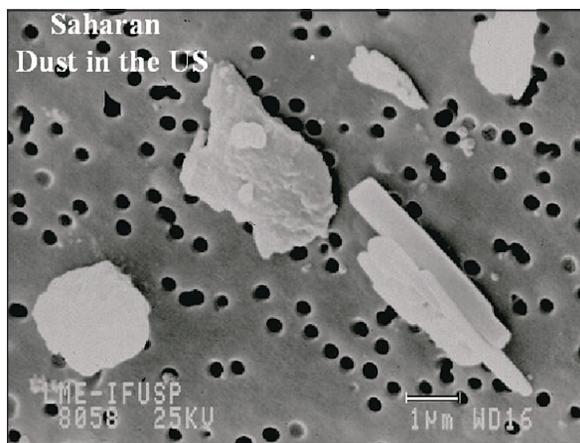
It is well known that atmospheric aerosols strongly affect the terrestrial climate and environment, their climatic effects being comparable to those of the greenhouse gases. However accurate quantitative estimates of these effects and, especially, of their anthropogenic components are absent, thereby making it difficult to formulate scientifically justified social and economic programs. We outline the perspective Ukrainian space project «Aerosol-UA» which has the following three main objectives: 1) to monitor the spatial distribution of key parameters of terrestrial tropospheric and stratospheric aerosols; 2) to provide a comprehensive observational database enabling accurate quantitative estimates of the aerosol contribution to the energy budget of the climate system; 3) to quantify the contribution of anthropogenic aerosols to climatic and ecological processes. We provide a detailed analysis and justification of an aerosol remote-sensing concept based on precise orbital measurements of the intensity and polarization of sunlight scattered by the atmosphere and the surface. We argue that Ukraine possesses the requisite intellectual resources and production facilities to design, build, and launch into orbit a multi-functional high-precision polarimeter and thereby to make an essential contribution to the study of natural and man-made aerosols and their climatic and ecological effects.



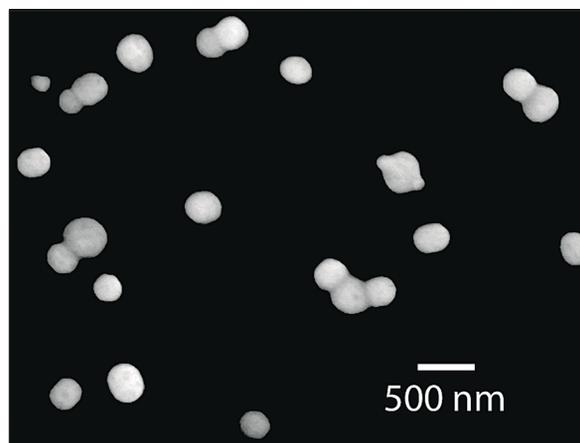
a



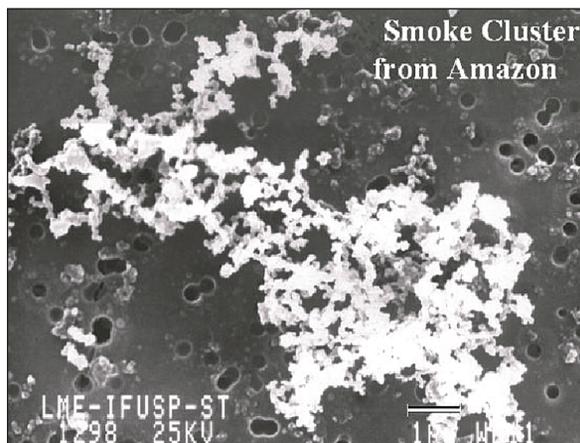
б



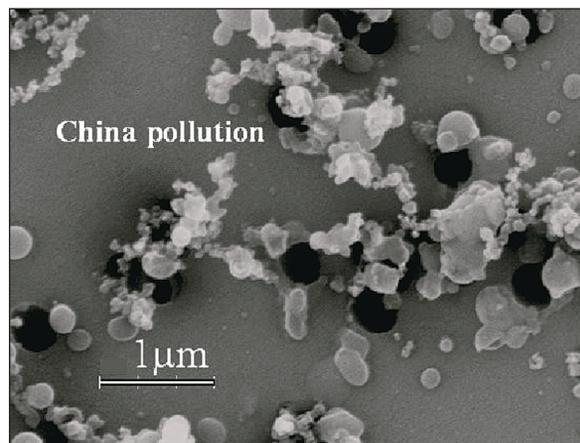
в



г



д



е

Рис. 1. Аэрозоли вулканического происхождения (*a*) и аэрозольная дымка антропогенного происхождения, типичная для промышленных районов и больших городов (*б*). Электронные микрофотографии: пылевые частицы (*в*), субмикронные частицы минеральной пыли и сульфата аммония (*г*), частицы сажи (*д*) и продукты промышленного загрязнения (*е*)

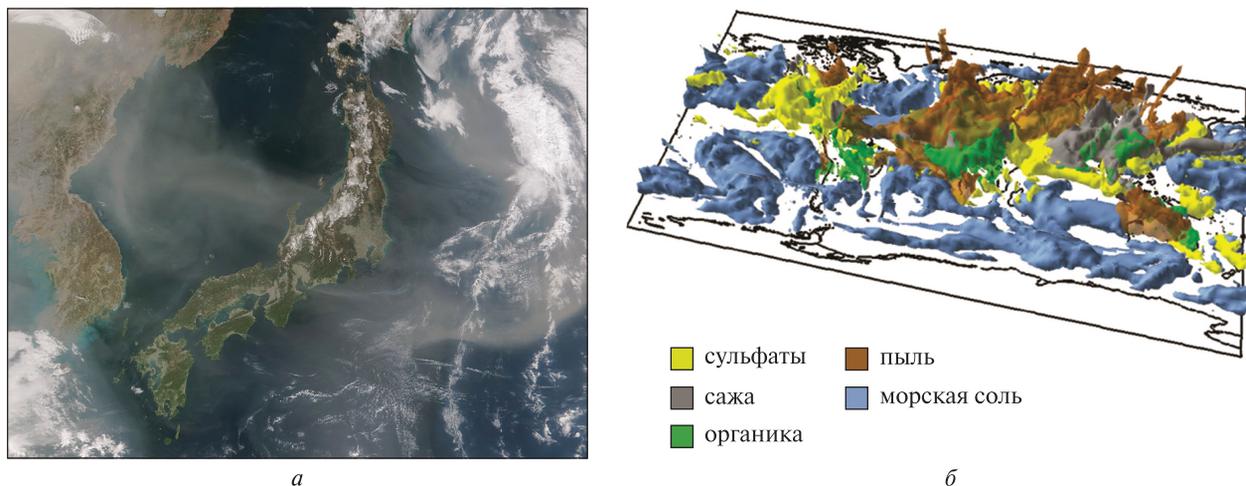


Рис. 2. *a* — демонстрация значительной пространственной неоднородности объектов, попадающих в поле зрения спутникового инструмента. Хорошо видны пылевые аэрозоли, выдуваемые ветрами с поверхности азиатских пустынь и проносимые над Японским морем. Изображение построено на основе данных измерений инструмента NASA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (<http://modis.gsfc.nasa.gov>); *б* — пример компьютерного моделирования глобального распределения химического состава аэрозолей [73]. Области вблизи границ раздела между различными цветами характеризуются сложными смесями различных типов частиц. Белый цвет соответствует очень низкому содержанию аэрозолей.

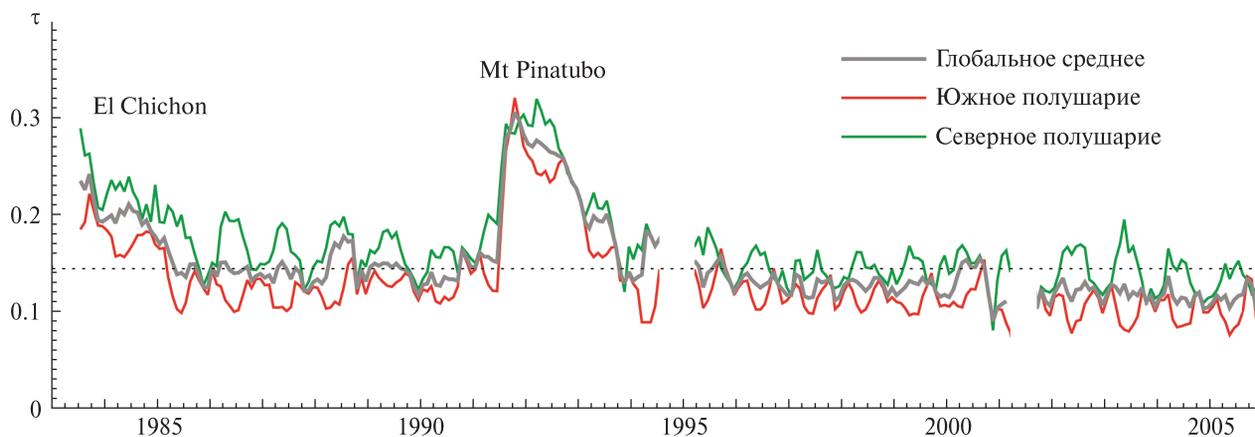


Рис. 3. Оптическая толщина τ аэрозолей на длине волны $\lambda = 550$ нм по данным программы GACP. Горизонтальная линия показывает глобальную оптическую толщину, усредненную за четыре года, предшествовавших извержению вулкана Mt Pinatubo

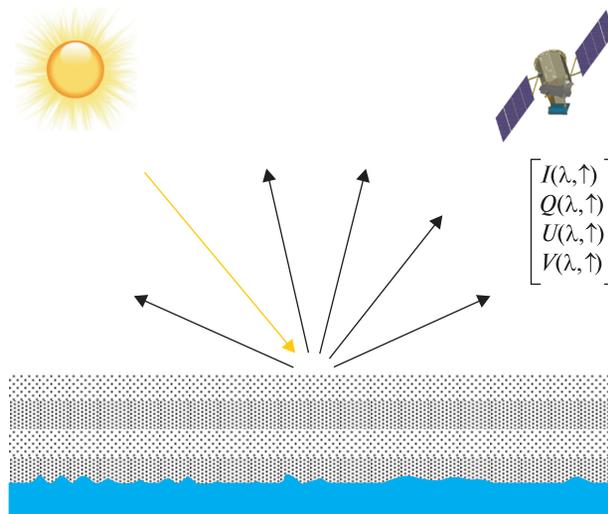


Рис. 4. К объяснению классификации пассивных инструментов дистанционного зондирования, измеряющих характеристики диффузно отраженного солнечного света. Параметры Стокса I , Q , U , V отраженного света изменяются с длиной волны света λ и с направлением отражения

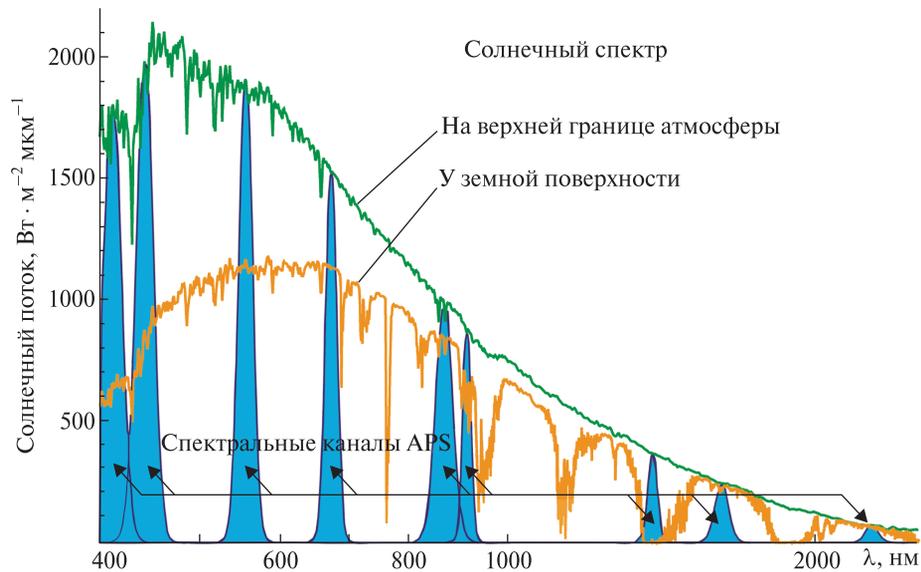


Рис. 5. Распределение энергии в спектре Солнца на верхней границе атмосферы и у поверхности Земли и расположение полос пропускания девяти фильтров, используемых в поляриметре APS

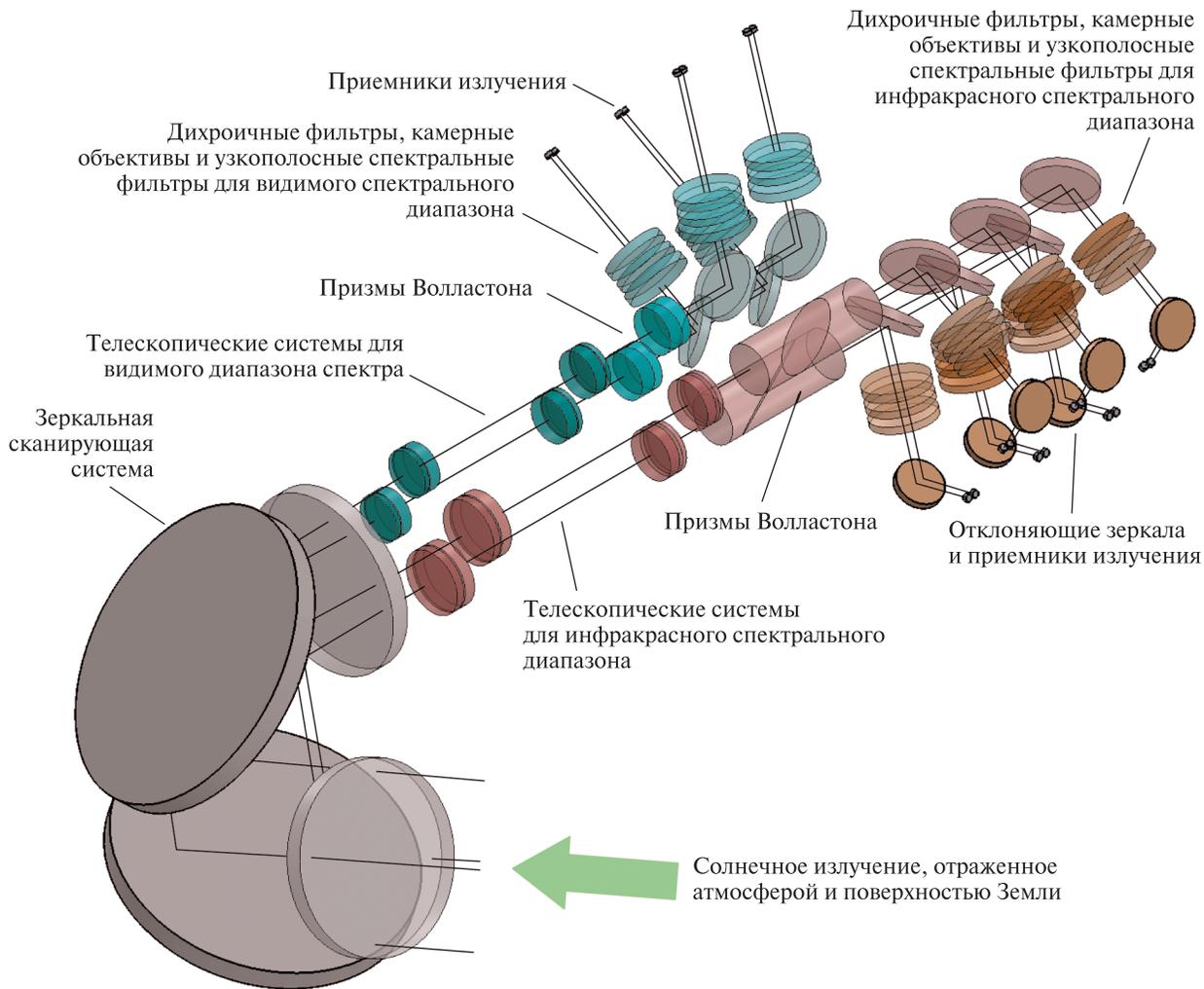
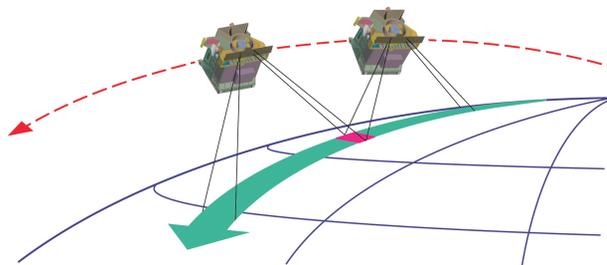


Рис. 6. Оптическая схема поляриметра «Аэрозоль-UA»

Рис. 7. Квазинепрерывное сканирование вдоль траектории полета позволит проводить наблюдения каждой площадки на земной поверхности примерно под 100 углами рассеяния



УДК 629.197

А. Л. Макаров

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

О СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Розглядається ефективність запропонованого методу супутникового знімання протяжних територій складної конфігурації із застосуванням супутників дистанційного зондування Землі з оптико-електронними сканерами високого просторового розділення, що реалізується за допомогою програмного керування орієнтацією супутника під час знімання.

При спутниковой съемке оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения протяженных территорий сложной конфигурации (границы, дороги, реки, береговые линии и т. п.), расположенных не вдоль подспутниковой трассы, возникает проблема, связанная с узкой (обычно от 5 до 20 км) полосой захвата сканера, не позволяющей оперативно снимать произвольно расположенные протяженные участки за один виток [8, 10].

Как правило, в таких случаях необходима съемка нескольких сцен с разных витков, причем для солнечно-синхронных орбит, характерных для спутников дистанционного зондирования Земли с оптико-электронными сканерами, за сутки одна и та же территория может быть снята только на одном витке. Поэтому даже двухвитковая съемка может потребовать при отсутствии облачности и ограничений на минимальные углы съемки нескольких дней (в зависимости от полосы захвата сканера и диапазона углов перенацеливания спутника). С учетом условий облачности съемка может потребовать еще больше времени, что для большинства прикладных и научных задач неприемлемо [2, 11].

Некоторые зарубежные спутники с оптико-электронными сканерами высокого пространственного разрешения позволяют выполнять съемку произвольно-ориентированных прямо-

линейных протяженных участков. Однако съемка протяжных территорий сложной конфигурации выполняется за несколько витков [7, 12].

Существенно повысит оперативность спутниковой съемки протяжных территорий сложной конфигурации позволяет новый метод съемки в процессе перенацеливания (т. е. с ненулевыми угловыми скоростями), реализуемый с помощью программного управления ориентацией спутника [6, 9].

Ниже приведены сравнительные оценки оперативности спутниковой съемки протяженной береговой линии сложной конфигурации, полученные в результате моделирования с использованием фактических данных об облачности по данной территории. Исходные данные для моделирования:

- снимаемый участок — южное побережье Крыма от Севастополя до Феодосии (протяженность около 160 км);
- период съемки — 19...23 мая 2012 г.;
- тип орбиты спутника — солнечно-синхронная, высота 700 км;
- полоса захвата сканера в надире — 15 км.

Снимаемая береговая линия задается на карте узловыми точками x_i с произвольным шагом по широте и долготе (количество узловых точек объекта $n = 6...9$). Для аппроксимации береговой линии функцией $S(x)$ используется естественный кубический интерполирующий сплайн [4, 5] ($S''(x_0) = 0$ и $S''(x_n) = 0$) с последующим

сглаживанием методом наименьших квадратов. Функция $S(x)$ интерполируется полиномом

$$S_i(x) = \omega y_i + \bar{\omega} y_{i-1} + h_i^2 [(\omega^3 - \bar{\omega})\delta_i + (\bar{\omega}^3 - \omega)\delta_{i-1}],$$

где

$$h_i = x_{i+1} - x_i,$$

$$\omega = \frac{x - x_i}{h_{i+1}},$$

$$\bar{\omega} = 1 - \omega.$$

Коэффициенты сплайна $\delta_0 = 0$, $\delta_n = 0$, а $\delta_1 \dots \delta_{n-1}$ находятся из системы линейных уравнений

$$\begin{pmatrix} 2[h_1 + h_2] & h_2 & 0 & \dots & 0 \\ h_2 & 2[h_2 + h_3] & h_3 & \dots & 0 \\ 0 & h_3 & 2[h_3 + h_4] & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & h_{n-1} & 2[h_{n-1} + h_n] \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \\ \dots \\ \delta_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_2 - \Delta_1 \\ \Delta_3 - \Delta_2 \\ \Delta_4 - \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_n - \Delta_{n-1} \end{pmatrix}.$$

Ее матрица является трехдиагональной, симметричной, со строгим диагональным преобладанием. Такая система эффективно решается методом прогонки. На рис. 1 показан кубический интерполирующий сплайн (а) и сглаживающие сплайны при коэффициентах сглаживания 0.8 (б) и 0.3 (в). Узловые точки показаны крестиками, а пунктиром показана их линейная аппроксимация.

Моделирование проводилось для следующих видов съемки:

- многовитковая съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы и нулевыми угловыми скоростями во время съемки;
- многовитковая съемка с произвольной ориентацией сцены и ненулевыми угловыми скоростями во время съемки;
- одновитковая съемка сцены сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями во время съемки.

Для получения фактических данных об облачности по данной территории использовались снимки спутников Aqua и Terra (прибор MODIS) [1, 3]. Результаты моделирования показаны на

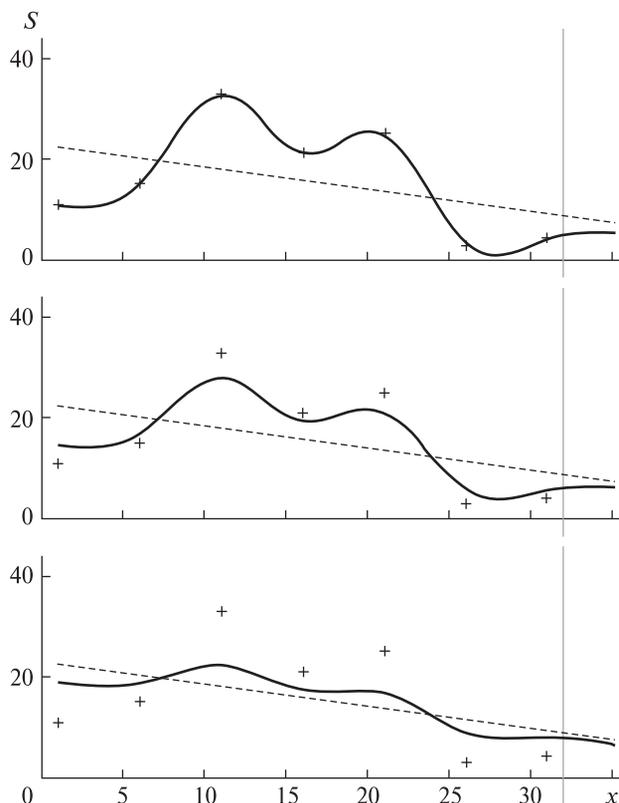


Рис. 1. Кубические сплайны: а — интерполирующий сплайн, б — сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0.8, в — сглаживающий сплайн при коэффициенте сглаживания 0.3

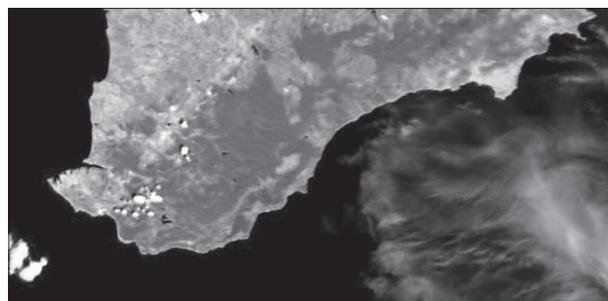


Рис. 2. Состояние облачности 19 мая 2012 г. на время съемки (облачность 2 % — снимаемая территория доступна для съемки)

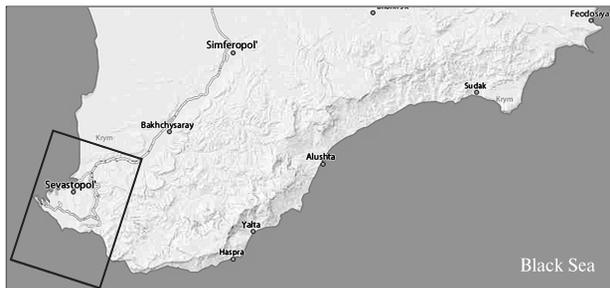


Рис. 3. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 1-й виток снято 15 % площади территории)

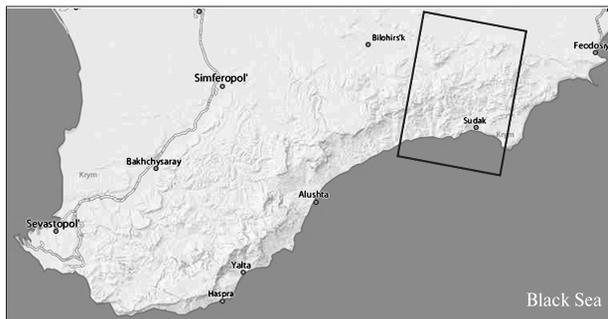


Рис. 6. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 2-й виток снято 17 % площади территории)

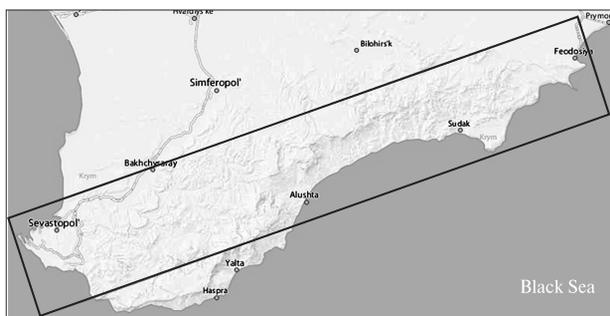


Рис. 4. Съемка с произвольной ориентацией сцены (за 1-й виток снято 80 % площади территории)

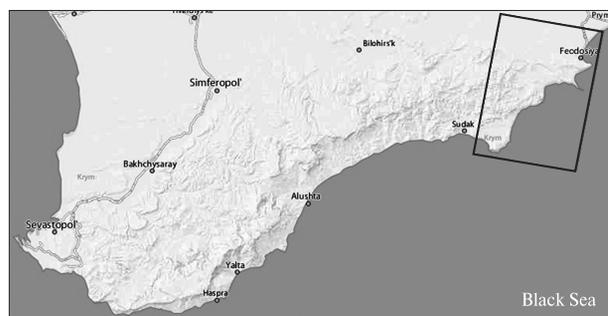


Рис. 7. Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы (за 3-й виток снято 20 % площади территории)

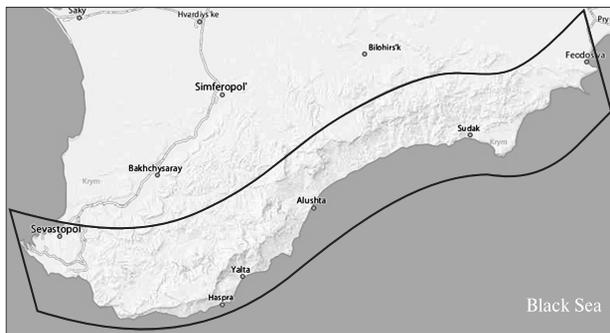


Рис. 5. Съемка сцены сложной конфигурации (за 1-й виток снято 98 % площади территории)

Вид съемки	Количество сцен (витков)	Срок выполнения, сут	Доля снятой площади
Съемка с ориентацией сцены вдоль подспутниковой трассы	3	5	52 %
Съемка с произвольной ориентацией сцены	1	1	80 %
Съемка сцены сложной конфигурации	1	1	98 %

рис. 2—7. Как видно, в заданный 5-дневный период снимаемая территория была доступна для съемки полностью 1 день, частично — 2 дня, недоступна — 2 дня. В таблице приведены показатели эффективности различных видов съемки.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что одновитковая съемка сцены

сложной конфигурации с ненулевыми угловыми скоростями во время съемки является наиболее эффективной в части оперативности и площади покрытия.

Для других сезонов съемки (осенне-зимний период) и других регионов Украины влияние погодных условий еще более существенное, и

сравнительная эффективность разработанного метода съемки будет еще выше.

1. Долинец Ю. С., Мозговой Д. К. Использование снимков со спутников Terra и Aqua для решения актуальных прикладных задач // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаціно-космічної техніки». Збірник доповідей. — Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2007. — Ч. II. — С. 97—103.
2. Долинец Ю. С., Мозговой Д. К. Технология спутниковой съемки с ненулевыми угловыми скоростями // X Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Збірник тез. — Д., 2008. — С. 495.
3. Кравець О. В., Мозговой Д. К. Использование данных MODIS для экологического мониторинга и контроля ЧС // X Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос». 9—11 квітня 2008 р., Дніпропетровськ: Національний центр аеро-космічної освіти молоді України ім. О. М. Макарова: Збірник тез. — Дніпропетровськ: НЦАОМ, 2008. — С. 500.
4. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Методы повышения эффективности спутниковой съемки произвольно расположенных протяженных участков Земли // 21-я Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конф. (Севастополь, 12—16 сент. 2011 г.). — Севастополь: Вебер, 2011. — С. 182—183.
5. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Повышение эффективности съемки с помощью космического аппарата земных объектов произвольной конфигурации // Технологические системы. — 2011, № 2 (55). — С. 66—70.
6. Макаров О. Л., Мозговой Д. К., Кулабухов А. М. и др. Технология спутниковой съемки в процессе перенацеливания // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 6. — С. 3—9.
7. Мозговой Д. К. Методика спутникової зйомки мало-розмірних слабоконтрастних об'єктів // Програма наукової конференції за підсумками науково-дослідної роботи університету за 2010 рік. — Дніпропетровськ: ДНУ, 2010. — С. 108.
8. Мозговой Д. К. Технология съемки протяженных объектов // IX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос»: Зб. тез. — Д., 2007. — С. 439.
9. Мозговой Д. К. Управление ориентацией КА ДЗЗ высокой разрешающей способности // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. — 2009. — Вип. 13, т. 1. № 17/4. — С. 59—65.
10. Мозговой Д. К., Волошин В. И. Спутниковая съемка протяженных объектов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Ракетно-космічна техніка. — 2006. — Вип. 10. — 2, № 9/2. — С. 239—241.
11. Мозговой Д. К., Волошин В. И. Технология съемки прибрежных зон // Современные проблемы рационального природопользования в прибрежных морских акваториях Украины: Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых (Кацивели, 12—14 июня 2007 г.). — Севастополь, 2007. — С. 21—22.
12. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Бушуев Е. И., Салтыков Ю. Д. Использование новых технологий съемки для повышения эффективности КА МС-2-8 // VII Украинская конференция по космическим исследованиям. Сб. тезисов. 3 — 8 сентября 2007 г., НЦУИКС, Евпатория. — С. 182—183.

Надійшла до редакції 25.06.12

A. L. Makarov

ON SATELLITE IMAGING OF LENGTHY TERRITORIES WITH COMPLEX CONFIGURATION

We consider the efficiency of the method proposed for satellite imaging of lengthy territories with complex configuration using Earth remote sensing satellites with optical-electronic scanners of high resolution which is realized with the help of programmed control of the satellite orientation during imaging.

УДК 514.18

Л. М. Білокриницька¹, Г. М. Крученицький², І. Г. Міщишина¹

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

² Центральна аерологічна обсерваторія Росгідромету, Долгопрудний, Росія

БАЗА ДАНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ АЕРОЗОЛЬНОГО ПОСЛАБЛЕННЯ НА ЧОТИРЬОХ ДОВЖИНАХ ХВИЛЬ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ SAGE II

Описано структуру та функціональні можливості об'єднаної бази даних, створеної на основі вимірювань приладу SAGE II на борту КА ERBS з жовтня 1984 р. по квітень 2000 р. на довжинах хвиль $\lambda\lambda$ 386, 452, 525 і 1020 нм. Розроблено зручний для користувача інтерфейс. На нульовому рівні об'єднана база даних містить первинні дані: вертикальні профілі концентрації озону, водяної пари, двоокису азоту і аерозолу на чотирьох довжинах хвиль. На першому рівні забезпечується візуальний перегляд даних, їхня фільтрація та пошук, можливість критичного перегляду даних за певними критеріями селекції. На другому рівні зберігається інформація про кліматичні моделі і нормальні образи параметрів (значення спектральних характеристик сезонної мінливості, межі відхилення від сезонного ходу і характеристики довготривалої мінливості). Крім того, є можливість поповнення об'єднаної бази даних значеннями аерозольних індексів, отриманих супутниковою апаратурою класу TOMS-OMI та внесками національних центрів даних. Продемонстровано приклади роботи з базою.

ВСТУП

З 24 жовтня 1984 р. по 22 серпня 2005 р. провадились дослідження стратосферних аерозолів і газів апаратурою SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment), яка була встановлена на борту супутника ERBS (Earth Radiation Budget Satellite, NASA). Тривалість спостережень була унікальною, кількість вимірювань становить 168389. Отримано понад 300 тисяч висотних профілів у чотирьох спектральних каналах ($\lambda\lambda = 386, 452, 525$ і 1020 нм) з просторовим розділенням по висоті 0.5 км, що становить загалом понад 50 млн відліків. Цей масив потрібно не лише зберегти, але й забезпечити можливість проведення детального огляду даних та їхніх перетинів, аналізу стандартними статистичними та аналітичними методами, а також візуалізації як самих даних, так і результатів аналізу.

ВИБІР СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄДНАНОЮ БАЗОЮ ДАНИХ

Незважаючи на наявність в даний час значної кількості потужних систем керування базами даних (СКБД) з різноманітними користувацькими зручностями вибір СКБД для вирішення конкретного завдання нерозривно пов'язаний з її особливостями. Об'єднана база даних (ОБД) «Аерозольний індекс і довжина аерозольної екстинкції (коефіцієнт аерозольного послаблення) на довжинах хвиль 386, 452, 525 і 1020 нм» має такі особливості:

- значні обсяги інформації, яка архівується (10–100 Гб),
- потреба в розвинених обчислювальних засобах, особливо математичної статистики,
- необхідність в ефективних засобах візуалізації одновимірних та двовимірних даних,
- доступність засобів інформаційного забезпечення для не підготовленого користувача,
- забезпечення можливості зміни СКБД.

© Л. М. БІЛОКРИНИЦЬКА, Г. М. КРУЧЕНИЦЬКИЙ,
І. Г. МІЩИШИНА, 2012

Тому питання про вибір СКБД доцільно вирішувати після аналізу складу і структури рівнів архівування даних з урахуванням результатів такого аналізу.

ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СКЛАДУ І СТРУКТУРИ РІВНІВ АРХІВУВАННЯ ОБ'ЄДНАНОЇ БАЗИ ДАНИХ

Загальні принципи побудови об'єднаної бази даних припускають трирівневу структуру рівнів архівування.

Рівень 0. Зберігаються первинні дані, отримані виконавцем спостережень у форматі, заданому ним же. Розробники та користувачі бази даних не мають права вносити зміни ні у формат архівації первинних даних, ні у значення самих даних. Навіть якщо архівні дані видаються абсолютно безглуздими, вони не можуть бути змінені ніким, крім тих виконавців, які переводили апаратурні відліки у значення геофізичних параметрів. Розробники та користувачі ОБД можуть виключити дані, що не викликають їхньої довіри, з наступних рівнів архівації або з процесу обробки даних, але на «Рівні 0» їх необхідно зберегти. Програмне забезпечення «Рівня 0» повинно складатися виключно із засобів поповнення рівня новими даними.

Рівень 1. На цьому рівні дублюється інформація «Рівня 0», але при цьому забезпечуються такі можливості [2]:

- включення до складу програмного забезпечення «Рівня 1» засобів критичного перегляду даних і доведення критеріїв селекції даних до відома користувача;
- виключення чи оснащення спеціальними позначками тих даних, які не відповідають критеріям критичного перегляду, і доведення до відома користувача відповідності між змістом критеріїв та форматом позначок;
- включення до складу програмного забезпечення «Рівня 1» програмних засобів вичерпного візуального перегляду даних, а також фільтрації та пошуку.

Крім того, бажано:

- включення в доступну користувачеві інформацію метаданих, що полегшують доступ до даних «Рівні 1» можливостями його власних програмних засобів;

- включення до складу користувацького інтерфейсу «Рівня 1» розвинених обчислювальних засобів і скрипта для автоматизації обчислювальних та пошукових операцій на програмному рівні.

Допускається включення до складу даних на цьому рівні допоміжної інформації (наприклад, від світових центрів дії (СЦД) про стан сонячної активності, про квазидворічні коливання зональної складової екваторіального вітру та індекс субглобальних коливань тиску та ін.), сумісної з основною інформацією, зі зручним інтерфейсом та програмними засобами поповнення даних.

Рівень 2. На цьому рівні повинна зберігатися виключно інформація про кліматичні моделі і нормальні образи параметрів. Під нормальним образом слід розуміти значення спектральних характеристик сезонної мінливості, межі відхилення від сезонного ходу і характеристики довготривалої мінливості (довготривалі коливання, тренди та ін.).

На «Рівні 2» розробники ОБД повинні забезпечити виконання таких вимог:

- доступність для користувача алгоритмів побудови моделей і формування нормальних образів та їхньої програмної реалізації;
- наявність користувацького інтерфейсу для візуалізації побудованих моделей і сформованих образів;
- доступність користувачеві інформації про те, які з модельних даних отримані безпосередньо з інформації, що міститься на «Рівні 1», а які методами інтер- та екстраполяції;
- доступність користувачеві алгоритмів інтер- та екстраполяції, а також програмної реалізації цих алгоритмів;
- можливість для користувача модифікувати чи розробляти заново алгоритми і програми побудови моделей, здійснювати формування нормальних образів, а також інтер- та екстраполяцію модельних параметрів.

Програмне забезпечення всіх рівнів повинне бути доступним користувачеві, забезпеченим вичерпними коментарями і максимально можливою мірою відповідати вимогам інкапсуляції.

ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ ВИМОГ ДО СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БАЗАМИ ДАНИХ

Бази даних, створені на сучасному рівні вимог до користувацьких зручностей, повинні забезпечувати [2]:

- легкість доступу до наявних даних і простоту поповнення новими;
- можливість використання структурованих запитів із застосуванням мови QSL;
- можливість візуалізації (двовимірної і тривимірної) інформації, що міститься у базі даних та/або отриманої в результаті аналізу;
- можливість застосовувати для обробки інформації як стандартні аналітичні засоби, так і власні алгоритми користувача.

Всі ці вимоги легко здійснити шляхом застосування стандартних пакетів програм та засобів керування базами даних, таких як Access, FoxPro, MathCad і т. д. Проте освоєння цих пакетів і СКБД, тим більше на рівні, достатньому для реалізації власних алгоритмів, часто вимагає від користувача завеликих витрат часу. При цьому виконання всіх перерахованих вище вимог робить для користувача необхідним оволодіння принаймні однією СКБД і одним пакетом аналітичних програм. Для того щоб мінімізувати зусилля користувача, оптимальним є створення проміжного рівня представлення інформації у вигляді робочої книги Excel. Це забезпечує користувачам можливість застосування потужних систем керування базами даних, до FoxPro включно, вбудованих у Microsoft Visual Studio, і ефективних засобів аналізу, що включені у аналітичні пакети Maple, MathCad, MathLab тощо.

Наявність проміжного рівня надає користувачеві такі переваги:

- для вирішення більшості пошукових і дослідницьких завдань досить оволодіти навичками роботи з електронними таблицями Excel, які на сьогодні є одним з найбільш масових програмних продуктів;
- обробка стандартних запитів, візуалізація даних і використання більшості математичних та логічних функцій може здійснюватися звичайними засобами Excel;

- у пакеті користувацьких засобів аналізу та підготовки можна використовувати «швидкі» можливості Excel з обчислювальної та сортувальної роботи з масивами;

- для реалізації власних алгоритмів обробки даних та для автоматичного формування потоків вхідної інформації за власними критеріями користувачеві досить опанувати діалект VBA (Visual Basic for Applications) [3]. Розробку можна вести також на будь-якій з мов Microsoft Visual Studio;

- оформлені у вигляді робочих книг Excel, результати аналізу геофізичних процесів легко контролювати, тобто автоматично виконується вимога повторюваності результатів, яка часто ігнорується у сучасних геофізичних дослідженнях.

Як СКБД було вибрано електронні таблиці Excel 2007, інформаційні можливості яких істотно розширено порівняно з попередніми версіями: робочий аркуш має 16384 стовпці (замість 256) і 1048576 рядків (замість 65536).

ОПИС КЕРУВАННЯ ДАНИМИ ТА ЇХНЬОЇ ОБРОБКИ ЗАСОБАМИ ОБРАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БАЗАМИ ДАНИХ

Електронні таблиці Excel 2007 містять значний набір засобів керування даними та їхнього аналізу: перевірка даних, сортування і фільтрація даних, можливість використання поряд з автофільтрами користувальницьких фільтрів, перегляд і пошук значень, візуалізація даних, зв'язування і консолідація даних, аналіз даних за допомогою зведених таблиць.

До складу електронних таблиць Excel 2007 входить також розвинений і ефективний інструментарій для обробки даних, який включає:

- формули робочого аркуша, що містять функції елементарної математики, математичної статистики, лінійної алгебри, логіки, систем числення та ін.;
- пакет аналізу, що включає розширення засобів математичної статистики, спеціальні функції, засоби вирішення рівнянь, аналіз Фур'є.
- засоби аналізу даних за допомогою сценаріїв «що — якщо»;
- засоби аналізу даних за підбором параметрів і вибором рішення.

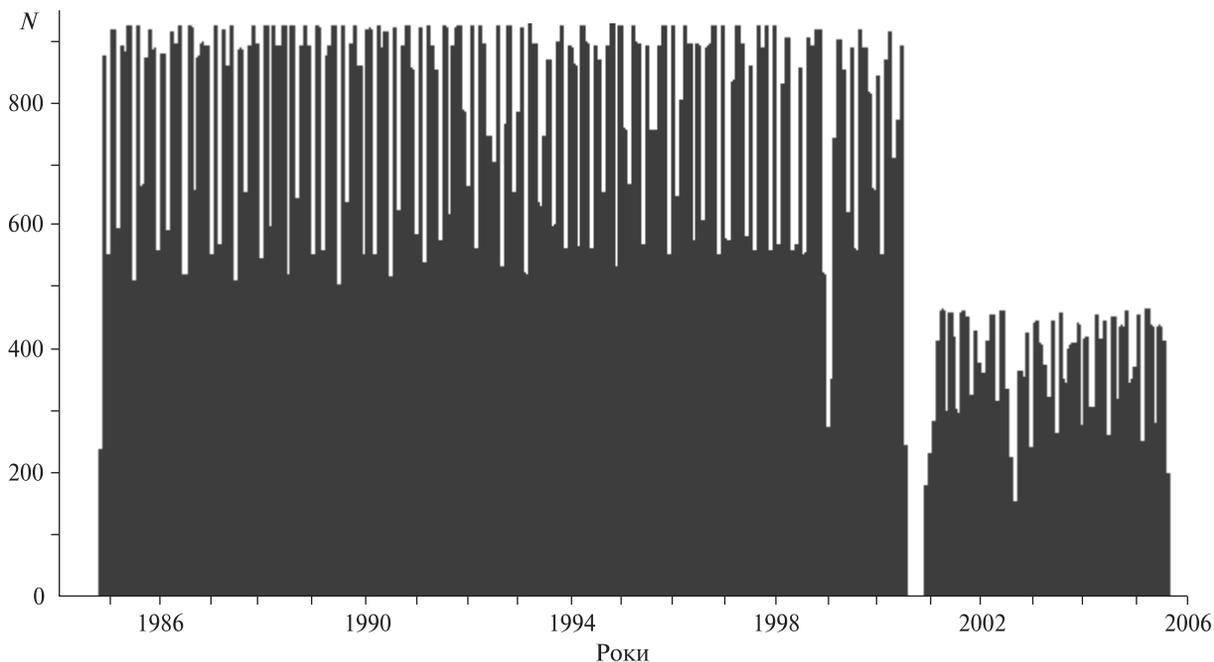


Рис. 1. Діаграма щомісячних вимірювань SAGE II

Засоби керування даними і їхнього аналізу доступні як безпосередньо з робочого аркуша, так і з коду VBA, що дозволяє автоматизувати операції керування та аналізу.

РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ, ПІДГОТОВКА ДОКУМЕНТАЦІЇ

Короткий опис апаратури, режимів вимірювання та інші обставини спостережень, на основі яких будується ОБД наведені нижче. Вихідними даними про стратосферний аерозоль є коефіцієнт аерозольного послаблення на вказаних вище чотирьох довжинах хвиль в інтервалі висот від 0.5 до 40 км з кроком 0.5 км. Крім коефіцієнта аерозольного послаблення, в роботах з дослідження аерозолів часто використовується зворотна величина — довжина аерозольного послаблення.

Коротко структура ОБД відображена у таблиці.

У процесі роботи апаратура SAGE II вертикально сканує лімб атмосфери зі супутника під час заходу і сходу Сонця (15 заходів і 15 сходів кожного дня). Захід чи схід, під час якого виконуються вимірювання, називається подією. Нахилена на 57° орбіта корабля ERBS рівномірно розподіляє вимірювання SAGE II по широті. Детально схему

Структура об'єднаної бази даних

Рівень	Зміст
0	Вихідні файли з інформацією про всі події за місяць кожного року
1	Файли з вільним доступом
1_1	Файли метаданих про події
1_2	Файли візуалізації профілів і їхні прив'язки
1_3	Файли метаданих про географічний розподіл подій
2	Інформація про кліматичні моделі і нормальні образи параметрів
2_1	Файли з реалізаціями, сезонним ходом і трендом для кожного параметру стратосфери у довільній забезпеченій 3D-комірці (з візуалізацією)
2_2	Файли з даними про розподіл параметрів часової мінливості за забезпеченими 3D-комірками
2_3	Файли з глобальною інтерполяцією даних рівня 2_2 за допомогою сферичних функцій

лімбових вимірювань потоків радіації спектрометром супутника наведено в роботі [1].

На рис. 1 показана діаграма кількості N щомісячних вимірювань, проведених апаратурою SAGE II за час здійснення проекту.

SAGE II провадив вимірювання у семи спектральних каналах від 385 до 1020 нм. За час своєї роботи SAGE II забезпечив великий об'єм корисних даних з хімії та динаміки зміни геофізичних параметрів у верхніх шарах тропосфери і стратосфери Землі (10—40 км).

За даними вимірювань випромінювання у зазначених вище чотирьох спектральних каналах, розсіяного і поглиненого газами та аерозолями на різних висотах, відновлювалися вертикальні профілі концентрації озону, водяної пари, двоокису азоту і аерозолю. Описання методики обчислення функції пропускання атмосфери і аерозольної екстинкції можна знайти в роботі [1].

Детальний опис рівнів розробленої бази даних наведено нижче.

Опис «Рівня 0». Після обробки фахівцями NASA телеметрії, що була прийнята зі супутника, дані SAGE II поширюються у подвійному форматі. Архів, що містить результати вимірів апаратурою SAGE II, має 374 файли загальним обсягом 1.25 Гб і складається з двох видів файлів для кожного місяця спостережень: «*index*» і «*species*».

Кожен окремий запис файлу *index* містить просторово-часову інформацію для кожної події за весь місяць (до 930 подій). Файли *species* — це файли прямого доступу, що містять до 930 записів. Кожен запис містить профілі густини частинок і додаткову специфічну інформацію про подію. Кожні два окремих файли «*index*» і «*species*» об'єднують місячний ряд даних за всіма компонентами.

Дані, представлені у подвійному форматі, вимагають наявності спеціального програмного забезпечення для їхнього перегляду і використання. Програмні коди, що супроводжують такі дані, як правило, придатні для роботи з окремими файлами і не підходять для роботи з великим обсягом інформації. Тому для роботи з архівом SAGE II було розроблено програмне забезпечення для розпакування бінарних файлів у текстовий формат.

Після розпакування архів SAGE II складається з текстових файлів одного формату, які об'єднують місячний ряд спостережень. Імена

файлів (наприклад SAGE_II_SPEC_198410.6.00.txt) містять вказівку на:

- прилад (SAGE_II);
- рік і місяць проведення вимірювань у форматі YYYYMM (198410);
- номер версії програмного забезпечення для обробки телеметрії (6.00).

Оскільки телеметрія, отримана при супутниковому зондуванні, — це послідовність окремих подій, кожен файл має заголовок, який містить інформацію щодо всіх подій і блоки з інформацією за кожною окремою подією.

Заголовок містить:

- число вимірювань, проведених у даному місяці [Number of profiles (records) in these files],
- номер версії програмного забезпечення для обробки телеметрії [LaRC Driver version, LaRC Transmission version, LaRC Inversion version, LaRC Spectroscopy version],
- мережу висотних рівнів (км) [Geometric Altitudes] і її крок [Altitude Grid spacing],
- нижні і верхні межі за висотою для профілів всіх представлених параметрів атмосфери [Min & Max altitudes],
- перерахований перелік всіх подій за місяць із зазначенням для кожної дати порядкового номера у розглянутих добі, часу, координат прицільної точки, типу події як щодо космічного апарата, так і щодо землі [Event Specific Info useful for data subsetting].

Блок інформації про кожну окрему подію має заголовок із зазначенням порядкового номера події в даному місяці і включає:

- профілі тиску (мб), температури (К) і концентрації (молекул/см³) від 0.5 до 70 км у точках спостережень, отримані за результатами модельних розрахунків NMC (National Meteorological Center) на основі експериментальних даних в інших пунктах спостережень [Pressure, Temperature, Density];
- висоту тропопаузи (км) [Tropopause height];
- значення спектральних каналів вимірювань (мікрметри) [Channel wavelengths];
- профілі концентрації озону від 0.5 до 70 км (см⁻³) [O3 number density];
- профілі концентрації двоокису азоту від 0.5 до 50 км (см⁻³) [NO2 number density];

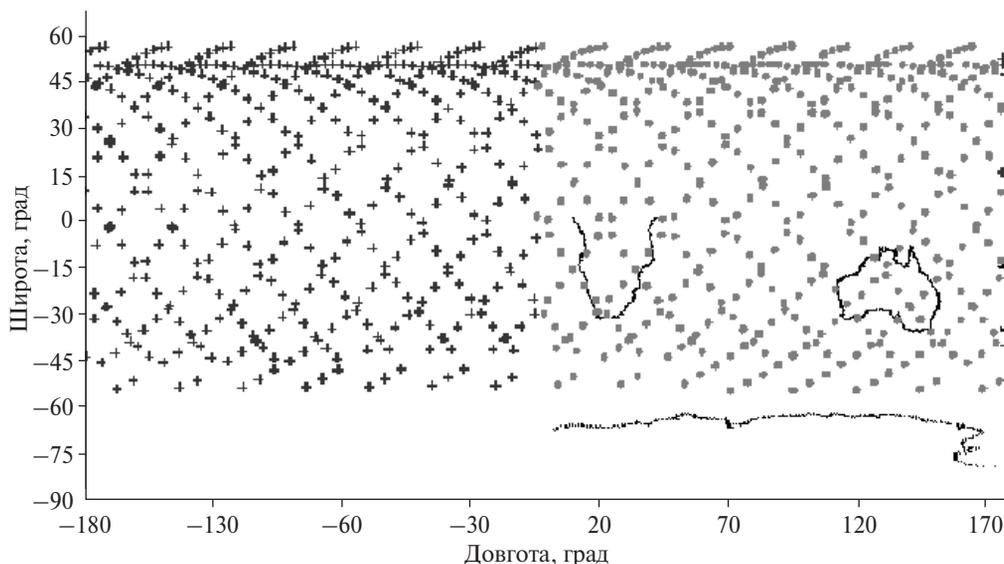


Рис. 2. Розташування подій у перший місяць роботи супутника. Хрестики — захід, плямки — схід Сонця

- профілі відносної концентрації водяної пари від 0.5 до 50 км (parts per part — ppp) [mixing ratio];
- профілі екстинкції аерозолю для чотирьох спектральних каналів: 1020, 525, 453, і 385 нм від 0.5 до 40 км (через 1 км) [386-nm, 452-nm, 525-nm, 1020-nm aerosol extinction];

Всі профілі мають просторову роздільну здатність вздовж вертикалі 0.5 км. За географією дані SAGE II охоплюють $\pm 80^\circ$.

Опис «Рівня 1». «Рівень 1» містить сім файлів. З них чотири файли є текстовими з вільним доступом, в інших трьох розташовано шість робочих книг електронних таблиць Excel 2007.

Файли з вільним доступом мають імена PTD_profiles.dat, SCA_profiles.dat, AEL_profiles.dat і RelErr_profiles.dat. У всіх файлах запис (рядок) відповідає події які мають хронологічну послідовність. Записи містять такі поля (стовпці):

- гринвіцький час події;
- тип події (схід, захід);
- номер широтного поясу, в якому сталася подія (широтні пояси мають ширину 5° , і їхній рахунок починається з Півдня);
- номер довготної частки, в якій сталася подія (довготні частки мають ширину 10° , і їхній рахунок починається з центрованої на -175°);

- номер комірки географічної сітки (комірки першого широтного поясу нумеруються від 1 до 36 з заходу на схід, комірки другого широтного поясу від номера 37 до 72 і т. д.);
- далі йдуть записи з відліками або кодом відсутності даних (-999).

Файл PTD_ має 420 полів з відліками, в яких записані послідовно тиск, температура і концентрація по 140 висотних рівнях. Файл SCA_ має 340 полів з відліками, послідовно озон — по 140 висотних рівнях, двоокис азоту і водяна пара по 100 висотних рівнях. Файл AEL_ має 320 полів з відліками по 80 висотних рівнів на кожну довжину хвилі в порядку зростання довжин хвиль. І нарешті, файл RelErr_ має 1080 полів з відліками, у яких записані значення відносних похибок або код відсутності. Послідовність полів: 420 як в PTD_, за ними 340 як в SCA_ і за ними 320 як в AEL_.

Три робочі книги PTD_profiles.xlsx, SCA_profiles.xlsx, AEL_profiles.xlsx повторюють структуру текстових файлів, але у форматі Excel 2007 і з заголовками полів. Це дублювання пов'язано з необхідністю забезпечити, з одного боку, користувачеві зручності і можливості в рамках обраної СКБД, а з іншого — можливість зміни СКБД. Робоча книга Step_1.xlsx містить детальний опис

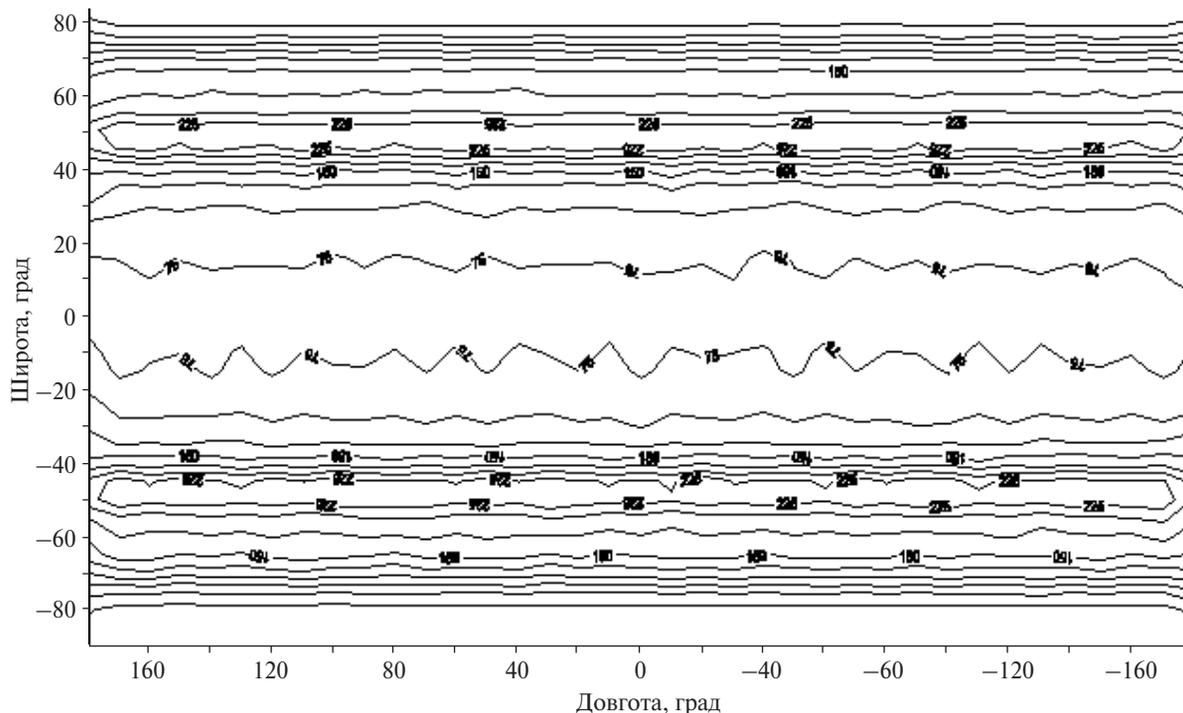


Рис. 3. Географічний розподіл подій

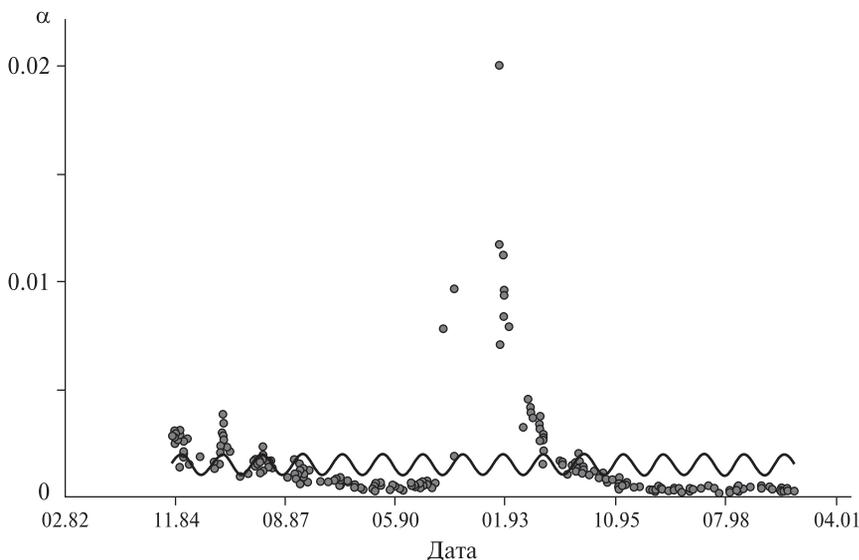


Рис. 4. Сезонний хід і реалізація коефіцієнта α аерозольної екстинкції на довжині хвилі λ 452 нм

усіх 143309 подій, відображених у БД. Кожній події відповідає запис з 11 полів, що містять точну географічну і часову прив'язку, умови вимірювання і висоту тропопаузи під час вимірювань.

Робоча книга Step_2.xlsb призначена для перегляду географічної прив'язки подій за обра-

ним користувачем часом і будь-якої пари профілів параметрів з вимірюваних у вибраній користувачем події. Робоча книга Step_3.xlsb містить дані про глобальний розподіл подій. Приклад доступних для перегляду діаграм наведені на рис. 2 та 3.

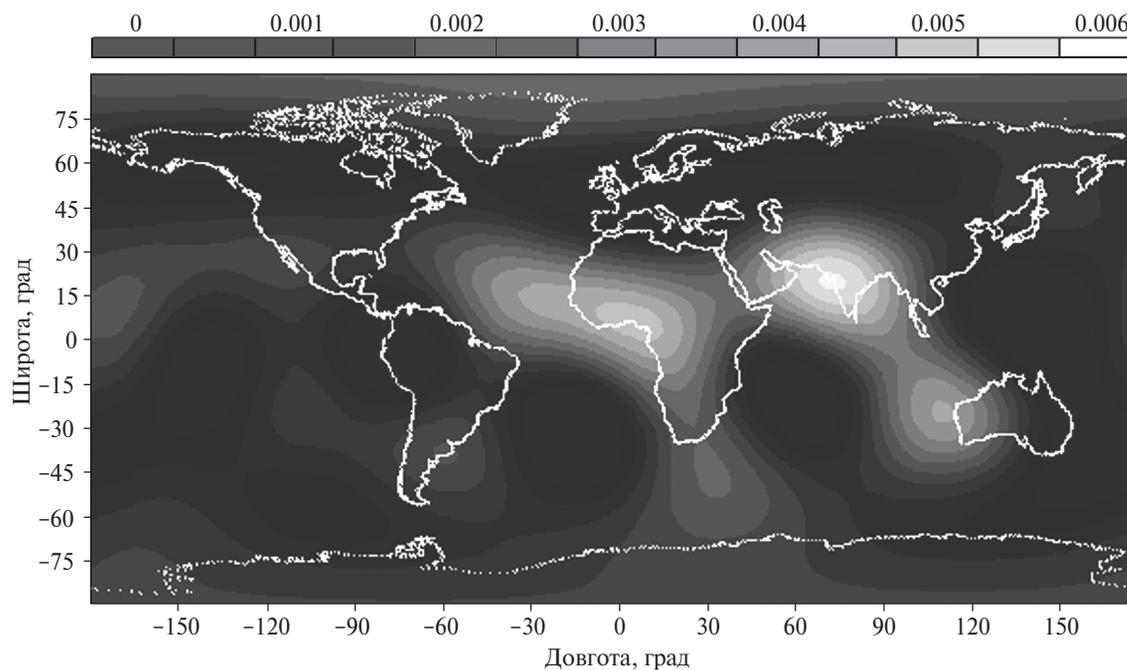


Рис. 5. Глобальний розподіл постійної складової коефіцієнта аерозольної екстинкції на довжині хвилі λ 452 нм для $H = 14.5$ км

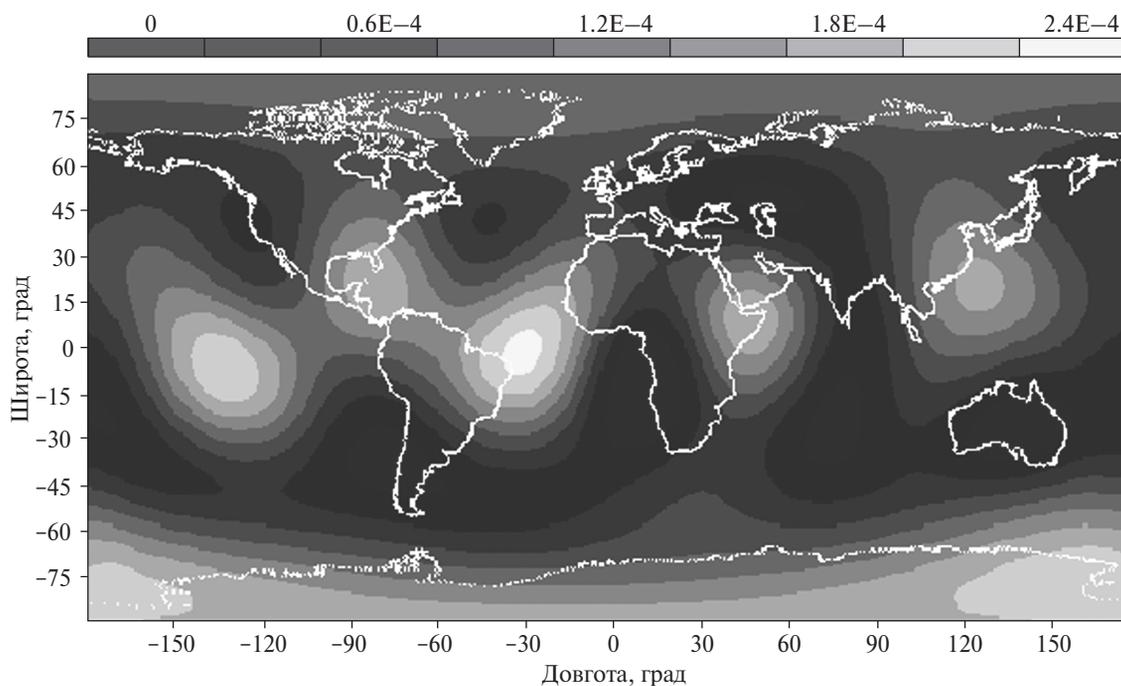


Рис. 6. Глобальний розподіл амплітуди I гармоніки коефіцієнта аерозольної екстинкції на довжині хвилі λ 452 нм для $H = 14.5$ км

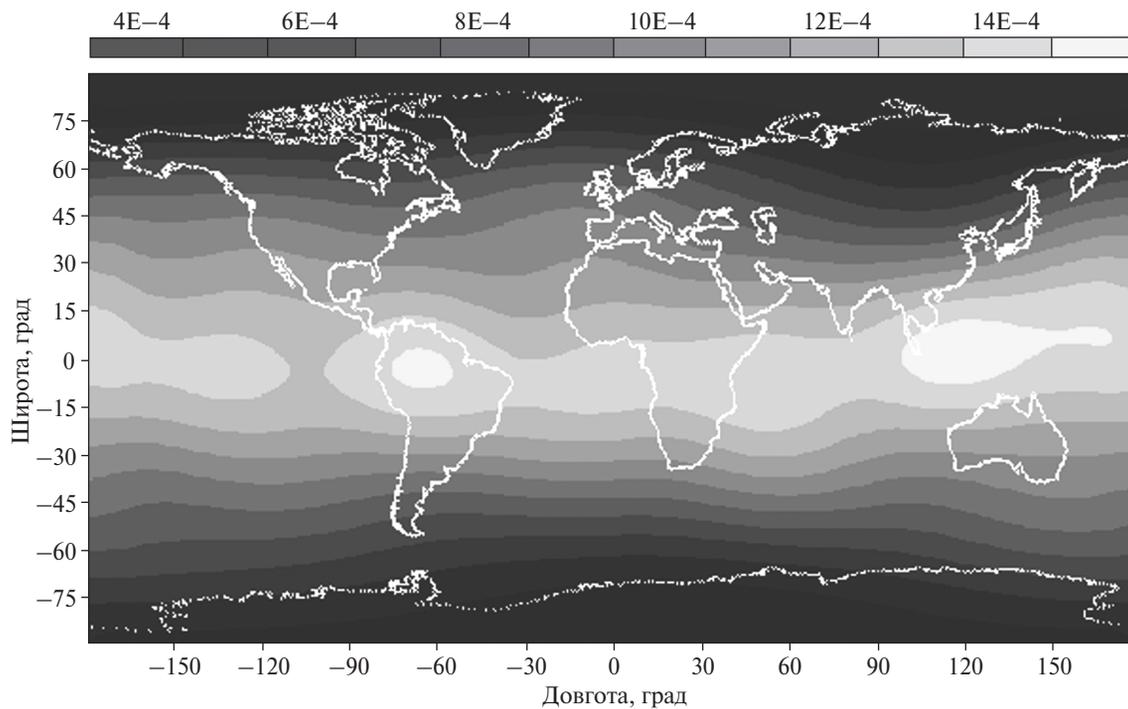


Рис. 7. Глобальний розподіл постійної складової коефіцієнта аерозольної екстинкції на довжині хвилі λ 452 нм для $H = 21$ км

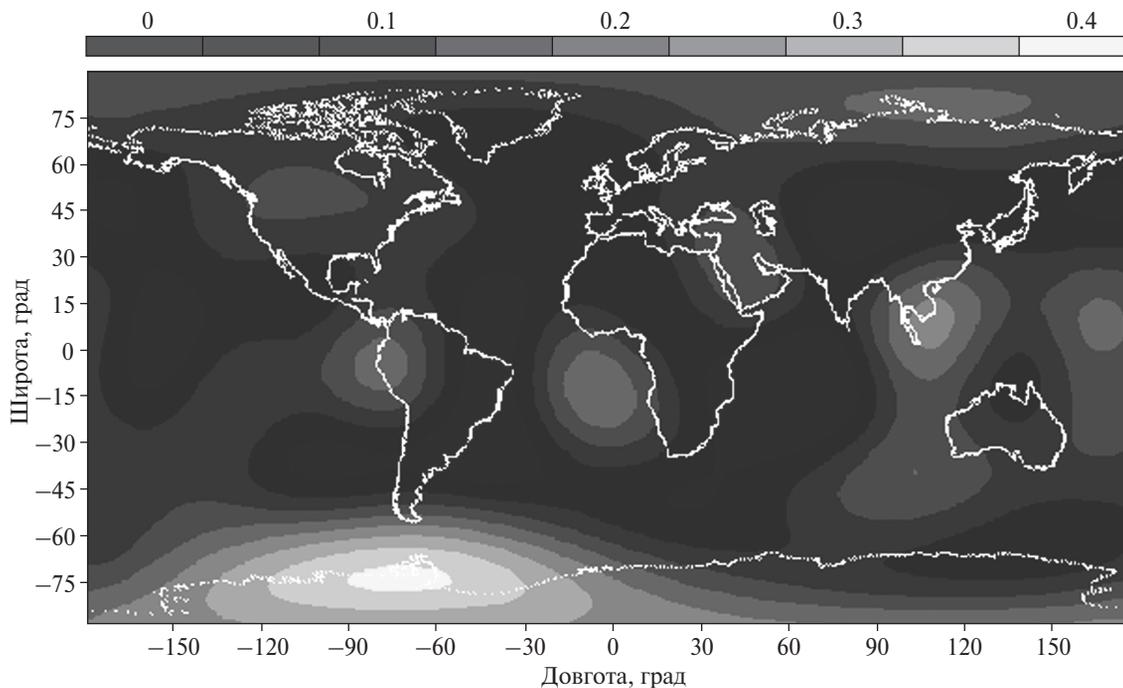


Рис. 8. Глобальний розподіл амплітуди і гармоніки коефіцієнта аерозольної екстинкції на довжині хвилі λ 452 нм для $H = 21$ км

Опис «Рівня 2». Об'єднана база даних містить 12 файлів «Рівня 2», по три файли на кожен з чотирьох довжин хвиль. Приклад розрахованого сезонного ходу та реалізації для коефіцієнта аерозольної екстинкції на довжині хвилі 452 нм наведено на рис. 4. Робоча книга *Clim_T_1* призначена для тестування статистичної значимості параметрів сезонного ходу і трендів та організації статистично значимих даних у вигляді таблиць, що відображають структуру географічної сітки на кожному висотному рівні. І нарешті, робоча книга *Clim_T_2* призначена для інтерполяції статистично значимих даних регресією за сферичними функціями на всю географічну сітку для тих висотних рівнів, число статистично значимих відліків на яких не менше ніж у чотири рази перевищує число базисних сферичних функцій.

ПРИКЛАДИ РОБОТИ

З ПРЕДСТАВЛЕНОЮ БАЗОЮ ДАНИХ

Для ілюстрації найпростіших можливостей бази розраховано кліматичні норми для коефіцієнтів аерозольного послаблення, визначено межі його природної мінливості на чотирьох довжинах хвиль і оцінено похибки для цих норм. Деякі приклади результатів наведено на рис. 4–8.

1. Білокриницька Л. М., Міщишина І. Г., Крученицький Г. М. Вибір та обґрунтування структури інформаційного та алгоритмічного забезпечення даними про оптичну активність стратосферного аерозолю бази даних коефіцієнтів аерозольного послаблення. — Київ, 2011. —

44 с. — (Рукопис деп. у ГНТБ України 25.08.2011; № 66 Ук-Д2011).

2. Галкина И. Л., Зуев В. В., Крученицкий Г. М. Использование электронных таблиц Excel для изучения озоносферных процессов: архивация, анализ, моделирование // Оптика атмосферы и океана. — 2003. — 16, № 10. — С. 943–951.
3. Уокенбах Д. Професійне програмування на VBA в Excel 2007. — М.—СПБ—Київ: Діалектика, 2008. — 784 с.

Надійшла до редакції 19.09.11

*L. M. Belokrinitskaya, G. M. Kruchenitsky,
I. I. Mischishina*

THE DATABASE OF AEROSOL EXTINCTION COEFFICIENTS FROM MEASUREMENTS BY SAGE II MISSION INSTRUMENTS AT FOUR WAVELENGTHS

We describe the structure and resources of the combined database developed from the measurements of the SAGE II mission from October 1984 till April 2000 at four wavelengths: 386, 452, 525, and 1020 nm. For the database, human-friendly interface is elaborated and three levels are created. The zeroth level of the database contains some data on vertical profiles of concentrations for ozone, water vapour, nitrogen dioxide and aerosol at the four wavelengths mentioned above. The first level provides a possibility of data searching, filtering and visual analyzing, sorting the data by certain criteria and describing these criteria. The second level keeps some information on climate models and normal (standard) parameters, namely, spectral behaviour of season variations, variations of season trend and long-term variations. Besides, the possibility exists of attaching additional data on aerosol indexes which are obtained from measurements of TOMS-OMI satellites and of adding new data from Data Centres. We give some examples demonstrating possibilities of the database.

УДК 550.388, 551.520.32

Е. И. Крючков, А. К. Федоренко, О. К. Черемных

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
та Державного космічного агентства України, Київ

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОГО СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Розглянуто вплив хімічного складу верхньої атмосфери на поширення акустико-гравітаційних хвиль. Показано, що врахування багатокомпонентного складу атмосфери дозволяє пояснити спостережувані у супутникових вимірюваннях особливості цих хвиль — виділену горизонтальну довжину хвилі і частоту. Встановлено, що неоднорідність складу атмосфери може призводити до хвилевідного поширення акустико-гравітаційних хвиль навіть за відсутності вертикального градієнту температури.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным измерений на спутнике «Dynamic Explorer-2» в полярной термосфере преобладает специфическая разновидность среднemasштабных акустико-гравитационных волн (АГВ), характеризующихся выделенными частотами и длинами волн [5, 7, 8]. Эти возмущения с преобладающей горизонтальной длиной волны $\lambda_x = 500\text{—}600$ км систематически наблюдаются над полярными шапками в интервале высот 250—450 км [5]. Относительные вариации концентрации и температуры АГВ составляют несколько процентов. Полученные на основе экспериментальных данных волновые вариации разных параметров (температуры, концентрации, давления, скорости) согласуются с теорией свободно распространяющихся АГВ [6]. Однако у этих волн обнаруживаются некоторые особенности, которые не укладываются в рамки известных теоретических представлений, а именно: 1) выделенные спектральные параметры преобладают, 2) частоты АГВ превышают частоту Брента — Вайсяля для условий наблюдений, 3) амплитуды волн не зависят от высоты.

Ниже будет показано, что эти наблюдаемые особенности могут быть объяснены путем учета неоднородности состава верхней атмосферы.

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Обычно используемая теория акустико-гравитационных волн построена для идеальной однокомпонентной изотермической атмосферы с постоянным параметром вертикальной стратификации H (высота однородной атмосферы) [2, 6]. Она применима в случае, когда температура и химический состав не изменяются с высотой, что в земной атмосфере реализуется крайне редко. Поэтому представляет интерес проанализировать, как изменяются условия распространения АГВ в случае, если H зависит от высоты. В общем случае к зависимости $H(z)$ приводит изменение с высотой температуры и химического состава атмосферы.

Получим выражения для равновесных значений давления $p_0(z)$ и плотности $\rho_0(z)$ в неоднородной по составу атмосфере в рамках гидростатического равновесия атмосферы

$$\frac{\partial p_0}{\partial z} = -\rho_0 g. \quad (1)$$

В уравнении (1) вертикальная ось z направлена против ускорения свободного падения g , которое считаем постоянным. Рассмотрим верхнюю атмосферу в интервале высот 250 — 450 км, где температуру можно считать не зависящей от высоты, а каждый газовый компонент распределен в соответствии с индивидуальным высотным масштабом. Тогда на любом высотном уровне

справедливы равенства $p_0 = \sum n_i k T$, $\rho_0 = \sum n_i m_i$, где n_i и m_i — концентрации и массы молекул или атомов отдельных составляющих, а суммирование проводится по всем сортам атмосферных газов. С учетом этого обстоятельства выражение для давления можно записать в виде

$$p_0 = \rho_0 g H, \quad (2)$$

где

$$H(z) = \frac{kT(z)}{m(z)g}, \quad m(z) = \frac{\sum n_i(z)m_i}{\sum n_i(z)}. \quad (3)$$

В такой неоднородной по составу атмосфере даже при постоянной температуре скорость звука c_s зависит от высоты:

$$c_s^2 = \gamma \frac{p_0}{\rho_0} = \gamma g H, \quad (4)$$

где γ — показатель адиабаты, также зависящий от высоты.

Из выражений (1)—(3) получаем уравнения, описывающие вертикальную стратификацию $p_0(z)$ и $\rho_0(z)$:

$$\frac{1}{p_0} \frac{\partial p_0}{\partial z} = -\frac{1}{H}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} = -\frac{1}{H} - \frac{1}{H} \frac{\partial H}{\partial z}. \quad (6)$$

Видно, что высотный ход давления (5) описывается обычной барометрической зависимостью $p_0(z) = p_0(0) \exp\left(-\int_0^z \frac{dz}{H(z)}\right)$. В распределении плотности появляется дополнительное слагаемое, которое приводит к отличию стратификации равновесного давления от стратификации плотности.

УРАВНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Получим дисперсионное соотношение для АГВ, исходя из стандартных линеаризованных уравнений гидродинамики, в которых не учитываются сила Кориолиса, центробежная сила, вязкость, теплопроводность и источники, однако принимаются в расчет эффекты неоднородного состава. АГВ представим в виде возмущений плотности $\rho' = \rho - \rho_0$, давления $p' = p - p_0$, скорости смещения объема газа по горизонтали v_x

и по вертикали v_z . Горизонтальную ось x прямоугольной системы координат направим в сторону распространения волны, полагая, что волновой вектор лежит в плоскости xz . Фоновые значения плотности ρ_0 и давления p_0 не зависят от времени и горизонтальной координаты x , а их зависимость от z определяется выражениями (5), (6).

Волновые возмущения удовлетворяют следующей системе линеаризованных гидродинамических уравнений:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial z} + \frac{p'}{\rho_0} g = 0, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} v_z = \gamma \left(\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} v_z \right). \quad (10)$$

Решения этой системы ищем в виде

$$v_x, v_z, \frac{p'}{\rho_0}, \frac{\rho'}{\rho_0} \sim \exp[i(\omega t - K_x x - K_z z)]. \quad (11)$$

Компоненты волнового вектора K_x и K_z в общем случае являются комплексными величинами. Обозначим $K_z = k_z + i\chi$. Поскольку в горизонтальном направлении среда однородна, полагаем $K_x = k_x$, где k_x — действительное положительное число. Положим, что при распространении АГВ частота ω и горизонтальная составляющая волнового вектора k_x не зависят от z .

При сделанных предположениях из уравнений (4) — (11) получаем дисперсионное соотношение для АГВ в неоднородной среде:

$$\begin{aligned} & \omega^4 - \omega^2 c_s^2 (k_x^2 + \tilde{K}_z^2) + \\ & + c_s^2 k_x^2 \left[(\gamma - 1) \frac{g^2}{c_s^2} + \frac{g}{H} \frac{\partial H}{\partial z} \right] - \\ & - \omega^2 \frac{g}{H} \frac{\partial H}{\partial z} + i\gamma g \omega^2 \tilde{K}_z = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\tilde{K}_z = \frac{\partial(zK_z)}{\partial z}.$$

Уравнение (12) в случае однородной среды ($\partial H / \partial z = 0$, $\tilde{K}_z = K_z$) и при стандартном условии зануления мнимых величин [6] ($\chi = 1 / (2H)$) принимает хорошо известный вид:

$$\omega^4 - \omega^2 c_s^2 (k_x^2 + k_z^2) + c_s^2 k_x^2 \omega_b^2 - \omega^2 \omega_a^2 = 0, \quad (13)$$

где $\omega_b^2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{g}{H}$ — квадрат частоты Брента—

Вайсяля (БВ), $\omega_a^2 = \frac{\gamma g}{4H}$ — квадрат частоты акустической отсечки. При условии свободного распространения волн ($k_z^2 > 0$) из уравнения (13) следует возможность существования двух ветвей — акустической ($\omega > \omega_a$) и гравитационной ($\omega < \omega_b$). Частоты ω_a и ω_b являются граничными для свободно распространяющихся акустических и гравитационных волн, а область частот между ними является запрещенной.

В неоднородной среде выражение для \tilde{K}_z имеет вид

$$\tilde{K}_z = \frac{\partial(zk_z)}{\partial z} + i \frac{\partial(z\chi)}{\partial z} = \tilde{k}_z(z) + i\tilde{\chi}(z). \quad (14)$$

Положив $\tilde{\chi} = 1 / (2H)$ для зануления мнимых частей в (12), получаем дисперсионное уравнение с действительными значениями $\tilde{k}_z(z)$. Вид полученного уравнения совпадает с выражением (13), в котором вместо k_z^2 следует положить \tilde{k}_z^2 , а вместо ω_b^2 и ω_a^2 подставить выражения

$$\tilde{\omega}_b^2 = \omega_b^2 + \frac{g}{H} \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (15)$$

$$\tilde{\omega}_a^2 = \omega_a^2 + \frac{g}{H} \frac{\partial H}{\partial z}. \quad (16)$$

Заметим, что аналогичное выражение для $\tilde{\omega}_b$ в неизотермической атмосфере было получено в работе [1] из других соображений. Выражение для частоты $\tilde{\omega}_a$ в виде (16) получено впервые.

Обычно распространение АГВ в неоднородной среде учитывается путем разбиения среды на слои, достаточно тонкие по сравнению с вертикальной длиной волны, в каждом из которых среда считается однородной. При этом частота акустической отсечки рассчитывается в каждом слое в виде ω_a , в то время как частота БВ рассчитывается как $\tilde{\omega}_b$ (с учетом $\partial H / \partial z$). Отсюда следует, что на некоторых высотах $\tilde{\omega}_b$ может превышать ω_a , т. е. запрещенная область частот

между акустической и гравитационной ветвями исчезает. Вопрос о том, может ли ω_a превышать $\tilde{\omega}_b$, остается открытым. Из приведенных выше результатов следует, что запрещенная область между частотами $\tilde{\omega}_a$ и $\tilde{\omega}_b$ всегда сохраняется и в неоднородной среде.

Ниже будет показано, что высотное изменение параметров среды в термосфере за счет химического состава происходит очень медленно. Поэтому волновые возмущения в слабо неоднородной атмосфере с учетом (14) можно искать в следующем виде:

$$v_x, v_z, \frac{p'}{p_0},$$

$$\frac{p'}{p_0} \sim \exp(\int dz / 2H) \cdot \exp[i(\omega t - k_x x - \int \tilde{k}_z dz)], \quad (17)$$

где \tilde{k}_z медленно изменяется с высотой.

Отметим, что в неоднородной среде не сохраняется плотность волновой энергии $E \sim \rho_0 v^2$. Действительно, с учетом (2), (6) и (17) получаем $E(z) = E(z_0)H(z_0) / H(z)$, т. е. энергия волны при ее распространении вверх линейно уменьшается. При распространении волны вниз ее энергия линейно увеличивается. По этой причине распространение АГВ вниз в такой неоднородной среде не должно реализоваться.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ДАННЫМИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Параметры акустико-гравитационных волн измерялись на спутнике «Dynamic Explorer-2» в интервале высот 250—400 км. Выше турбопаузы процентное соотношение между концентрациями отдельных газов изменяется с высотой в соответствии с их индивидуальными высотными распределениями в поле силы тяжести. В нижней части упомянутого интервала высот атмосферный газ состоит в основном из атомарного кислорода О и молекулярного азота N₂, другие газы (Ar, He, H, N, O₂) являются малыми добавками. Выше 350 км концентрация He становится сравнимой с концентрацией N₂, однако преобладающим газом вплоть до высоты 500 км остается кислород. За счет уменьшения с высотой средней молекулярной массы, фоновое давление и плотность изменяются по разным законам согласно (5) и (6).

В прямых спутниковых измерениях регистрируется составляющая длины волны вдоль витка, а другие характеристики волны могут быть рассчитаны только косвенно. Частоту волны можно найти, например, из измерений вертикальной скорости и концентраций разных сортов газов. Для распространяющейся волны колебания вертикальной скорости v_z опережают в пространстве колебания вертикального смещения h элемента объема на угол $\pi/2$, при этом $v_z = i\omega h$, где ω — частота волны. Вертикальное смещение можно вычислить по соотношению концентраций двух сортов атмосферных газов [3].

Зависимость амплитуды вертикального смещения от вертикальной скорости частиц в АГВ для нескольких витков приведена на рис. 1. Для получения этой зависимости были выбраны участки витков над южной и северной полярными областями с примерно одинаковой фоновой температурой $T_n = 1000 \dots 1100$ К и высотой орбиты в среднем 250–300 км. На разных витках наблюдается общая зависимость, что указывает на наличие выделенной частоты колебаний над обеими полярными шапками, которую можно аппроксимировать методом линейной регрессии. В этом случае средняя для этих витков частота равна $9.5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (период около 660 с), однако на разных витках период изменялся в интервале 700 ± 50 с в зависимости от условий измерений.

На основе измеренной горизонтальной длины волны и вычисленного периода находим горизонтальную фазовую скорость $u_x = \lambda_x / T$. Для преобладающих значений $\lambda_x = 500\text{--}600$ км [4] и периода 700 ± 50 с горизонтальная фазовая скорость составит 670–920 м/с, что близко к скорости звука (примерно 850 м/с). Такая оценка u_x является несколько завышенной, поскольку измеряемая составляющая длины волны зависит от угла пересечения спутником волнового фронта, и поэтому всегда превышает истинное значение λ_x .

Расчет $\tilde{\omega}_b$ и $\tilde{\omega}_a$ в многокомпонентной атмосфере будем проводить с использованием стандартной модели атмосферы MSIS 90 в интервале высот наблюдения АГВ на спутнике DE2 (250–450 км). Для этого вначале получим ана-

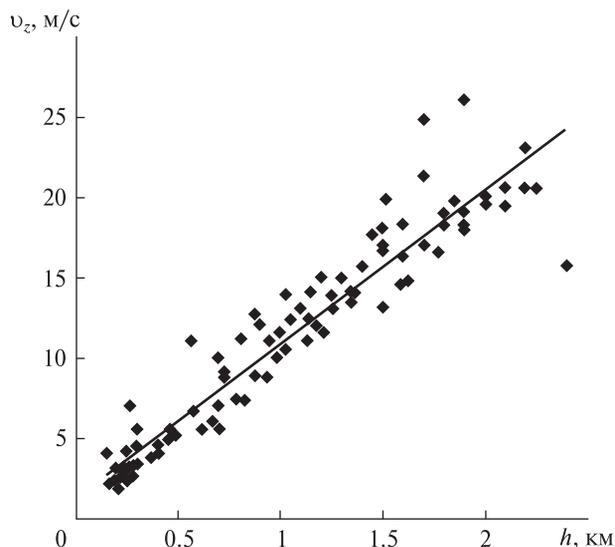


Рис. 1. Зависимость вертикальной скорости от вертикального смещения частиц при распространении акустико-гравитационных волн в полярной термосфере по данным спутника DE2

литическое выражение для добавки $\partial H / \partial z$, обусловленной изменением состава газа. Поскольку выше турбопаузы каждый газ сорта « i » распределен по высоте в соответствии с индивидуальным масштабом $n_i(z) = n_{i0} \exp(-z / H_i)$, где $H_i = kT / m_i g$, то из (3) получаем выражение

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(z)}{\partial z} &= -\frac{kT}{gm^2} \frac{\partial m}{\partial z} = \\ &= -\frac{kT}{g} \left[\frac{\sum n_i / H_i}{\sum m_i n_i} - \frac{\sum n_i \sum m_i n_i / H_i}{(\sum m_i n_i)^2} \right] = \\ &= \frac{\sum n_i \sum m_i^2 n_i}{(\sum m_i n_i)^2} - 1. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда из (15), (16) и (18) находим зависимость частот БВ и акустической отсечки от высоты, которые приведены на рис. 2. Частоты ω_a и ω_b уменьшаются с высотой за счет изменения $H(z)$ и $\gamma(z)$. Видно, что учет $\partial H / \partial z$ увеличивает $\tilde{\omega}_b$ и $\tilde{\omega}_a$ примерно на 10 % по сравнению с ω_a и ω_b и приводит к перегибу высотных профилей этих частот (выше 400 км уменьшение $\tilde{\omega}_b$ и $\tilde{\omega}_a$ замедляется и сменяется незначительным увеличением). Этот эффект обусловлен тем обстоятельством, что концентрации легкого He и тяжелого

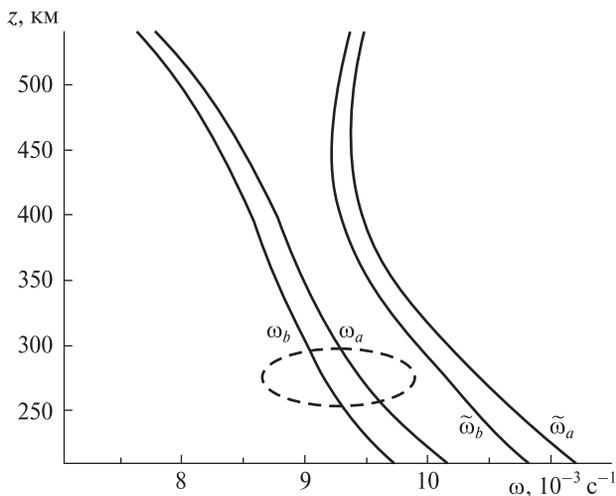


Рис. 2. Зависимости частот Брента—Вяйсяля ($\omega_b, \tilde{\omega}_b$) и акустической отсечки ($\omega_a, \tilde{\omega}_a$) от высоты в изотермической атмосфере ($T_n = 1000$ К). Частоты ω_a и ω_b соответствуют приближению однокомпонентной среды, в частотах $\tilde{\omega}_b$ и $\tilde{\omega}_a$ учтено уменьшение с высотой средней молекулярной массы. Выделенная область обозначает диапазон частот акустико-гравитационных волн, наблюдающихся на разных витках спутника DE2

N_2 на высоте 400 км примерно сравниваются, а выше уже преобладает He . По этой причине выше 400 км величина $\partial H / \partial z$ резко увеличивается, компенсируя монотонное уменьшение $\tilde{\omega}_b$ и $\tilde{\omega}_a$ с высотой.

Диапазон экспериментально наблюдаемых частот АГВ на разных витках DE2 обозначен на рис. 2 овальной областью. Без учета $\partial H / \partial z$ эти частоты попадают в основную в запрещенную теорией АГВ область частот. С учетом же этой добавки частоты наблюдаемых над полярными шапками волн оказываются близкими к $\tilde{\omega}_b$ и не превышают ее. Таким образом, измеренные частоты лежат в области теоретически допустимых значений.

ВОЛНОВОДНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Покажем, что неоднородность состава атмосферы влияет не только на граничные частоты $\tilde{\omega}_b$ и $\tilde{\omega}_a$, но и может приводить к волноводному распространению АГВ с выделенными спектральными характеристиками. Для этого представим

дисперсионное уравнение (13) в следующем виде:

$$\tilde{k}_z^2(z) = \frac{\tilde{\omega}_b^2(z) - \omega^2}{u_x^2} - \frac{\tilde{\omega}_a^2(z) - \omega^2}{c_s^2(z)}. \quad (19)$$

При фиксированных значениях ω и k_x можно вычислить $\tilde{k}_z(z)$ на каждом высотном уровне, и, проинтегрировав в рассматриваемом диапазоне высот, получить зависимость $k_z(z) = \frac{1}{z} \int \tilde{k}_z dz$. Если для АГВ с заданными ω и k_x существует область высот с $k_z^2 \geq 0$, которая сверху и снизу ограничена областями с $k_z^2 < 0$, то такая волна является захваченной. Если орбита спутника попадает в высотный интервал существования захваченных АГВ, то эти волны будут наблюдаться с большей вероятностью, чем волны, свободно распространяющиеся по вертикали. С учетом того, что спутник летит почти горизонтально, регистрироваться в основном будут АГВ, у которых направление волнового вектора близко к горизонтали, другими словами, пространственная картина волнового процесса «развернута» примерно вдоль орбиты спутника.

Зависимости $k_z^2(z)$ для АГВ приведены на рис. 3, из которого видно, что волноводный захват возможен только для определенных значений λ_x и T . Для условий верхней атмосферы изменения λ_x на 20 км при фиксированном периоде, и изменения T на 10 с при фиксированной длине вполне достаточно, чтобы захваченная волна стала свободно распространяться по вертикали. Каждому высотному уровню в верхней атмосфере соответствует выделенная λ_x , отвечающая захваченной моде АГВ.

На качественном уровне ограничение области существования АГВ некоторым высотным интервалом (z_1, z_2) можно понять из следующих соображений. Отметим, что даже при постоянной температуре частота БВ уменьшается в термосфере с увеличением высоты за счет уменьшения средней молекулярной массы, а скорость звука, наоборот, увеличивается. Из (19) следует, что для свободно распространяющихся гравитационных волн ($k_z^2 > 0$) их частота должна быть всегда меньше частоты БВ $\omega < \tilde{\omega}_b(z)$, а фазовая горизонтальная скорость всегда меньше скорости звука $u_x < c_s(z)$. Эти два условия приводят к

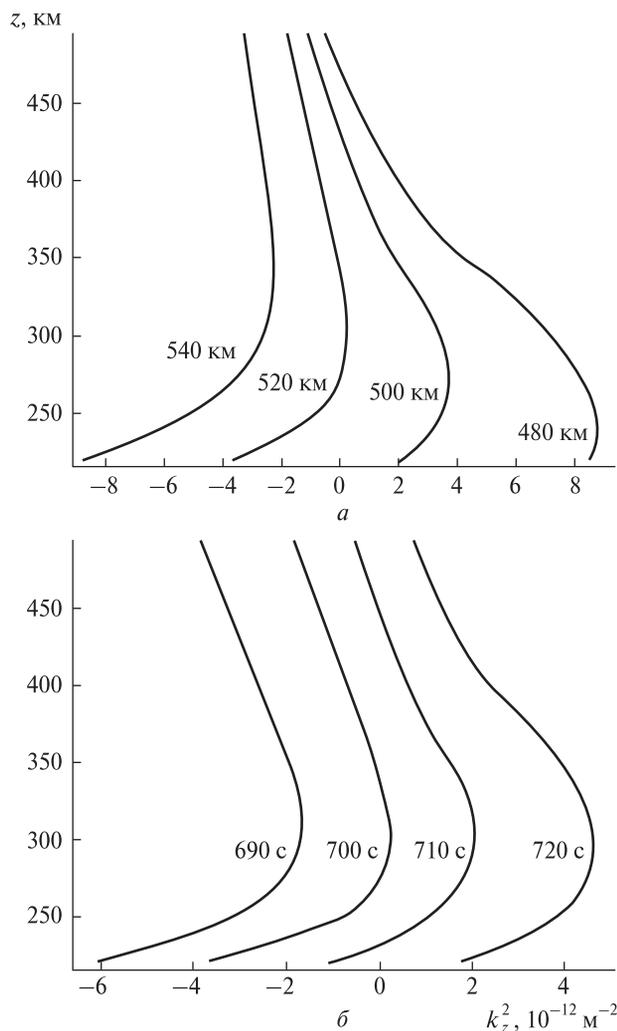


Рис. 3. Зависимости k_z^2 от высоты z : a — при фиксированном периоде $T = 700$ с и разных λ_x , b — при фиксированном $\lambda_x = 520$ км и разных периодах

возможности захвата АГВ с заданными спектральными параметрами волны ω и k_x в определенном интервале высот. Нижней границей области свободного распространения является высотный уровень z_1 , на котором $u_x \approx c_s(z_1)$, а верхней границей — уровень z_2 , где $\omega \approx \omega_b(z_2)$. Если верхняя и нижняя границы сближаются, то выполняется условие $k_x \approx \omega_b / c_s$, и поэтому горизонтальная длина волны становится выделенной $\lambda_x \approx c_s T_b$ на данной высоте.

Для характерных высот наблюдения АГВ на спутнике DE2 (250...350 км) обычно $k_z \sim 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$,

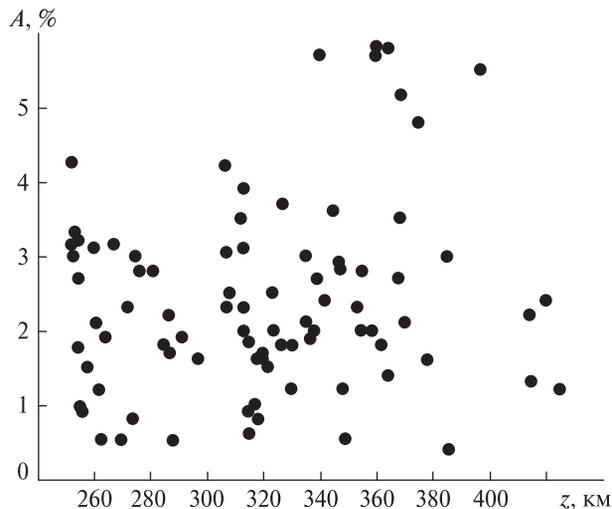


Рис. 4. Относительные амплитуды A акустико-гравитационных волн в зависимости от высоты наблюдения z по данным спутника DE2

а $k_x \sim 10^{-5} \text{ м}^{-1}$, следовательно, эти волны распространяются квазигоризонтально ($k_z / k_x \ll 1$). Длина волны захваченной моды увеличивается от 500 км на высоте $z = 250$ км до 650 км при $z = 400$ км, что совпадает с диапазоном преобладающих в спутниковых наблюдениях длин волн [4].

Теория АГВ предсказывает экспоненциальное увеличение амплитуды волны с высотой при ее распространении снизу вверх [6]. В наблюдениях на спутнике DE2 зависимость амплитуд АГВ от высоты не обнаружена (рис. 4). Это может служить косвенным подтверждением их квазигоризонтального распространения.

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние неоднородного химического состава верхней атмосферы на распространение АГВ. Показано, что учет изменения с высотой средней молекулярной массы приводит к увеличению частот Брента—Вяйсяля и акустической отсечки примерно на 10 % по сравнению с однокомпонентной средой.

Установлена возможность волноводного распространения АГВ за счет неоднородности состава в изотермической атмосфере. Волноводное распространение возможно для колебаний с частотами, близкими к частоте Брента — Вяйсяля и фазовыми горизонтальными скоростями,

близкими к скорости звука. Каждому высотному уровню термосферы соответствует характерное значение λ_x захваченной моды, которое незначительно увеличивается с высотой.

Теоретические результаты хорошо согласуются с данными спутниковых измерений АГВ. Преобладающие в наблюдениях спектральные характеристики волн (период около 700 с, горизонтальные длины волн 500–600 км) соответствуют параметрам захваченных волн. В пользу волноводного распространения АГВ также косвенно свидетельствуют большие протяженности волновых цугов и отсутствие зависимости амплитуд от высоты.

1. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
2. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли // Изв. вузов Радиофизика. — 1999. — 42, № 1. — С. 3—25.
3. Федоренко А. К. Восстановление характеристик атмосферных гравитационных волн в полярных регионах на основе масс-спектрометрических спутниковых измерений // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — 14, № 3. — С. 254—265.
4. Федоренко А. К. Энергетический баланс акустико-гравитационных волн над полярными шапками по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2010. — 50, № 1. — С. 111—122.
5. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение средне-масштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — 51, № 3. — С. 527—539.
6. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. — 1960. — 38. — P. 1441—1481.
7. Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data // J. Geophys. Res. — 2002. — 107A, N 12. — doi: 10.1029/2002JA009370.
8. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. Gravity waves near 300 km over the polar caps // J. Geophys. Res. — 1995. — 100. — P. 23993—24002.

Надійшла до редакції 17.04.11

Ye. I. Kryuchkov, O. K. Cheremnykh, A. K. Fedorenko

INFLUENCE OF THE UPPER ATMOSPHERE INHOMOGENEITY ON ACOUSTIC GRAVITY WAVE PROPAGATION

The influence of chemical composition of the upper atmosphere on the propagation of acoustic-gravity waves is investigated. It is shown that taking into account multi-component composition of the atmosphere allows one to explain the wave features observed from satellites, namely, selected horizontal wavelength and frequency. It is established that the atmosphere composition inhomogeneity can lead to the waveguide propagation of acoustic-gravity waves, even in the absence of a vertical temperature gradient.

УДК 681.785.555

В. В. Донец¹, А. Ю. Цымбал², В. В. Бровченко¹

¹ Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ

² Публічне акціонерне товариство «Завод «Маяк», Київ

МОНОБЛОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ БОРТОВЫХ И ПОЛЕВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Розглянуто моноблочні конструкції польових та бортових гіперспектрометрів для спектрометричного дослідження земної поверхні та підсупутникової валідації спектрометричних даних. Досягнення у приладобудуванні, які були апробовані в гіперспектрометрах AIS, ROSIS, CRISM, AVIRIS першого і другого покоління, втілюються у нових гіперспектрометрах та інших компактних спектрометричних приладах для дослідження земної поверхні.

ВВЕДЕНИЕ

Посредством дистанционного зондирования (ДЗ) собирается информация об объекте, территории или явлении без непосредственного контакта с ним. Методы ДЗ основаны на регистрации отраженного электромагнитного излучения участков поверхности в широком спектральном диапазоне. Принято считать [3, 4, 9], что основную информацию о природе объектов на земной поверхности содержат их спектральные характеристики. Поэтому в большинстве известных алгоритмов классификации используются спектральные образы (сигнатуры) типов покрытий.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Бортовые и полевые гиперспектральные приборы (гиперспектрометры) представляют собой датчики для регулярного сбора и предварительной обработки спектральных данных о каждом пикселе анализируемого изображения. Эта информация крайне необходима при разработке новых методов извлечения информации о состоянии исследуемого объекта, исходя из массива форм спектральных кривых (сигнатур) из гиперспектральных данных.

Класс бортовых гиперспектральных приборов начал создаваться в конце прошлого столетия в NASA (США). Первое поколение бортовых гиперспектрометров (сначала авиационного базирования) представлено инфракрасными видеоспектрометрами AIS-1 и AIS-2 (Airborne Imaging Spectrometer) [11, 14, 15, 27–29].

Бортовые гиперспектральные приборы AIS-1 и AIS-2 были выполнены по аналогии с лабораторными приборами (рис. 1). Они были испытательным полигоном как для будущих авиационных гиперспектрометров, так и космических гиперспектральных систем.

Первый полет гиперспектрометра AIS-1 был проведен в ноябре 1982 г. на борту самолета NASA/Dryden C-47, затем полеты продолжались на борту самолета NASA/Ames C-130. Прибор AIS-2 летал до 1987 г.

Несмотря на то что с помощью приборов AIS были достигнуты некоторые впечатляющие результаты, качество полученных с их помощью данных не было высоким. Соотношение «сигнал–шум» было низким (от 10:1 до 40:1), а постоянство спектрометрических параметров приемно-усилительных элементов желало быть лучшим. Сказывалось также отсутствие конструктивного подхода для стабилизации эксплуатационных параметров сложной бортовой (не лабораторной) оптико-электронной аппаратуры.

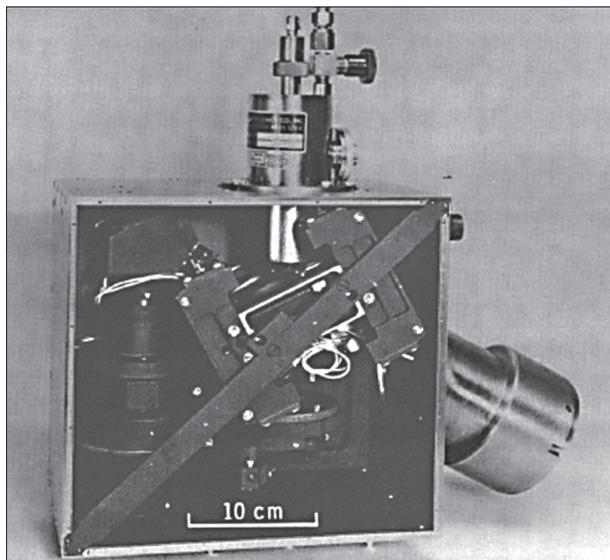


Рис. 1. Бортовой гиперспектрометр AIS-1 [11, 28]

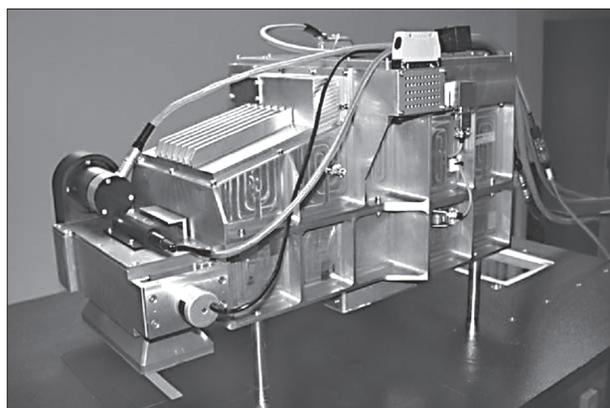


Рис. 2. Гиперспектрометр ROSIS-03 на лабораторных испытаниях [18]

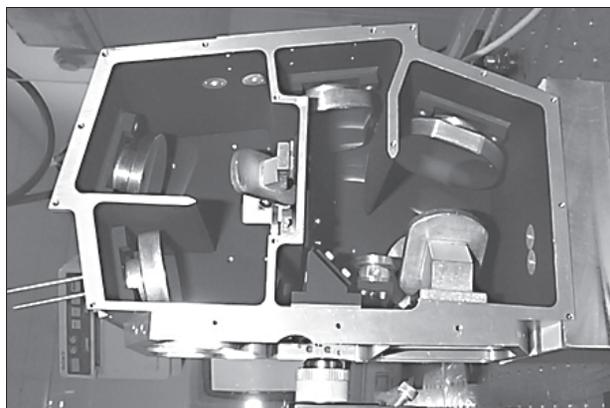


Рис. 3. Гиперспектрометр CRISM (вид сверху); видны два отдельных спектрометра [13]

В следующих поколениях бортовых гиперспектральных приборов эти недостатки были последовательно учтены. Так, в авиационных спектрометрах изображения (Imaging spectrometer) AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) [14, 16, 17, 24, 26], ROSIS-03 (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) [18] и др., а также в гиперспектральных системах космического базирования, в том числе в комплексах для исследования поверхности Луны МЗ [12] и Марса (CRISM) [13, 20], кроме узлов внутренней калибровки, были применены и новые конструктивные подходы стабилизации временных и температурных параметров оптических узлов.

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ В БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ

AVIRIS (NASA) как воздушный гиперспектрометр изображения был впервые поднят в воздух (на самолете NASA/Lockheed U-2) в 1986 г. Первые научные данные с AVIRIS были получены уже летом 1987 г., а в полном объеме этот приборный комплекс эксплуатируется с 1989 г. После полетов в 1987 г. гиперспектрометра AVIRIS обнаружилось недостатки в стабильности радиометрических и спектральных характеристик прибора AVIRIS первого поколения. Были предприняты шаги по их исправлению.

Как отмечалось выше, радиометрическая и спектральная характеристики стабильности составных спектрометров зависят от многих факторов, но главным образом — от механической и температурной стабильности взаимного расположения оптических компонентов спектрометра, особенно относительно матричного детектора.

Еще в начале разработки спектрометров AVIRIS тепловой контроль был определен как важный вопрос, поскольку несущая платформа (самолеты U-2, а затем ER-2) испытывает перепады температур от $+40^{\circ}\text{C}$ сразу же после старта до -5°C и ниже в течение долгого полета на высотах до 20 км. В приборе AVIRIS было предусмотрено автоматизированное выравнивание температур. Кроме того, все его четыре составных спектрометра были изначально изолированы от холодной среды путем использования простой системы отопления и тепловой подушки.

МОНОБЛОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗАРУБЕЖНЫХ БОРТОВЫХ И ПОЛЕВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Компоновка оптико-электронных приборов может быть моноблочной, агрегатно-модульной или смешанной [6].

Для моноблочной компоновки оптико-электронных приборов, к которым относятся и гиперспектрометры, характерна органическая целостность основных составных частей, хотя некоторые из них могут быть выполнены и в виде модулей. Жесткая моноблочная конструкция гиперспектрометра обеспечивает повышенную долговечность и надежность прибора в целом, даже при жестких условиях эксплуатации.

В 1988 г. были сделаны изменения для улучшения механической стабильности спектрометров AVIRIS. В частности, крепления составных спектрометров на приборной раме были изменены на жесткий монтаж, чтобы предотвратить деформацию каркаса и устранить причину искажений в каждом из спектрометров. Все эти и другие изменения и улучшения в комплексе позволили улучшить стабильность от ± 50 до ± 5 %.

На рис. 2 приведен общий вид гиперспектрометра ROSIS-03 авиационного базирования (Германия) [18]. Прибор состоит из соединенных между собой основных алюминиевых корпусов и дополнительных узлов. Конструкция моноблочна с жестко связанными дополнительными модулями. Механическая концепция прибора основана на тепловом контроле и активном выравнивании внутренней температуры.

На рис. 3 приведен вид сверху на моноблочную конструкцию узлов двух спектрометров гиперспектрометра CRISM [13]. CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) — это видимый инфракрасный спектрометр с изображениями развертываемых полей зрения. CRISM имеет два спектрометра, сопряженные по спектру, которые покрывают диапазон длин волн от 362 до 3920 нм со спектральным разрешением 6.55 нм/канал для идентификации широкого спектра полезных ископаемых на поверхности Марса [13, 20].

Поддержание точной калибровки приборов в широком диапазоне рабочих температур, особенно в условиях космоса — очень сложная

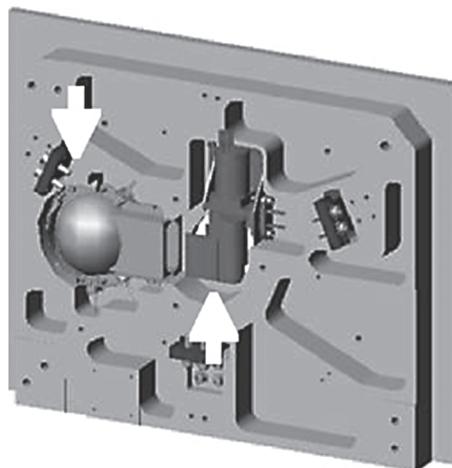


Рис. 4. Моноблочная оптическая скамья гиперспектрометра CRISM [13, 20]

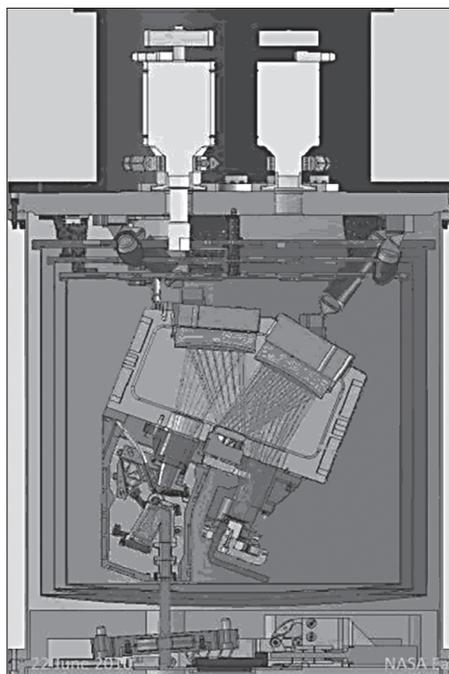


Рис. 5. Вакуумная система охлаждения и термостабилизации гиперспектрометра AVIRISng [18, 21]

задача, поскольку они становятся подвержены различным температурным условиям и накапливают облучения в пространстве. Поэтому стабильность температурных и геометрических параметров такого рода приборов становится одной из главных задач, а ее правильное конструктивное решение — залог успеха.

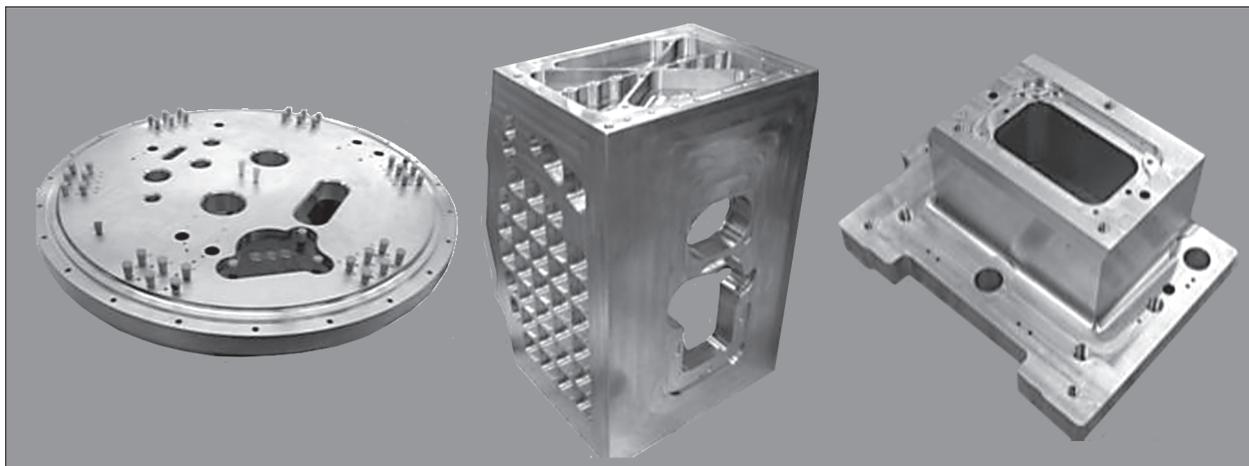
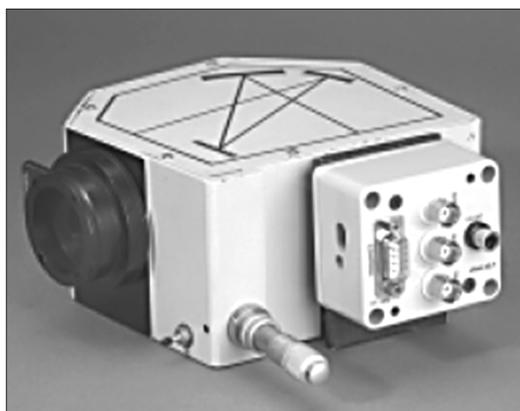
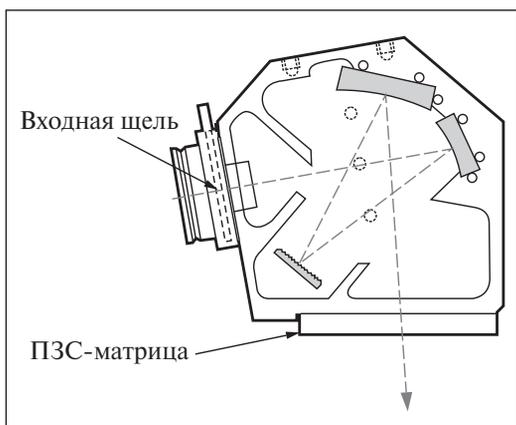


Рис. 6. Моноблочные узлы и детали гиперспектрометра AVIRISng (дно, средняя и верхняя части корпуса [18])



а



б

Рис. 7. Спектрограф MS125™ 1/8 m (а) и его оптическая схема (б) [22]



Рис. 8. Рабочее место для настройки матричного фото-приемного узла гиперспектрометра [23]

На рис. 4 показана жесткая моноблочная конструкция оптической скамьи гиперспектрометра CRISM [13, 20], на которой смонтированы телескоп с механизмом затвора (в центре), узлы двух спектрометров и узел калибровки с интегрирующей сферой (слева).

Спектрометр изображения AVIRIS до сих пор является приборным комплексом мирового класса. Он в течение 25 лет эксплуатации выдержал ряд модификаций, а с 2011 г. будет постепенно за-

менен современным гиперспектрометром нового, второго поколения (новой генерации) AVIRISng [18, 21], в котором были использованы последние достижения мировой науки и техники (см. ниже). Первый успешный полет нового прибора AVIRISng был осуществлен 26 октября 2010 г.

На рис. 5 показан гиперспектрометр AVIRISng в вакуумированном корпусе с тройной системой охлаждения и активной термостабилизации основных узлов.

На рис. 6 показаны основные моноблочные узлы и детали гиперспектрометра (дно, средняя и верхняя части корпуса).

На рис. 7 приведены фото спектрографа MS125™ 1/8 m (фирмы ORIEL Instrument) и его оптическая схема, где видна моноблочная конструкция прибора [22].

На рис. 8 приведены фото рабочего места для автоматизированной настройки моноблочного фотоприемного узла гиперспектрометра, где видна ПЗС-матрица [23].

МОНОБЛОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ В НАШИХ РАЗРАБОТКАХ БОРТОВЫХ И ПОЛЕВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

Наши технические решения при разработке гиперспектральной аппаратуры также базировались на использовании моноблочных конструкций при создании полевых специализированных аппаратурно-программных комплексов

подспутникового обеспечения для дистанционного спектрометрического зондирования растительности в полевых условиях [4, 5, 7, 25].

На рис. 9 показаны два варианта полевых спектральных приборов, входящих в автоматизированный спектральный комплекс [4, 7, 25], в которых жесткий моноблочный корпус способствует температурной стабильности геометрических и оптических параметров полихроматоров, а наличие встроенной системы спектральной калибровки по линии поглощения атмосферного кислорода позволяет повысить надежность и достоверность результатов измерительного комплекса.

При последующих разработках гиперспектральной аппаратуры был также использован принцип жесткой моноблочной конструкции.

После анализа технических требований и окончательного выбора варианта создаваемого прибора выполнялся расчет его оптической схемы с помощью специализированной программы ZEMAX-EE [30]. Затем следовали этапы разработки, изготовления и стендовой настройки основных узлов работающего макета гиперспектрометра с помощью нестандартного оборудования. Далее выполнялась разработка конструкторской документации для изготовления образцов моноблочного гиперспектрометра на дифракционной решетке и ПЗС-матрице с помощью программных пакетов AutoCAD и SolidWorks (рис. 10), а также изготовление, сборка и настройка самого образца гиперспектрометра.



Рис. 9. Общий вид полевых спектральных приборов [4, 7]

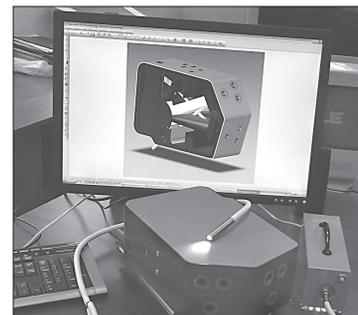
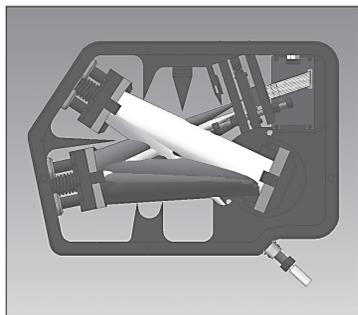


Рис. 10. Компоновка моноблочного варианта гиперспектрометра на дифракционной решетке и ПЗС-матрице

Рис. 11. Моноблочный гиперспектрометр на дифракционной решетке и ПЗС-матрице (без крышки)

Рис. 12. Образец моноблочного гиперспектрометра (внизу) и его компьютерный вариант (на экране монитора)

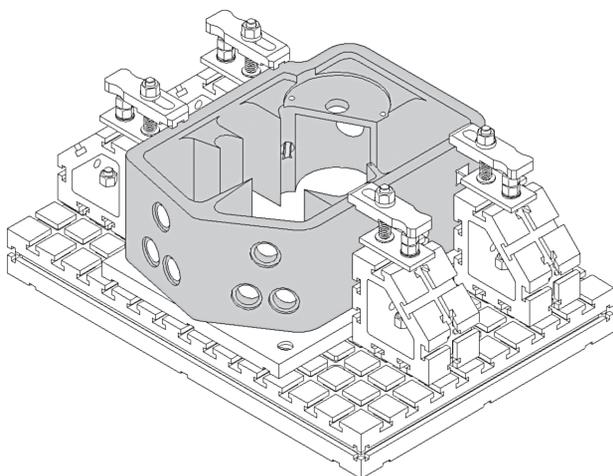


Рис. 13. Станочное приспособление для крепления моноблока

На рис. 11 приведен моноблочный гиперспектрометр на дифракционной решетке и ПЗС-матрице (без верхней крышки).

На рис. 12 приведен образец моноблочного гиперспектрометра с волоконным входом и его компьютерный вариант (на экране монитора).

Корпус гиперспектрометра был изготовлен из сплава Д16 (Al-Cu-Mg) в искусственно состаренном состоянии Т1. Этот сплав имеет повышенную коррозионную стойкость, высокие прочностные свойства и низкий коэффициент относительного удлинения [1], что позволяет использовать его в широком температурном диапазоне.

Учитывая хорошую обрабатываемость сплавов системы Al-Cu-Mg, а также высокоточное

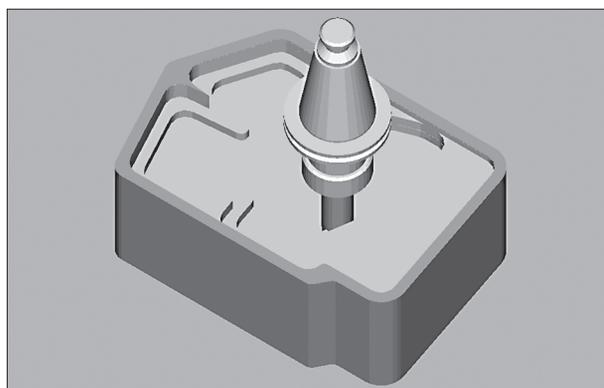


Рис. 14. Симуляция обработки моноблока гиперспектрометра в модуле NC Verify

и сложное взаимное расположение внутренних поверхностей корпусной детали, её обработку целесообразно производить на станках с ЧПУ. Технологические возможности оборудования с ЧПУ, соответствующая оснастка и современный режущий инструмент обеспечивают возможность обработки поверхностей практически любой конфигурации [2].

Нами был разработан технологический процесс, позволяющий обработать все внутренние контуры детали за две установки и тем самым ликвидировать погрешности базирования для исполнительных размеров.

На рис. 13 представлена конструкция станочного приспособления, позволяющего производить предварительную установку моноблочного

корпуса гиперспектрометра вне станка (что увеличивает производительность), а также позволяет обработать сложные внутренние контуры детали с необходимой погрешностью. Кроме того, данное приспособление не требует дополнительных гидро- или пневмосистем.

Моноблочное решение конструкции гиперспектрометра, выбор в качестве материала корпуса сплава Д16 в искусственно состаренном состоянии, а также использование станков с ЧПУ позволили получить моноблочный корпус гиперспектрометра требуемой точности, с высоким качеством поверхности, хорошо выдерживающим температурные колебания, гарантирующим в полевых условиях стабильность взаимного расположения в нем оптических узлов созданного гиперспектрального прибора. Разработка управляющей программы для станков с ЧПУ и расчет режимов резания производился в САМ модуле системы ADEM VX8.2 с последующей верификацией полученного кода.

На рис. 14 показана симуляция процесса фрезерной обработки моноблочного корпуса гиперспектрометра в модуле NC Verify.

ВЫВОДЫ

Последние разработки систем наблюдения Земли и систем подспутниковой валидации (бортовых платформ авиационного базирования и наземных систем) продемонстрировали, что гиперспектральные системы и приборы являются ценным инструментом для количественной оценки соответствующих параметров, поддерживающих процессы для наземных экосистем.

Немалую роль для обеспечения нормальной стабильной работы каждой гиперспектральной измерительной системы играет стабильность как временных, так и температурных параметров оптических трактов и узлов этих оптико-электронных приборов. Даже наличие узлов внутренней калибровки без применения правильных конструктивных подходов не позволяет достичь положительных результатов по улучшению стабильности измерительных систем и увеличению достоверности выдаваемых результатов.

В данной работе рассмотрены как общий подход к проблеме, так и особенности использова-

ния моноблочных конструкций в зарубежных и отечественных полевых и бортовых гиперспектрометрах наземного, авиационного и космического базирования (AIS-1, AIS-2, ROSIS-03, CRISM, AVIRIS первого и второго поколений и др.) для подспутниковой валидации спектротрических данных, спектротрического исследования земной поверхности, а также в компактном приборе типа CRISM для исследования поверхности Марса.

Работа частично поддержана и ведется в рамках проекта УНТЦ № 5240.

1. Белецкий В. М., Кривов Г. А. Алюминиевые сплавы. Состав, свойства, технология, применение. Справочник / Под ред. И. Н. Фридляндера. — Киев: «КОМИНТЕХ», 2005. — 365 с. — Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/231427/>
2. Виноградов Д. В. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. — М.: Полиграфия, 2003. — 301 с. — Режим доступа: http://tbmr.ru/wp-content/uploads/tech_doc/Vysokoproizv-ya_obr-ka_met-lov_rez-m.pdf
3. Дмитриев А. Н., Шитов А. В. Введение в геоинформационное картирование: Учебно-метод. пособие. — Горно-Алтайск: Горно-Алтайский госун-т, 2001. — Режим доступа: <http://www.gasu.ru/resour/eposobia/posob/7.html>
4. Донец В. В. Обґрунтування структури апаратно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2010. — 19 с.
5. Мальчевський І. А. Вископродуктивне сільське господарство з переліку завершених розробок установ НАН України, створених в рамках реалізації найважливіших напрямів наукових досліджень і розробок // Головний портал НАН України: Інноваційна діяльність. — Київ, 2011. — С. 90—97. — Режим доступа: http://www.nas.gov.ua/Activity/InnovationActivity/Documents/5_8.pdf
6. Рагузин Р. М. Принципы системного проектирования оптических приборов: Учеб. пособие. — СПб: ИТМО, 2006. — Ч. II. — 282 с.
7. Річний звіт Національного космічного агентства України за 2008 рік. — Київ: Нац. косміч. агентство України, 2008. — С. 16—17. — Режим доступа: http://www.nkau.gov.ua/pdf/NSAU_report_2008.pdf
8. Рус У. Г. Основы дистанционного зондирования. — М.: Техносфера, 2006. — 336 с.
9. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
10. Яценко В. О. Виготовлення польового спектрофотометра для тестування стану рослинності // Головний

- портал НАН України: Науково-технічні (інноваційні) проекти НАН України. — Київ, 2008. — Режим доступу: <http://www.innovations.nas.gov.ua/Years/2008/802>
11. *Bergman S. M.* The utility of hyperspectral data to detect and discriminate actual and decoy target vehicles // Lieutenant, United States Navy V. A., University of New Mexico. — 1989. — Режим доступу: http://www.nps.edu/faculty/olsen/Student_theses/bergman.pdf
 12. *Clark R. N., Boardman J., Mustard J., et al.* Mineral mapping and applications of imaging spectroscopy // IGARSS. — August 1, 2006. — Режим доступу: http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/9_Clark_Mineral/Clark_Mineral.pdf
 13. *CRISM* (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://crism.jhuapl.edu/instrument/innoDesign.php>
 14. *Fay M.* An analysis of hyperspectral imagery data collected during operation desert radiance [Електронний ресурс] // Naval Postgraduate School, Monterey, California. — 1995. — Режим доступу: http://www.nps.edu/faculty/olsen/Student_theses/Fay_Jun_1995.pdf
 15. *Goetz A. F. H., Vane G., Solomon J. E., Rock B. N.* Imaging spectrometry of Earth remote sensing // Science. — 1985. — **228**, N 4704. — P. 1147—1153.
 16. *Green R. O., et al.* Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIRIS // Remote Sens. Environ. — 1998. — **65**. — P. 227—248. — Режим доступу: <http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/ES6973/AVIRIS.pdf>
 17. *Green R. O., Eastwood M. L., Sarture C. M., et al.* Imaging Spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA. — Режим доступу: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/20277/1/98-1179.pdf>
 18. *Hamlin L., Green R. O., Mouroulis P., et al.* Imaging Spectrometer Science Measurements for Terrestrial Ecology: AVIRIS and the Next Generation AVIRIS Characteristics and Development Status // NASA Earth Science Technology Forum, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology Pasadena, CA. — 2010. — Режим доступу: http://esto.nasa.gov/conferences/estf2010/presentations/Hamlin_Green_ESTF2010_B4P4.pdf
 19. *Kim N., Schnatz G.* The Airborne Imaging Spectrometer ROSIS // German Aerospace Center, Management System Standard, Schnieringshof. — 2008. — Режим доступу: <http://www.opairs.aero/media/download/pdf/rosis-description.pdf>
 20. *Murchie S., et al.* Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) // J. Geophys. Res. — 2007. — **112**. — Режим доступу: <http://www.planetary.brown.edu/pdfs/3554.pdf>
 21. *Green R. O., et al.* Next Generation Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRISng) // JPL Earth Science Airborne Program, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA. — Режим доступу: <http://airbornescience.jpl.nasa.gov/avirisng/>
 22. *ORIEL INSTRUMENTS MS125™ 1/8 m Spectrograph, 1/8 m, Grating and Slit Ordered Separately* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://search.newport.com/?x2=sku&q2=77400>
 23. *Peschel Th., Damm Ch., Gebhardt A., et al.* Opto-mechanical design of spectrometers [Електронний ресурс] // Fraunhofer Institut Angewandte Optik und Feinmechanik. — Режим доступу: http://spectronet.de/portals/visqua/story_docs/vortraege_2008/080311_optical_spectrometer/080312_10_peschel_fhgiof.pdf
 24. *Sarture C. M., Chovit C. J., Faust J. A., et al.* High Altitude Hyperspectral Remote Sensing with AVIRIS [Електронний ресурс] // Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology 4800 Oak Grove Drive Pasadena, California. — Режим доступу: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/33488/1/94-1397.pdf>
 25. *Semeniv O., Yatsenko V., Khandriga P., Shatokhina I.* A hyperspectrometer for remote sensing of biochemical components in the vegetation [Електронний ресурс] // 37th COSPAR Scientific Assembly. 13-20 July 2008, in Montréal, Canada. — P. 2806. — Режим доступу: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008cosp...37.2806S>.
 26. *Sensor Systems of the NASA Airborne Science Program* [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://asap-data.arc.nasa.gov/sensors.doc>.
 27. *Vane G., Goetz A. F. H., Wellman J. B.* Airborne imaging spectrometer: a new tool for remote sensing // Proc. 1983 Int'l. Geoscience and Remote Sensing Symp., IEEE Cat N 83 CH1837-4.
 28. *Vane G., Goetz A. F. H., Wellman J. B.* Airborne Imaging Spectrometer: A new tool for earth remote sensing // IEEE Trans, on Geoscience and Remote Sensing. — GE-22. — 1984. — **6**. — P. 546—549.
 29. *Vane G., Goetz A. F. H.* Terrestrial imaging spectroscopy // Remote Sens. Environ. — 1988. — **24**. — P. 1—29.
 30. *ZEMAX: Software for Optical System Design* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.zemax.com>.

Надійшла до редакції 13.02.12

V. V. Donets, A. Yu. Tsybal, V. V. Brovchenko

MONOBLOCK CONSTRUCTIONS OF ON-BOARD AND FIELD HYPERSPECTROMETERS

We consider monoblock constructions of field and on-board hyperspectrometers for the spectrometric study of the Earth's surface and for the spectrometric data subsatellite validation. Some achievements in the device production which were tested in the hyperspectrometers AIS, ROSIS, CRISM, and AVIRIS of the first and second generations are implemented in new hyperspectrometers and other compact spectrometric devices for investigations of the Earth's surface.