

Я. С. Яцків¹, М. И. Мищенко², В. К. Розенбуш¹, Д. Н. Шаховской³, И. И. Синявский¹, Г. П. Мишиневский⁴, Н. Н. Киселев¹, Ю. С. Иванов¹, В. Н. Петухов¹, В. А. Данилевский⁴, 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 спостережжих 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 багатофункціональним 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, *a, b*). 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, *c–e*). 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. И. Мищенко, В. К. Розенбуш, Д. Н. Шаховской, И. И. Синявский, Г. П. Мишиневский, Н. Н. Киселев, Ю. С. Иванов, В. Н. Петухов, В. А. Данилевский, 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 общепринятыму 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 проблемы 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 «Glory», 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. Ождалось, 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 «Glory» 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 социоэкономических задач перспективного космического проекта «Аэро-

золь-UA» и обсуждение оптимального его технического решения, пред назначенного 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 коррекции 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 измеренных 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 альбедо 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 стрatosферных 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-UA». 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 альбедо 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 неучт 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 $0.25 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 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;">➡</p> <p>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 альбедо однократного рассеяния (± 0.03) <p>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 альбедо 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 информа-

ционного 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, попадающего 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 позволяет 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 цирrusных облаков, и тем самым разделить задачи определения свойств аэрозолей и циррусов. Более того, этот канал исключи-

тельно 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 МС-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 СКАНИРУЩЕГО 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-UA».

Предполагаемая оптическая схема поляриметра «СканПол» миссии «Аэрозоль-UA» 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 светофильтров, 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 точно-

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 Луны 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 «Аэrozоль-UA» просуммированы в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Ориентировочные технические характеристики орбитальной платформы «Аэrozоль-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 «Аэrozоль-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>I, Q, U</i>
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 перпендикулярным 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 копарации 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.

Робота виконяється 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. Міщенко М., Розенбуш В., Кисельов М. Поляризація світла: невидимий, 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 (Multi-configuration 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., Izquierre 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., Perlitz J., et al. Mineral dust aerosols in the NASA Goddard Institute for Space Sciences Model 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: Akademperiodyka, 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. 6786L.
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. Satoh 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., Labonne 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.
- 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.

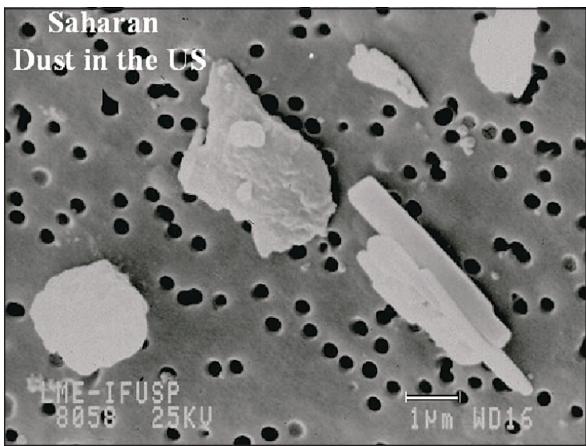
Надійшла до редакції 13.06.12



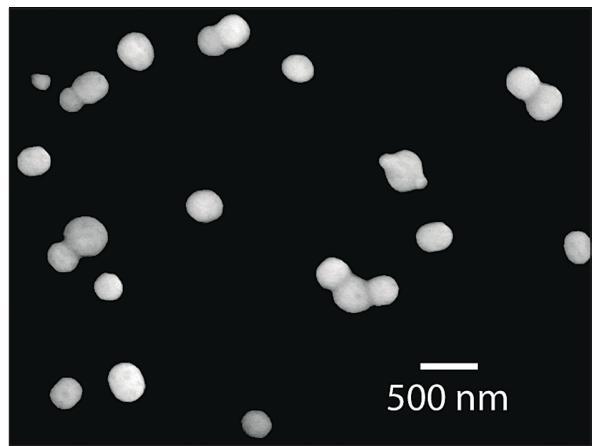
a



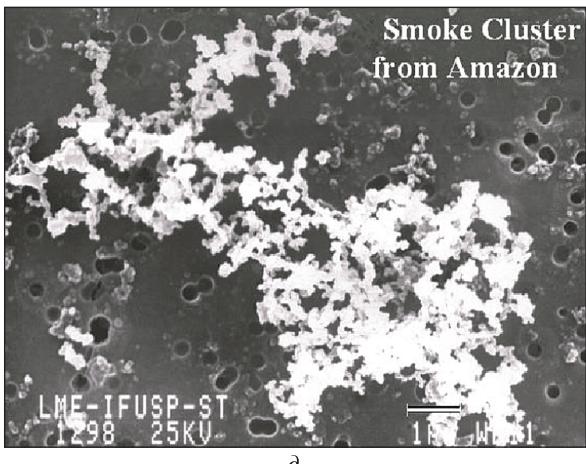
b



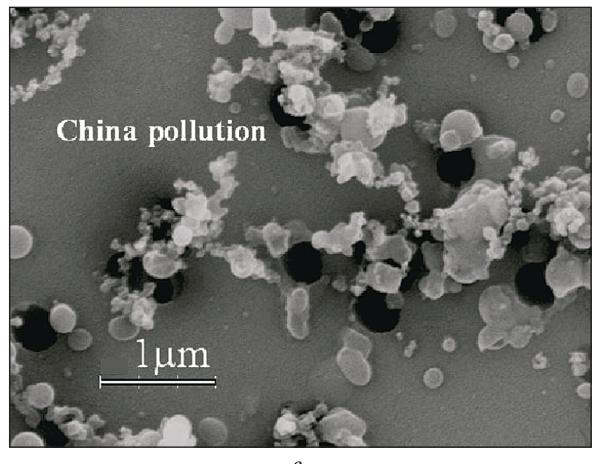
c



d



e

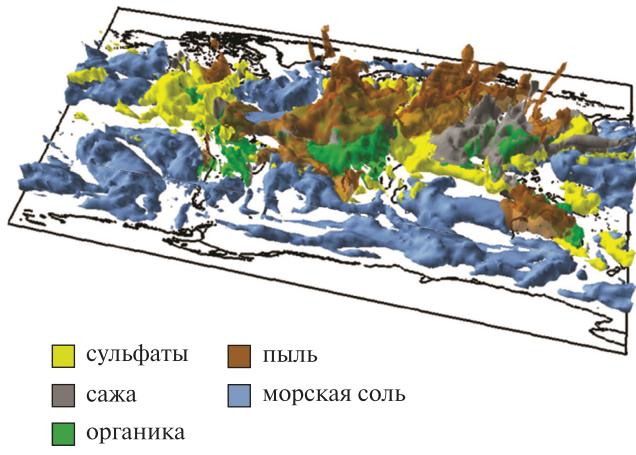


f

Рис. 1. Аэрозоли вулканического происхождения (*a*) и аэрозольная дымка антропогенного происхождения, типичная для индустриальных районов и больших городов (*b*). Электронные микрофотографии: пылевые частицы (*c*), субмикронные частицы минеральной пыли и сульфата аммония (*d*), частицы сажи (*e*) и продукты индустриального загрязнения (*f*)



a



b

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.

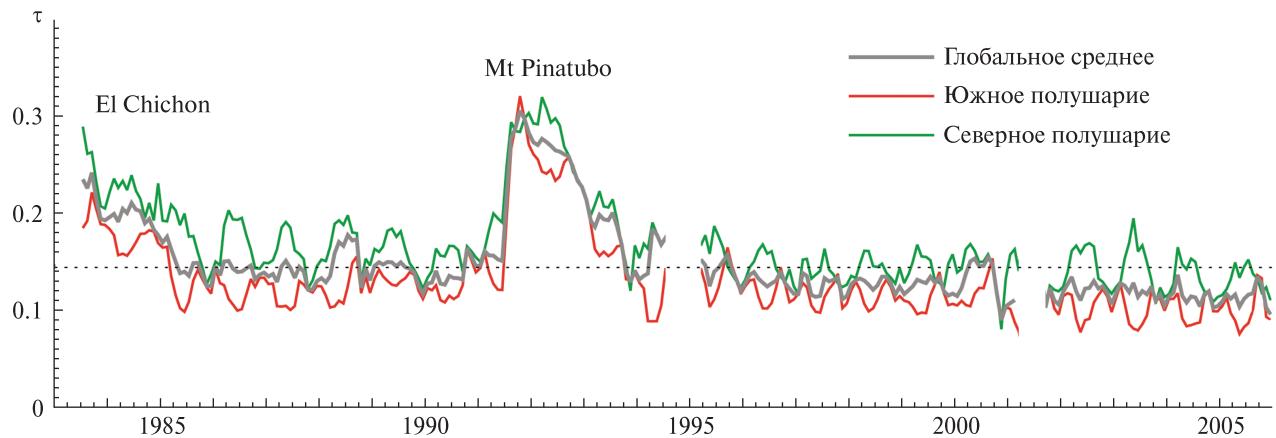


Рис. 3. Оптическая толщина τ аэрозолей на длине волны $\lambda = 550$ нм по данным программы GACR. Горизонтальная линия показывает глобальную оптическую толщину, усредненную за четыре года, предшествовавших извержению вулкана Mt Pinatubo

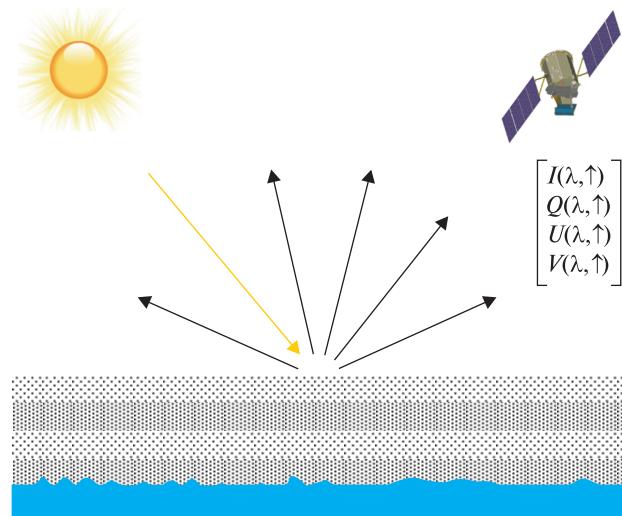


Рис. 4. К объяснению классификации пассивных инструментов дистанционного зондирования, измеряющих характеристики диффузно отраженного солнечного света. Параметры Стокса I, Q, U, V отраженного света изменяются с длиной волны света λ и с направлением отражения

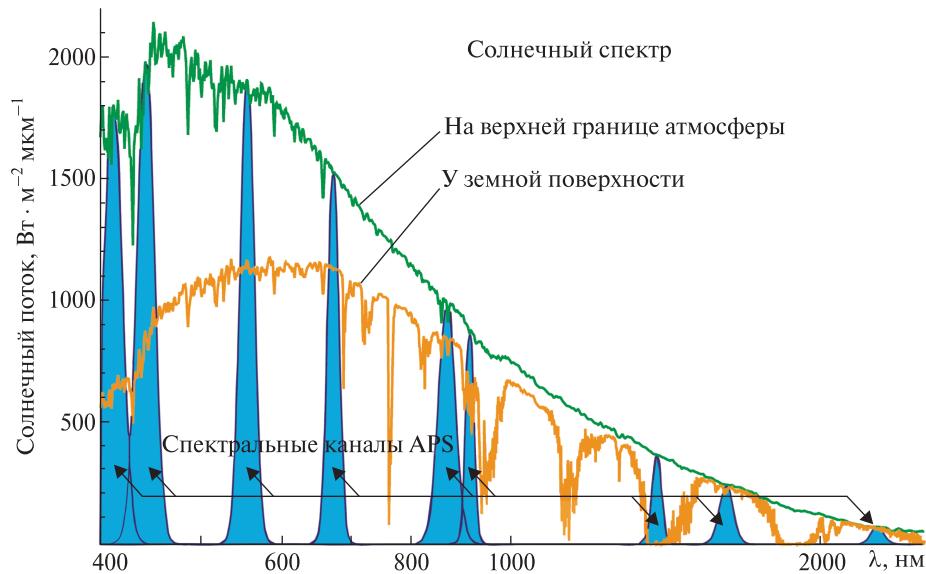


Рис. 5. Распределение энергии в спектре Солнца на верхней границе атмосферы и у поверхности Земли и расположение полос пропускания девяти фильтров, используемых в поляриметре APS

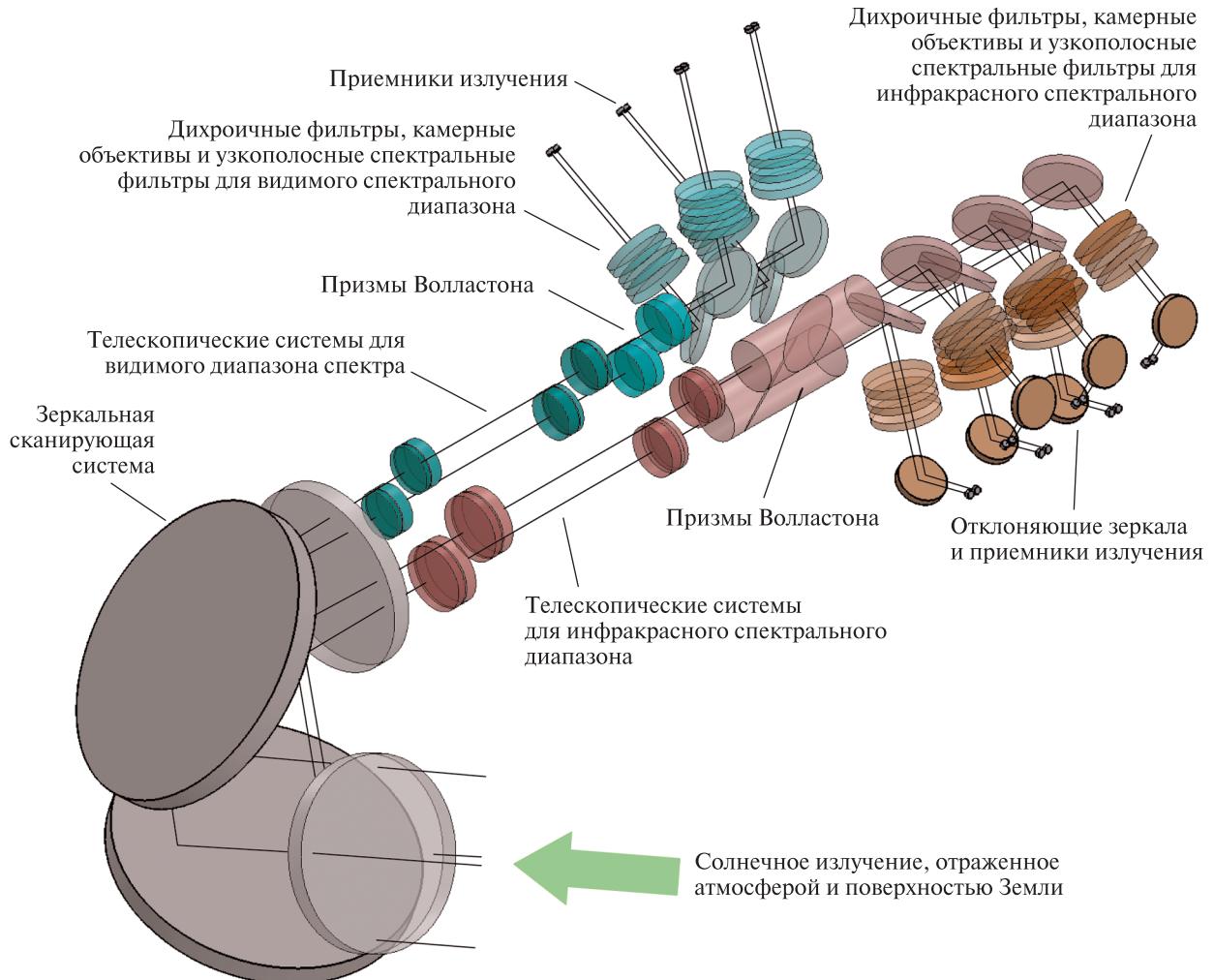


Рис. 6. Оптическая схема поляриметра «Аэрозоль-UA»

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

