

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.78

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ АКТИВНОГО МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ КОСМОСА

А. В. Карелин, В. В. Хегай

Рассмотрена целесообразность дистанционного мониторинга из космоса атмосферных аэрозолей посредством лидарного зондирования. Наличие в атмосфере рассеивающих аэрозолей приводит к негативному радиационному эффекту, то есть к охлаждению поверхности Земли. Показано, что для лучшего понимания влияния аэрозолей на климат необходимы дополнительные наблюдения с помощью дистанционного зондирования со спутников. Предложено создание специализированной космической системы глобального мониторинга атмосферы Земли на базе орбитальной группировки малых космических аппаратов, оснащенных комплексами космических аэрозольных лидаров.

Ключевые слова: орбитальная группировка, дистанционное зондирование, космический аппарат, лидар, аэрозоли, радиационный баланс, оптическая толщина, ядра конденсации, интеркалибровка, валидация.

В глобальном масштабе аэрозоли являются главным, после облаков (которые являются тоже аэрозольными образованиями), регулятором потоков солнечной радиации в земной атмосфере. Аэрозольные слои поглощают также тепловое (собственное) излучение атмосферы и подстилающей земной поверхности, оказывая дополнительное влияние на энергетический баланс климатической системы Земли. За последние два с половиной века (с доиндустриальных времен) в атмосфере Земли не только сильно увеличилась концентрация парниковых газов (углекислого газа, метана и др.), но и существенно изменился состав и содержание аэрозоля, влияющего на радиационные потоки в атмосфере [1].

Впервые возможность аэрозольного воздействия на облака с образованием осадков была указана в 1946 году Бернардом Воннегутом. Он обнаружил, что микроскопические кристаллы йодида серебра могут служить ядрами конденсации водяного пара и способствовать образованию ледяных кристаллов [1, 2]. Йодид серебра до сих пор наиболее широко используется для так называемого засева облаков, хотя теперь это уже далеко не единственный препарат, вызывающий искусственное образование осадков.

Для генерации ледяных частиц при температурах ниже -40°C могут быть использованы также сухой лед и жидкая уголекислота, жидкий азот, жидкий пропан и др. Они распыляются с самолетов в верхней части облачности. Засев теплых облаков йодидом серебра и сухим льдом малоэффективен в случае относительно высоких температур воздуха.

Исторически сложилось так, что в СССР, а затем и в России работами по активному региональному воздействию на облака, туманы и осадки для предотвращения опасных и/или нежелательных метеорологических явлений занимались и продолжают заниматься учреждения Росгидромета (в прошлом Госкомгидромет СССР). Искусственное вмешательство в процессы облако- и осадкообразования в переохлажденных облаках и туманах

осуществляется преимущественно с помощью йодида серебра и твердой уголекислоты.

Целью настоящей работы является оценка целесообразности активного мониторинга атмосферного аэрозоля из космоса посредством лидарного зондирования для более надежного прогноза изменения климата Земли.

За последние десятилетия наши представления об атмосферных аэрозолях значительно расширились в плане их типов, физических свойств, химического состава, радиационных эффектов и гигроскопических свойств благодаря развитию методов наблюдения и разработке моделей [3]. Для моделирования выбросов пыли и их взаимодействия с климатом используются глобальные и региональные модели погоды/климата. Однако большая пространственно-временная неоднородность источников пыли, от гигантских песчаных дюн до небольших гребней и борозд на сельскохозяйственных полях, от недолговечных пыльных бурь, длящихся несколько минут, до глобального переноса аэрозолей в течение нескольких недель, чрезвычайно затрудняет моделирование цикла аэрозолей (выбросы, перенос и осаждение) в климатических моделях. Исследования показывают, что большинство глобальных климатических моделей не воспроизводят ключевые аспекты аэрозольного цикла по сравнению со спутниковыми и наземными наблюдениями, частично из-за плохого моделирования циркуляций. Поскольку эти модели все чаще используются для проведения исторического, а также будущего моделирования климата, существует настоятельная необходимость в улучшении общего представления аэрозольного цикла и взаимодействия аэрозолей и климата в моделях.

Действие аэрозолей, вызывающее метеорологические и климатические эффекты, имеет двойное направление: воздействие на процессы облако- и осадкообразования путем изменения микро-структуры облачных частиц; воздействие на про-

цессы переноса солнечной и тепловой радиации в атмосфере и тем самым на температурный режим климатической системы Земли.

Воздействие аэрозолей обычно подразделяется на прямое и косвенное [1]. Прямое воздействие заключается в том, что аэрозоли рассеивают и поглощают солнечное и тепловое излучения и тем самым изменяют радиационный баланс атмосферы и подстилающей поверхности. Существенное прямое воздействие на потоки солнечного и теплового излучения оказывают аэрозоли, содержащие сульфаты, органический углерод и сажу от сжигания топлива и биомассы, а также пыль, попадающие в атмосферу и на поверхность Земли в результате хозяйственной деятельности.

Основными оптическими параметрами аэрозолей, определяющими вызываемый ими радиационный эффект, являются альбеда единичного рассеяния, коэффициент ослабления электромагнитного излучения и индикатриса рассеяния [4]. Все эти параметры зависят от длины волны излучения, содержания аэрозоля в атмосфере, относительной влажности воздуха. Необходимо также знать горизонтальное и вертикальное распределение аэрозольных слоев, оптические свойства облаков и подстилающей поверхности Земли. Наличие в атмосфере рассеивающих аэрозолей приводит к негативному радиационному эффекту, то есть к охлаждению поверхности Земли. Однако даже частично поглощающие аэрозольные образования над яркими (рассеивающими) поверхностями (облака, снег, лед, пустыни) могут способствовать росту приповерхностной температуры воздуха, а над темными (поглощающими) поверхностями (океан или лес) – ее снижению.

Косвенное климатическое воздействие аэрозолей проявляется преимущественно в изменении под их влиянием радиационных свойств (поглощения и отражения) облаков, а также времени их жизни в атмосфере [4].

Одна из основных неопределённостей, связанных с взаимодействием пыли и климата, обусловлена недостаточным учётом источников аэрозолей (пыли), выбросов и минеральных компонентов. Параметризация пыли, используемая в настоящее время в большинстве схем моделирования пыли, была получена либо в аэродинамической трубе, либо в ходе полевых экспериментов, которые из-за зависимости от масштаба дают нереалистичные потоки выбросов при глобальном применении. К сожалению, не было достигнуто существенного прогресса в улучшении потоков выбросов пыли, учитывая большое разнообразие природ-

ных и антропогенных источников пыли. В последнее время в этом направлении было предпринято несколько заметных попыток (например, [5]), но разумное представление потоков пыли в климатических моделях остаётся серьёзной проблемой.

Оптическая толщина аэрозоля (*Aerosol Optical Depth* – AOD) – это показатель того, сколько солнечного излучения блокируется пылевыми аэрозолями во всей толще атмосферы. В большинстве модулей пыли, используемых в климатических моделях, потоки выбросов пыли рассчитываются с помощью простых уравнений, изначально полученных в результате экспериментов в аэродинамической трубе или в полевых условиях [3]. Эти уравнения позволяют рассчитать, сколько пыли выбрасывается в атмосферу (вертикальный поток пыли) в основном в зависимости от поверхностных ветров, распределения частиц почвы по размерам, влажности почвы, подверженности почвы эрозии и содержания глины. Когда такие мелкомасштабные параметризации используются для расчёта выбросов в глобальном/региональном масштабах в глобальных/региональных моделях, они должны быть проверены с помощью соответствующих наблюдений. В противном случае рассчитанные потоки пыли будут нереалистичными. Это одна из причин, по которой различные модели пыли, используемые в настоящее время, дают разные оценки глобальных выбросов пыли – от 500 до 5000 Тг/год [6].

Чтобы решить проблему, описанную выше, обычно ограничивают выбросы пыли в моделях с помощью наземных наблюдений или спутниковых данных [3], используя параметр настройки, который итеративно корректируется до тех пор, пока не будет достигнуто желаемое соответствие между прогнозируемой и наблюдаемой оптической толщиной аэрозоля. Этот параметр настройки очень чувствителен к пространственному и временному разрешению, поэтому важно определять этот параметр настройки для каждой модели отдельно, а не использовать заданные значения в конфигурации модели по умолчанию. Неправильно настроенные модели, используемые для моделирования климата в прошлом, настоящем или будущем, могут давать нереалистичные значения AOD. Следовательно, последующие процессы, связанные с взаимодействием пыли и радиации, а также пыли и облаков, могут быть смоделированы некорректно, что, в свою очередь, может привести к искажению влияния пылевых аэрозолей на климат. Другой важный вопрос заключается в том, что при настройке модели пыли для получе-

ния желаемого показателя AOD мы, по сути, предполагаем, что модель хорошо воспроизводит содержание других видов аэрозолей или что они менее важны. Несмотря на то, что существует утверждение, что пыль является основным источником AOD в пустынных районах [3], в некоторых регионах, где морская соль, сжигание биомассы, органические и другие антропогенные аэрозоли могут вносить значительный вклад в общий показатель AOD, это может быть не так. Более эффективный метод определения вклада различных типов аэрозолей в общее количество аэрозолей в атмосфере ещё предстоит изобрести, и это ключевая тема для дальнейших исследований [3].

Недавние полевые и лабораторные измерения показывают, что показатель преломления пыли в длинноволновом диапазоне варьируется в зависимости от региона, особенно мнимая часть [5]. Ещё одним фактором, влияющим на оптическую толщину пыли, являются минеральные компоненты пылевых аэрозолей, которые определяют как физические, так и химические свойства пылевых аэрозолей, в частности поглощение солнечного излучения пылевыми аэрозолями. Данные наблюдений демонстрируют значительные пространственные вариации минеральных компонентов пыли (например, оксидов железа) в глобальном масштабе [7]. Однако большинство современных климатических моделей предполагают, что все частицы пыли в атмосфере состоят из одних и тех же минеральных компонентов, и поэтому используют постоянное во всём мире значение мнимой части показателя преломления пыли, который определяется минеральными компонентами пыли [3]. Таким образом, при разработке будущих моделей пылевые аэрозоли следует рассматривать как различные минеральные компоненты, чтобы лучше оценивать общую оптическую толщину пыли, а также поглощающую оптическую толщину пыли, которая играет важную роль во взаимодействии пыли с климатом [8].

Вертикальное распределение аэрозоля – ещё один важный аспект, который часто упускают из виду при проведении глобальных/региональных климатических симуляций [3], указывающий на то, сколько аэрозоля находится в атмосфере на разных высотах. Вертикальное распределение аэрозолей влияет на физические процессы как у поверхности, так и в верхних слоях атмосферы. Например, если вертикальное распределение концентрации аэрозолей нереалистично, модель покажет нереалистичные значения PM₁₀/PM_{2,5} (отношение содержания аэрозолей размером менее 10 мкм и менее 2,5 мкм)

у поверхности, даже если общая концентрация аэрозолей в столбе воздуха верна. Это может привести к серьёзным последствиям в области контроля качества воздуха. Аналогичным образом, если концентрации аэрозолей в верхних слоях атмосферы нереалистичны, отношения концентраций ядер конденсации в облаках (*Cloud Condensation Nuclei* – CCN) или ледяных ядер (*Ice Nuclei* – IN) будут неточными, и, следовательно, это повлияет на такие свойства облаков, как их толщина, высота и соотношение гидрометеоров (например, дождя, града, снега и льда).

В приведенном выше контексте данные лидара, которые доступны с нескольких наземных станций, самолетов и спутниковых платформ по всему миру, могут быть полезны для определения вертикального распределения аэрозолей в моделях. Сеть микроимпульсных лидаров (*Micro-Pulse Lidar Network* – MPLNET), поддерживаемая Центром космических полётов имени Годдарда (*Goddard Space Flight Center* – GSFC, НАСА), представляет собой сеть лидаров MPL, и по всему миру доступен огромный объём данных о вертикальном профиле [9]. Другие скоординированные лидарные сети включают Европейскую лидарную сеть по исследованию аэрозолей (*European Aerosol Research Lidar Network* – EARLINET), Немецкую сеть аэрозольных лидаров, Латиноамериканскую лидарную сеть (*Lidar Network in Latin America* – LALINET), Азиатскую сеть лидарных наблюдений за пылью и аэрозолями (*Asian Dust Network* – AD-Net) [3] и Лидарную сеть Содружества Независимых Государств (*Lidar Network for Monitoring Aerosol and Ozone in CIS Regions* – CIS-LiNet, Россия – Беларусь – Киргизия) [10]. Эти данные можно использовать для проверки или ограничения прогнозируемого моделью вертикального распределения аэрозолей.

Идея лидарной сети основана на измерении временной структуры света импульсного лазера, рассеянного разными участками атмосферы, по которой можно получить информацию о газовых, аэрозольных и метеорологических характеристиках воздуха с большим пространственно-временным разрешением по трассе зондирования. Лазерные приборы для решения указанных задач называются лидарами.

Лидарная техника, эксплуатируемая в разных регионах, будет наиболее эффективна, если на основе измерений создать единый банк данных загрязнения атмосферы огромных территорий. Это возможно только тогда, когда разные лидарные станции объединены в одну сеть, где осуществлена интеркалибровка приборов и методик и проводится

мониторинг состояния атмосферы по общим для всех правилам. Первой такой сетью стала EARLINET, созданная в 2000 г. и включавшая лидары 12-ти государств. В ее организации принимала участие и Беларусь. Полученный опыт позволил минчанам вместе с томскими коллегами перейти к организации лидарной сети на территории бывшего Советского Союза. В 2004 – 2007 гг. она была создана и названа CIS-LiNet [10]. Она включает 7 лидарных станций, расположенных в Минске (Беларусь), Томске, Москве, Владивостоке, Сургуте, в районе озер Байкал (Россия) и Иссык-Куль (Киргизия).

Технические требования к лидарным системам CIS-LiNet: зондирование тропосферного аэрозоля на трех длинах волн (355, 532 и 1064 нм) и наличие канала регистрации комбинационного рассеяния азотом на длине волны 387 или 607 нм. На некоторых станциях измеряют деполяризацию рассеянного излучения.

Как показали результаты многих полевых наблюдательных экспериментов (ACE-1, ACE-2, ARM, КЭНЭКС, TARFOX и др.), локальные и даже среднерегиональные значения радиационного возмущающего воздействия за счет аэрозоля могут достигать 20 Вт/м^2 , намного превышая обусловленное аэрозолем среднелобальное радиационное возмущающее воздействие (порядка нескольких Вт/м^2) [4]. Поэтому необходимы дальнейшие серьезные усилия для накопления адекватной информации об аэрозоле по данным наблюдений в глобальных масштабах, которая позволит достаточно надежно оценить прямое воздействие (в том числе антропогенное) аэрозоля на климат. Хотя для решения этой задачи решающее значение имеют данные наблюдений (включая результаты наземного и спутникового дистанционного зондирования), не менее важную роль должны сыграть лабораторные исследования свойств аэрозоля и дальнейшее развитие численного моделирования воздействия аэрозоля на климат. Еще более трудным является учет косвенного воздействия аэрозоля на климат посредством влияния частиц аэрозоля, как облачных ядер конденсации, на физические свойства (особенно альбедо) облаков и протекающие в облачных каплях химические реакции.

Осуществленные проекты космического лидарного зондирования [11] позволили существенно пополнить знания об атмосфере и Земле в целом, доказали высокую эффективность и техническую реализуемость различных комплексов лидарного зондирования атмосферы.

В настоящее время на околоземной орбите функционирует только один космический китайский спутник мониторинга атмосферной среды нового поколения «Даци-1» (Daqi-1, DQ-1), успешно запущенный в апреле 2022 года и оснащенный лидаром обнаружения аэрозолей и углекислого газа (*Aerosol and Carbon Dioxide Detection Lidar – ACDL*), который способен глобально профилировать оптические свойства аэрозолей и облаков с высокой точностью [12]. ACDL/DQ-1 – это лидар с высоким спектральным разрешением (*High Spectral Resolution Lidar – HSRL*), который разделяет молекулярные сигналы обратного рассеяния с помощью йодного фильтра и имеет обнаружение поляризации 532 нм и двухволновое обнаружение на 532 и 1064 нм, что может использоваться для получения оптических свойств аэрозолей.

При зондировании в спектральном интервале 0,35 – 1,06 мкм совместное использование спектров обратного рассеяния и экстинкции позволяет определять размер и комплексный показатель преломления частиц с радиусами $0,1 < r < 1,5 \text{ мкм}$ [13, 14].

В настоящее время лазерные технологии Российской Федерации (РФ) позволяют создать низкоорбитальную группировку спутников, оснащенных многоволновыми рамановскими лидарами на основе Nd:YAG-лазера, измеряющего три коэффициента обратного рассеяния (355, 532, 1064 нм) и два коэффициента экстинкции (387, 608 нм) аэрозоля [11, 13, 14]. При использовании алгоритма решения обратной задачи зондирования на основе метода регуляризации Тихонова такой лидар способен определять размер и комплексный показатель преломления атмосферного аэрозоля.

Мобильные лидары в CIS-LiNet предназначены не только для проведения исследовательских работ, но и для реализации программы интеркалибровки и валидации лидарной аппаратуры. Один из таких лидаров был создан в последние годы в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСО СО РАН) [15].

Малогабаритный аэрозольно-рамановский лидар «ЛЮЗА-М2» работает на частотах упругого и комбинационного рассеяния света. Он предназначен для контроля оптического состояния тропосферы и стратосферы до высот 20 км с пространственным разрешением 3 – 15 м. Области применения разработанного лидара охватывают как фундаментальные исследования по оптике атмосферы, так и многие прикладные задачи. В задачах климатологии лидар используется для оперативной оценки оптического состояния атмосферы, в том числе для валидации различных оптических спутниковых

систем. В задачах экологического контроля лидар может применяться для оценки интенсивности выбросов локальных источников загрязнений и картирования их аэрозольных шлейфов над городом. Функционально лидар состоит из приемо-передатчика и системы управления, регистрации сигналов и обработки информации. Для регистрации лидарных сигналов реализовано два режима: аналого-цифровое преобразование и режим счета фотонов. Приемная система оснащена двумя оптическими системами ближней и дальней зоны, что позволяет одновременно получать информацию о структуре атмосферы в диапазоне 0,05 – 40 км, охватывая приземный и пограничный слой, тропосферу и стратосферу.

В лидаре «ЛОЗА-М2» полностью реализована схема одновременного наблюдения лидарных сигналов упругого и комбинационного рассеяния при облучении среды на лазерных длинах волн 1064 и 532 нм. Лидар сконструирован на основе Nd:YAG-лазера и приемного зеркального телескопа системы Кассегрена диаметром 230 мм. Основные параметры лидара: энергия излучения на длинах волн 1064 нм – 230 мДж, 532 нм – 150 мДж. Диаметр зондирующего луча 50 мм, расходимость 0,5 мрад. Поле зрения приемника 1 мрад. Кроме эхосигналов упругого рассеяния, лидар регистрирует сигналы комбинационного рассеяния (КР) на молекулярном азоте (607 нм). Расстояние от основного зеркала до излучателя (база лидара) составляет 0,3 м. При выбранных базе и поле зрения лидара рабочая зона лидара начинается с расстояния 100 м, что позволяет устранить сигнал от ближней зоны, выходящий за рамки динамического диапазона фотоприемников. Кроме указанного на схеме зеркала, вблизи излучателя (база 20 см) установлен второй приемный телескоп с объективом диаметром 70 мм для приема сигналов из ближней зоны (70 м).

Система спектрального разделения принимаемых сигналов основана на последовательном расщеплении пучка с помощью дихроичных пластинок. Ослабление излучения возбуждающей линии с помощью обрезаящих фильтров в сумме с интерференционными светофильтрами, установленными на каждом фотоприемнике, позволяет осуществить подавление возбуждающего излучения (532 нм) на каналах комбинационного рассеяния на уровне 10^{-6} для $\lambda = 607$ нм, и на уровне 10^{-7} для канала $\lambda = 1064$ нм. Сигналы упругого рассеяния на $\lambda = 532$ нм регистрируются в токовом режиме фотозлектронными умножителями (ФЭУ) ФЭУ-84 с оригинальными блоками питания (разра-

ботка ИОА СО РАН). Они позволяют устранить влияние фоновых солнечных засветок на чувствительность ФЭУ. При частоте повторения импульсов лазера 10 Гц и накоплении фотонов в течение 30-ти минут сигналы КР на молекулярном азоте в отсутствие облачности уверенно регистрируются до высоты тропопаузы. Лидарные сигналы КР водяным паром на длине волны 407 нм показывают возможность регистрации водяного пара до высот 2 – 4 км в зависимости от синоптических условий.

Основное эксплуатационное достоинство лидара – это комплексное сочетание различных технических и методических подходов. Применение различных режимов регистрации сигналов повышает потолок зондирования как минимум в 3 – 4 раза по сравнению только с аналоговым режимом и позволяет эксплуатировать лидар в любое время суток. Преимущество разработанного оборудования перед существующими зарубежными аналогами заключается в следующем:

- Лидар позволяет одновременно регистрировать сигналы в аналоговом и счетно-фотонном режимах. Это значительно расширяет диапазон, начиная от приземного слоя до тропосферы.
- Наличие двух приемников, ближней и дальней зон, позволяет синхронно исследовать динамические ситуации по формированию аэрозольных полей в пограничном слое и тропосфере. Приемники с помощью оригинальной оптической системы работают одновременно при одной посылке лазерного излучения.
- Наличие оригинального аналогового фотомодуля, разработанного ИОА СО РАН, позволяет исследовать параметры атмосферы в условиях интенсивных солнечных помех. При этом чувствительность лидара не меняется.
- Компактные размеры позволяют использовать лидар в комплексных полевых экспедициях, оперативно доставляя лидар в пункт измерений.
- Совместное использование эффектов упругого и неупругого рассеяния в лидарной технологии улучшает качество получаемой атмосферной оптической информации. Погрешность измерений уменьшается в 2 – 3 раза. А по результатам многоволнового зондирования оценивают спектр размеров аэрозольных частиц.

В 2009 году малогабаритный аэрозольно-рамановский лидар «ЛОЗА-М2» на Международной выставке «Фотоника-09» удостоен диплома лауреата конкурса Международной научно-технической организации «Лазерная ассоциация», как одна из лучших отечественных разработок в области лазерного приборостроения [15].

Однако, таких лидаров, пусть даже и мобильных, недостаточно для глобального мониторинга аэрозольного состава атмосферы в целях предсказания изменений погоды и климата вследствие их локализации только в достаточно доступных местах на территории РФ и ограничений диапазона измерений по высоте до 20 – 30 км. Поэтому для глобального мониторинга верхней атмосферы Земли (свыше 30 км) над всей территорией РФ и за её пределами требуется достаточно обширная орбитальная группировка спутников (не менее 10-ти КА), оснащенных аэрозольными лидарами.

Таким образом, для лучшего понимания влияния аэрозолей на климат необходимы дополнительные наблюдения с помощью дистанционного зондирования со спутников. Параметры аэрозолей следует усовершенствовать на основе спутниковых наблюдений. Моделирование с высоким разрешением, учитывающее прямое и косвенное влияние аэрозолей, может раскрыть различные физические механизмы взаимодействия аэрозолей с климатом.

Литература

1. Гинзбург, А. С. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат / А. С. Гинзбург, Д. П. Губанова, В. М. Минашкин // Российский химический журнал (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2008. – Т. LII. – № 5. – С. 112–119.
2. Weather and Climate Modification. Problems and Prospects. Report of the special commission on weather modification : [in 2 vol.] / NAS-NRS. – Washington, D.C., 1966. – № 1350.
3. Parajuli, S. P. Atmospheric dust: How it affects climate, environment and life on Earth? / S. P. Parajuli, Q. Jin, D. A. Francis. – DOI : 10.3389/fenvs.2022.1058052 // Front. Environ. Sci. – 2022. – 7 p.
4. Кондратьев, К. Я. Аэрозоль как климатообразующий компонент атмосферы. 2. Прямое и косвенное воздействие на климат / К. Я. Кондратьев // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15. – № 04. – С. 301–320.
5. Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance / J. F. Kok, A. A. Adebisi, S. Albani [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-21-8127-2021 // Atmos. Chem. Phys. – 2021. – Vol. 21. – Iss. 10. – P. 8127–8167.
6. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I / N. Huneus, M. Schulz, Y. Balkanski [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-11-7781-2011 // Atmos. Chem. Phys. – 2011. – Vol. 11. – Iss. 15. – P. 7781–7816.
7. Complex refractive indices and single-scattering albedo of global dust aerosols in the shortwave spectrum and relationship to size and iron content / C. Di Biagio, P. Formenti, Y. Balkanski [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-19-15503-2019 // Atmos. Chem. Phys. – 2019. – Vol. 19. – Iss. 24. – P. 15503–15531.
8. Quantifying the range of the dust direct radiative effect due to source mineralogy uncertainty / L. Li, N. M. Mahowald, R. L. Miller [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-21-3973-2021 // Atmos. Chem. Phys. – 2021. – Vol. 21. – Iss. 5. – P. 3973–4005.
9. Status of the NASA micro pulse lidar network (MPLNET): overview of the network and future plans, new VERSION 3 data products, and the polarized MPL / E. J. Welton, S. A. Stewart, J. R. Lewis [et al.]. – DOI : 10.1051/epjconf/201817609003 // EPJ Web of Conferences (ILRC 28). – 2018. – Vol. 176. – № 09003. – P. 1 – 4.
10. Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратура / А. П. Чайковский, А. П. Иванов, Ю. С. Балин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 12. – С. 1066–1072.
11. Карелин, А. В. О возможности активного мониторинга малых газовых составляющих и парниковых газов из космоса посредством лидарного зондирования / А. В. Карелин, В. В. Хегай // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2025. – Т. 205. – № 2. – С. 21–26.
12. Aerosol and cloud data processing and optical property retrieval algorithms for the spaceborne ACDL/DQ-1 / Guangyao Dai, Songhua Wu, Wenrui Long [et al.]. – DOI : org/10.5194/amt-17-1879-2024 // Atmos. Meas. Tech. – 2024. – Vol. 17. – P. 1879–1890.
13. Измерение озона в нижней тропосфере лидаром дифференциального поглощения / В. С. Букреев, С. К. Вартапетов, И. А. Веселовский [и др.] // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 26. – С. 363–367.
14. Inversion of multiwavelength Raman lidar data for retrieval of bimodal aerosol size distribution / I. Veselovskii, A. Kolgotin, V. Griaznov [et al.] // Appl. Opt. – 2004. – Vol. 43 (5). – P. 1180–1195.
15. Балин, Ю. Оптическая диагностика атмосферы / Ю. Балин // Фотоника. – 2009. – № 5. – С. 30–33.

Поступила в редакцию 05.05.2025

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,
т. 8 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.

(Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (АО «ЦНИИмаш»)).

Валерий Варламович Хегай, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,
т. 8 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru.

(Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук (ИЗМИРАН)).

ON THE FEASIBILITY OF ACTIVE MONITORING OF ATMOSPHERIC AEROSOLS FROM SPACE

A. V. Karelin, V. V. Khagai

The feasibility of remote monitoring of atmospheric aerosols from space using lidar sensing is considered. The presence of scattering aerosols in the atmosphere leads to a negative radiation effect, i.e. to cooling of the Earth's surface. It is shown that additional observations using remote sensing from satellites are needed to better understand the influence of aerosols on climate. The creation of a specialized space system for global monitoring of the Earth's atmosphere based on an orbital constellation of small spacecraft equipped with space aerosol lidar systems is proposed.

Key words: orbital constellation, remote sensing, spacecraft, lidar, aerosols, radiation balance, optical depth, condensation nuclei, intercalibration, validation.

References

1. Ginzburg, A. S. The influence of natural and anthropogenic aerosols on global and regional climate / A. S. Ginzburg, D. P. Gubanova, V. M. Minashkin // *Ros. Khim. Zh. (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleyev)*. – 2008. – Vol. LII. – № 5. – P. 112–119.
2. Weather and Climate Modification. Problems and Prospects. Report of the special commission on weather modification : [in 2 vol.] / NAS-NRS. – Washington, D.C., 1966. – № 1350.
3. Parajuli, S. P. Atmospheric dust: How it affects climate, environment and life on Earth? / S. P. Parajuli, Q. Jin, D. A. Francis. – DOI : 10.3389/fenvs.2022.1058052 // *Front. Environ. Sci.* – 2022. – 7 p.
4. Kondrat'ev, K. Ya. Aerosol as a climate-forming component of the atmosphere. 2. Direct and indirect impact on climate / K. Ya. Kondrat'ev // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2002. – Vol. 15. – № 04. – P. 301–320.
5. Improved representation of the global dust cycle using observational constraints on dust properties and abundance / J. F. Kok, A. A. Adebiyi, S. Albani [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-21-8127-2021 // *Atmos. Chem. Phys.* – 2021. – Vol. 21. – Iss. 10. – P. 8127–8167.
6. Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. / N. Huneus, M. Schulz, Y. Balkanski [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-11-7781-2011 // *Atmos. Chem. Phys.* – 2011. – Vol. 11. – Iss. 15. – P. 7781–7816.
7. Complex refractive indices and single-scattering albedo of global dust aerosols in the shortwave spectrum and relationship to size and iron content / C. Di Biagio, P. Formenti, Y. Balkanski [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-19-15503-2019 // *Atmos. Chem. Phys.* – 2019. – Vol. 19. – Iss. 24. – P. 15503–15531.
8. Quantifying the range of the dust direct radiative effect due to source mineralogy uncertainty / L. Li, N. M. Mahowald, R. L. Miller [et al.]. – DOI : 10.5194/acp-21-3973-2021 // *Atmos. Chem. Phys.* – 2021. – Vol. 21. – Iss. 5. – P. 3973–4005.
9. Status of the NASA micro pulse lidar network (MPLNET): overview of the network and future plans, new VERSION 3 data products, and the polarized MPL / E. J. Welton, S. A. Stewart, J. R. Lewis [et al.]. – DOI : 10.1051/epjconf/201817609003 // *EPJ Web of Conferences (ILRC 28)*. – 2018. – Vol. 176. – № 09003. – P. 1–4.
10. CIS-LiNet Lidar Network for Aerosol and Ozone Monitoring: Methodology and Equipment / A. P. Chajkovskij, A. P. Ivanov, Yu. S. Balin [et al.] // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2005. – Vol. 18. – № 12. – P. 1066–1072.
11. Karelin, A. V. On possibility of real-time monitoring of trace gas and greenhouse gases from the space by lidar sensing / A. V. Karelin, V. V. Khagai // *Electromechanical matters. VNIIEM studies*. – 2025. – Vol. 205. – № 2. – P. 21–26.
12. Aerosol and cloud data processing and optical property retrieval algorithms for the spaceborne ACDL/DQ-1 / Guangyao Dai, Songhua Wu, Wenrui Long [et al.]. – DOI : org/10.5194/amt-17-1879-2024 // *Atmos. Meas. Tech.* – 2024. – Vol. 17. – P. 1879–1890.
13. Lower Tropospheric Ozone Measurement with Differential Absorption Lidar / V. S. Bukreev, S. K. Vartapetov, I. A. Veselovskij [et al.] // *Lasers & Their Applications*. – 1996. – Vol. 26. – P. 363–367.
14. Inversion of multiwavelength Raman lidar data for retrieval of bimodal aerosol size distribution / I. Veselovskii, A. Kolgotin, V. Griaznov [et al.] // *Appl. Opt.* – 2004. – Vol. 43 (5). – P. 1180–1195.
15. Balin, Yu. Atmosphere Optical Diagnostics / Yu. Balin // *PHOTONICS RUSSIA*. – 2009. – № 5. – P. 30–33.

*Aleksandr Vitalyevich Karelin, Doctor of Physico-Mathematical Sciences (D. Sc.), Chief researcher,
t. 8 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru.
(JSC «TSNIIMASH»).*

*Valeriy Varlamovich Khagai, Candidate of Physico-Mathematical Sciences (Ph. D.), Leading researcher,
t. 8 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru.
(Institute of Terrestrial Magnetism of RAS).*