

10. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Леонид Зиновьевич Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978.– 400с.
11. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. Перевод с английского под редакцией В.В. Лучинина -Москва: Техносфера, 2007.- 384с.
12. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения.– М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. - 672 с.
13. Э. Удд. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников/Под ред. Эрика Удда / Перевод с английского И.Ю. Шкадиной. -Москва: Техносфера, 2008.- 520с.
14. Портнов Э.Л. Оптические кабели свяжи / Портнов Э.Л.– М.: ЦНТИ «Информсвязь», 2000.– 112с.
15. Скляр О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы / Олег Константинович Скляр.– М.: СОЛОН-Р, 2001.– 237с.

УДК 551.501.7

**Иванов А. П., Чайковский А. П., Зега Э. П., Кацев И. Л., Кабашников В. П.,  
Денисов С.В., Король М.М., Осипенко Ф.П., Прихач А. С., Слесарь А.С. (Беларусь, Минск)**

### **МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ВЗВЕШЕННЫХ В АТМОСФЕРЕ ЧАСТИЦ ПО ДАНЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В БЕЛАРУСИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ**

Взвешенные в атмосфере частицы являются существенным фактором, влияющим на установление энергетического баланса и климата Земли. Недостаточная изученность прямого и косвенного воздействий аэрозоля на формирование радиационных полей в атмосфере – одна из главных причин, препятствующих совершенствованию климатических моделей. В то же время, аэрозольные частицы, аккумулируя ряд химических веществ, превращаются в один из основных загрязнителей атмосферы, оказывают воздействие на здоровье населения и хозяйственную деятельность. В рекомендациях Всемирной организации здравоохранения предлагается установить жесткие ограничения на концентрацию взвешенных частиц в атмосферном воздухе. Для осуществления контроля трансграничного переноса загрязнений необходимо проведение измерений по большому пространству. Это реализуется Международными дистанционными измерительными сетями с использованием аэрокосмического, лазерного, радиометрического зондирования.

*Идея аэрокосмического зондирования* основана на измерении теплового излучения атмосферы, подстилающей поверхности или рассеянного ими солнечного света. Для получения данных об аэрозоле нами использованы материалы разных космических аппаратов: спектро радиометра MODIS на спутниках Terra и Aqua, лидара на спутнике CALIPSO, космических агентств США (NASA) и ЕС (ESA). Наиболее развитыми аэрозольными алгоритмами обработки спутниковых данных, разработанными в США, Японии, Германии, Великобритании, являются MERIS ESA, MISR JPL, MERIS BAER, MODIS NASA, AATSR. Их большой недостаток – многочасовая обработка даже одного кадра изображения.

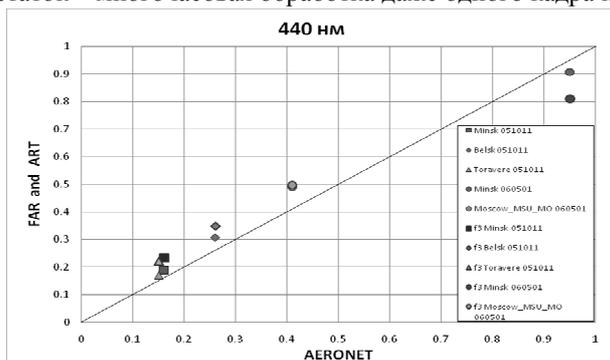


Рис. 1. Сравнение значений аэрозольной оптической толщины, восстановленных по спутниковым данным в разных районах Европы нашими алгоритмами FAR и ART, с данными радиометрической сети AERONET

*Идея лазерного зондирования* основана на измерении временной структуры света импульсного лазера, рассеянного разными участками атмосферы, по которой можно получить информацию о газовых, аэрозольных и метеорологических характеристиках воздуха по трассе. Лазерное зондирование осуществляется с помощью приборов, называемых лидарами. В настоящее время создана Европейская лидарная сеть EARLINET[1]. Лидарная станция Института физики входит в состав EARLINET. В регионах Юго-восточной Азии и бывшего Советского Союза сформированы аналогичные сети AD-Net [2] и CIS-LiNet [3]. Начиная с 2005 г. региональные сети координируют наблюдения и осуществляют обмен данными. Таким образом, в настоящее время создана информационная основа для изучения процессов крупномасштабного переноса на пространстве Евразийского

С целью создания оперативного алгоритма FAR и резкого сокращения времени обработки нами было предложено использовать аналитические решения теории переноса излучения в комбинации с численными расчетами. Идея этого подхода была описана в монографии *Satellite Aerosol Remote Sensing over Land* (Editors A. Kokhanovsky, G. Leeuw. Springer, pp. 101-133) Время обработки кадра порядка минуты. В качестве примера на рис. 1 приведено сопоставление аэрозольной оптической толщины атмосферы в разных местах, измеренных на земле стандартным прибором CIMEL и восстановленных по разработанным нами алгоритмам. Результаты вполне удовлетворительные.

континента. Лазерное зондирование аэрозоля нами осуществлялось, с помощью созданного многоволнового лидара с Рамоновскими каналами прошедшим интеркалибровку. Он одновременно испускает свет на длинах волн 1.064, 0.532, 0.355 мкм, а регистрирует дополнительно и комбинационное рассеяние на воде и азоте на длинах волн 0.387, 0.407, 0.607 мкм.

Идея радиометрического зондирования основана на спектральном измерении прямого и рассеянного под разными углами солнечного излучения, позволяющем определять прозрачность атмосферы и среднее по ее толще содержание компонент среды. Существует Мировая радиометрическая сеть AERONET, включающая более 300 точек наблюдения. Наши измерения проводятся на стандартном приборе CIMEL в интервале 0.44 – 1.02 мкм.

Важной задачей являлась разработка методической основы комплексного дистанционного и локального, наземного и космического мониторинга аэрозоля с целью ее применения в практических работах по контролю загрязнений. Признаками, по которым производилась идентификация частиц аэрозоля указаны в таблице

**Таблица 1 – Идентификация частиц аэрозоля**

Тип аэрозоля	Размер, мкм	Форма	Спектр обратного рассеяния пропорционален $\lambda^{-A}$	Деполяризация, %
Дым и индустриальный аэрозоль	Меньше 1	Разная	$A \sim 1$	1-5.
Пылевые частицы	1 - 20	несферические	$A \sim 0.4 - 0$	8-20.
Частицы капельных облаков	Много больше 1	сферические	$A \sim 0$	0
Кристаллические облачные частицы	Много больше 1	Разные типы кристаллов	$A \sim 0$	20-40

Информация о пространственных распределениях параметров атмосферных компонентов составляет основную ценность данных космических измерений. На этапе получения первых значительных массивов данных космического лидарного зондирования требуется провести анализ соответствия спутниковой информации и результатов наземных дистанционных и локальных измерений. Выполнено сравнение значений PM<sub>10</sub>, восстановленных по данным спутниковых измерений, с данными наземных измерений. Показано, что диапазон изменения значений PM<sub>10</sub> по данным дистанционных и наземных измерений приблизительно одинаков, хотя степень корреляции между ними не велика. Тем не менее, достоинство космических данных в оперативности и возможности обеспечить мониторинг загрязнений на обширной территории. Они позволяют отслеживать тренды и тенденции в изменении окружающей среды.

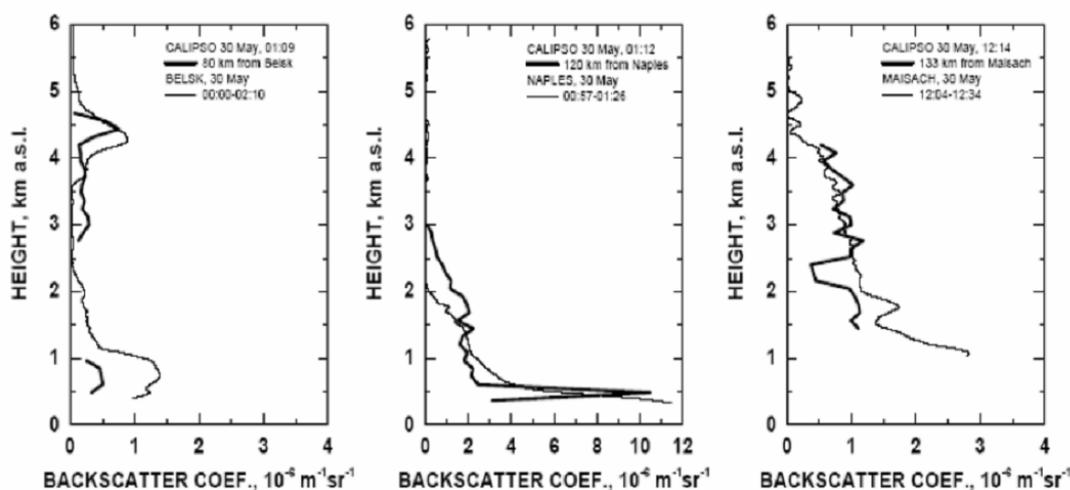


Рис. 2. Сравнение измерений высотных профилей показателя обратного аэрозольного рассеяния CALIPSO и EARLINET станций в Бельске, Неаполе, Маисах, 30 мая 2008

Космические лидары, в силу очевидных ограничений не могут достигнуть такого качества данных, которая доступна на стационарных лидарных станциях. Поэтому наземные лидарные станции высокого уровня призваны обеспечить валидацию данных космических лидаров. В настоящей работе в сотрудничестве с рядом научных центров в ЕС, начиная с 2006 г. были проведены работы по валидации космического лидара на спутнике CALIPSO посредством координированных лидарных измерений на Европейском пространстве. Некоторые примеры вертикальных профилей показателя обратного рассеяния приведены на рис. 2. Общая картина распределения относительных разностей между измерениями обратного рассеяния данных CALIPSO и станций EARLINET характеризуется следующими параметрами: среднее отклонение (относительное) - 4.6%, относительное стандартное отклонение - 50% и медиана - 0.6%.

Остановимся на анализе межрегионального переноса обусловленного аномальными природными явлениями (пожары, пылевые бури, извержения вулканов) и антропогенной деятельностью.

Пожары, охватывающие огромные территории в теплый период года, наносят серьезный вред природе и деятельности людей. Проанализируем пожары, охватившие Центральную Европу в апреле – мае 2006 г. Одним из значимых негативных последствий явилось загрязнение Арктического региона за счет выноса на север дымов. Для наблюдения за этим процессом было организована координированная работа лидарных и радиометрических станций на пространстве от Беларуси до Шпицбергена. Перенос продуктов пожаров приводил к возрастанию концентрации мелкодисперсной фракции взвешенных частиц с диаметром менее 1 мкм. Соотношение между концентрациями PM-2.5 к PM-10, приблизительно равными в обычных условиях при загрязнении продуктами дымов в регионе Беларуси смещалось в сторону 5-10 кратного увеличения относительной концентрации мелких частиц.

Европа и Беларусь, в частности, подвергаются пылевым бурям пустынь Северной Африки. Доля дней в году, когда наблюдается перенос пыли в Европу составляет 20 - 30 %. Лидарная станция в Минске обнаруживала слои пыли для 5 - 10% дней наблюдений. В период выноса пыли концентрация крупнодисперсной моды значительно возрастает, в то время, как мелкодисперсная фракция остается сравнительно стабильной. Наиболее сильное запыление в Беларуси в текущем десятилетии наблюдалось в сентябре 2002 г, когда концентрация аэрозоля на определенных высотах возрастала в 50 раз по сравнению с обычными днями.

Сильное загрязнение атмосферы действующими вулканами обычно наблюдается в стратосфере. Однако наличие пепла исландского вулкана Eyjafjallajökull на высотах полета самолетов в период март – май 2010 г взбудоражило общественность. Дистанционные наблюдения за облаком пепла проводились в Европейской лидарной сети EARLINET, в том числе на станции в г. Минске и в районе г. Лилля (Франция) в сотрудничестве с учеными Лилльского университета. Результаты измерений в Лилле и Минске позволили оценить трансформацию характеристик взвешенных частиц в процессе их переноса. Следует отметить, что в Беларуси влияние вулкана было незначительным. Из 25 наблюдений в г. Минске в период наибольшего загрязнения Центральной Европы пепел на высотах 3 – 7 км. присутствовал 3 раза, следы пепла проявились 12 раз.

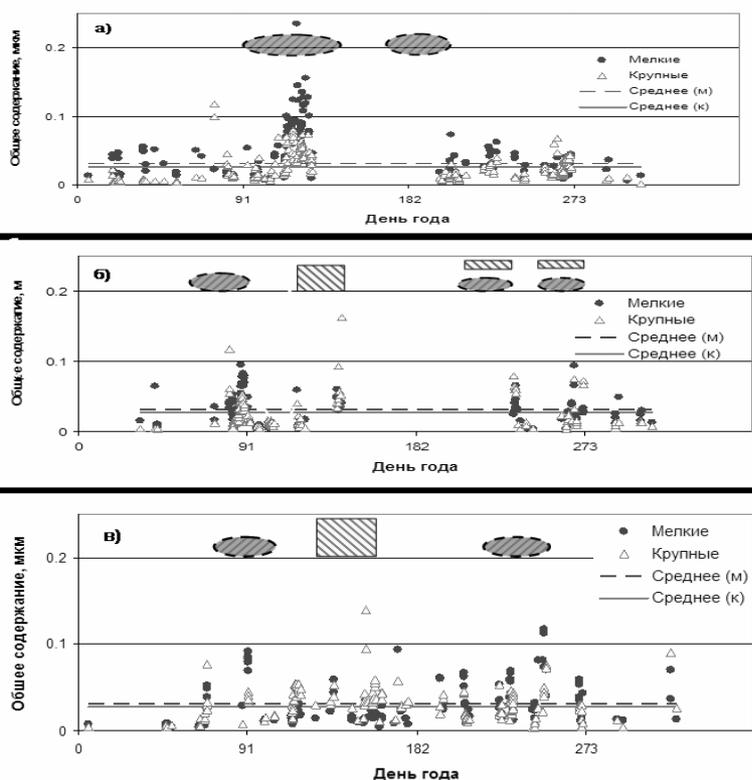


Рис. 3. Общее содержание мелкой и крупной аэрозольных фракций по данным радиометрических измерений в 2006 (а), 2007 (б) и 2008 (в) годах в Минске. Овалами отмечены события переноса продуктов пожаров, прямоугольниками – пыли

Такую приблизительную картину могут дать обратные траектории, изображенные на рис.4. Густота траекторий свидетельствует о том, насколько часто проявлялось влияние источников загрязнения.

Значительную часть загрязняющих примесей выбрасывают в атмосферу антропогенные источники, в частности, до 10 – 20 % общей массы аэрозольного вещества. Источники антропогенного аэрозоля сосредоточены в промышленных и населенных районах. Данные о мощности этих выбросов содержатся в отчетах ЕМЕП. Однако антропогенные выбросы и перенос этих продуктов могут быть причиной резких подъемов концентрации частиц PM-10, которые наблюдаются в холодные периоды в достаточно чистых районах: на станции в Березинском заповеднике (Беларусь) и станции Бельск (Польша). В это время в связи с отопительным сезоном возрастает мощность выбросов и уменьшается высота слоя перемешивания. Общая картина содержания аэрозоля в атмосфере по данным радиометрических измерений в течение нескольких лет, обусловленного разными причинами, представлена на рис. 3.

В те дни, когда в пункте наблюдений просматривается повышенная загрязненность, представляет интерес выявить траекторию, по которой она распространялась.

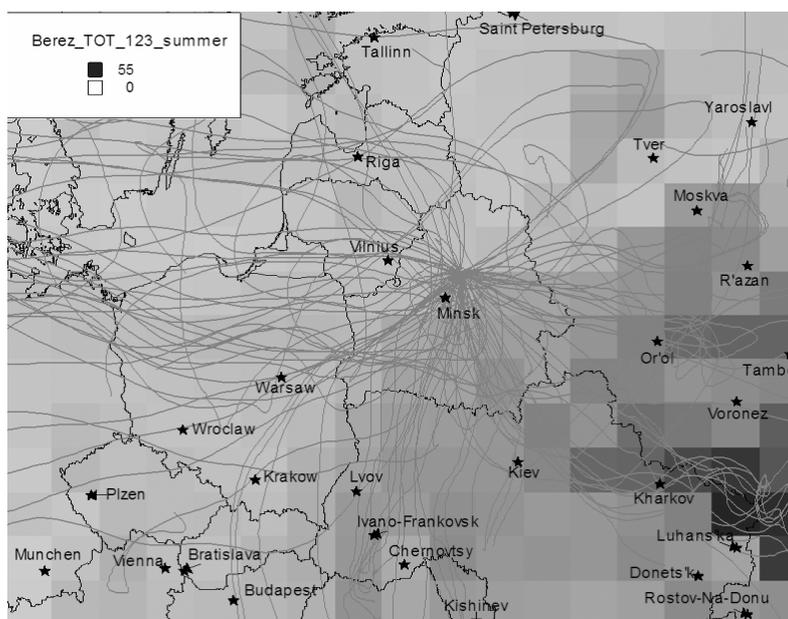


Рис. 4. Пространственная плотность мощности источников аэрозолей, влияющих на состояние атмосферы в Березинском заповеднике в теплые сезоны (разная степень серости карты) и траектории воздушных масс, на высоте 950 гПа (450 м.) в дни с концентрациями аэрозолей, в два и более раз превышающие среднегодовые

Видно, что в теплые сезоны наиболее мощные источники находятся на восточной границе Украины с Россией, более слабые - на западе Украины и черноземном поясе России. Наибольший вклад в загрязненность атмосферы Минска взвешенным веществом дают южные и восточные территории. Менее всего загрязняют атмосферу северные территории.

УДК 551.501.7

**Иванов А. П., Чайковский А. П., Орлович В. А., Лисинецкий В. А., Осипенко Ф.П.,  
Хутко И. С., Слесарь А.С., Чулков Р. В. (Беларусь, Минск)**

#### **РАЗРАБОТКА ЛИДАРНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ И ОЗОНА**

Идея лазерного зондирования основана на измерении временной структуры света импульсного лазера, рассеянного разными участками атмосферы, по которой можно получить информацию о газовых, аэрозольных и метеорологических характеристиках воздуха по трассе. Лазерное зондирование осуществляется с помощью приборов, называемых лидарами. Преимущества лазерного зондирования:

1. Измерение оптических характеристик атмосферы, определяющих радиационный режим, климат Земли и лежащих в основе оценки подавляющего количества компонент среды;
2. Измерение концентрации разных газов естественного и антропогенного происхождения на уровне ПДК (и даже ниже);
3. Измерение концентрации, среднего размера, формы, степени полидисперсности частиц аэрозоля, показателя преломления ( $n$  в ряде случаев и химического состава);
4. Измерение направления и величины скорости ветра, плотности воздуха, давления, профиля температуры, влажности в разных участках пространства;
5. Высокое пространственное (до нескольких метров) разрешение измеряемой компоненты;
6. Дальность действия порядка метеорологической дальности видимости (до 2-30 км.) по всему обозреваемому объему пространства;
7. Возможность непрерывного контроля;
8. Экспрессность (сведения о загрязнении значительной территории города получают за несколько часов);
9. Возможность получения огромного массива данных, позволяющих выявлять основные закономерности загрязнения города, промышленного района, заповедника и т.д.;
10. Неконтактность (сведения о свойствах объема воздуха получают на большом расстоянии от него);
11. Скрытность (например, информацию о загрязнении дымами завода можно получать, не связывая ее с производственным процессом; об осуществляемом контроле администрация производства может и не знать).

Возрастающая значимость проблемы изменения климата и экологических задач, обусловленных глобальным загрязнением атмосферы, требует объединения лидарных станций в лидарные сети и проведение координированных наблюдений параметров атмосферных компонентов на основе единых методик измерения и алгоритмов обработки данных, а также использования унифицированных лидарных систем. В планах развития