

**МОНИТОРИНГ ТРАНСГРАНИЧНОГО ПЕРЕНОСА В
АТМОСФЕРЕ АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННЫХ И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
В БЕЛАРУСИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ**

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН
Беларуси*

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

Содержание

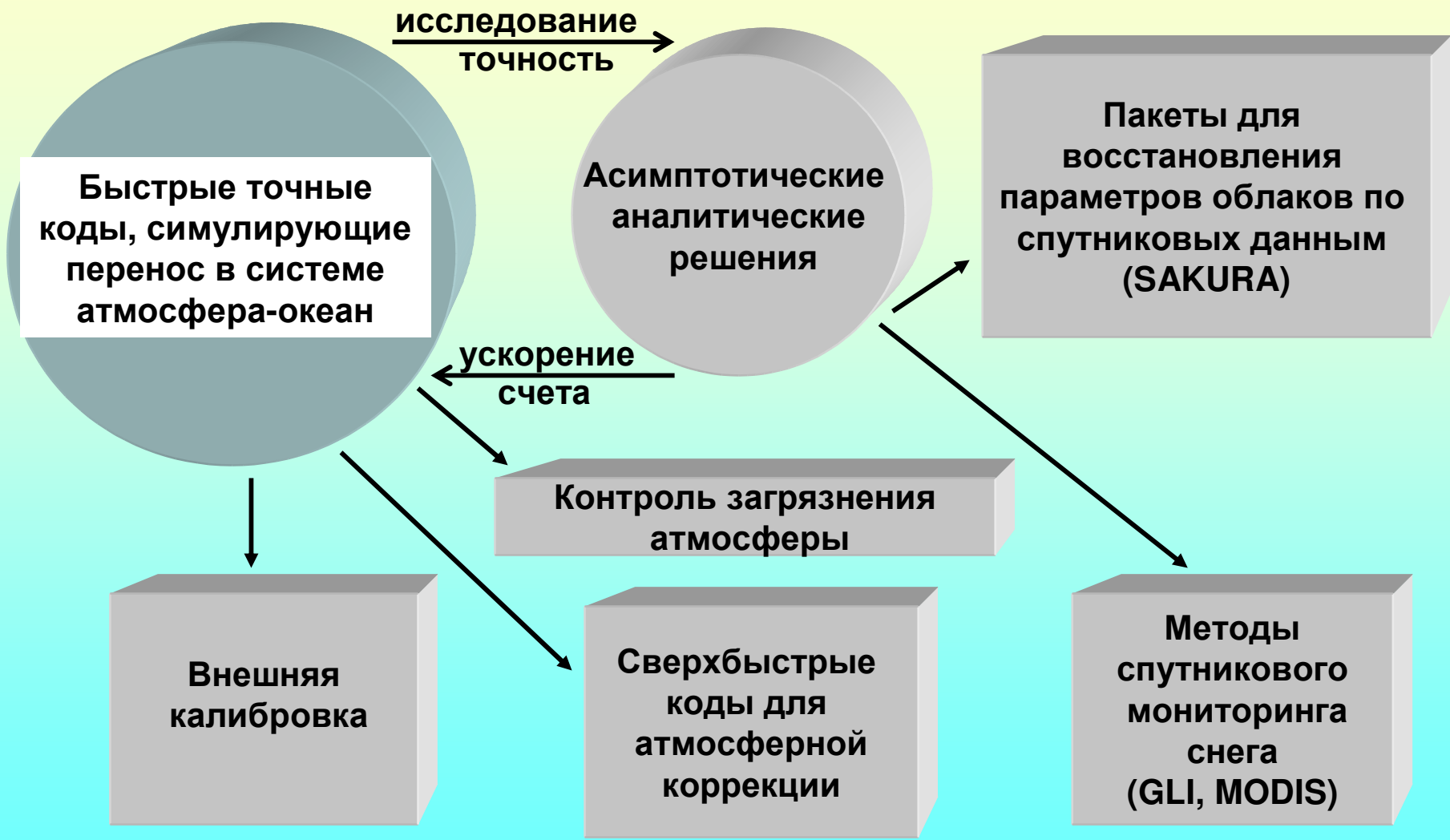
1. **Международные дистанционные измерительные сети контроля аэрозоля.**
2. **Спутниковое зондирование.**
3. **Лазерное зондирование.**
4. **Радиометрическое (фотометрическое) зондирование.**
5. **Признаки идентификации аэрозоля.**
6. **Сопоставление различных методов измерения.**
7. **Процедура мониторинга трансграничного переноса загрязнений в атмосфере в регионе Беларуси.**
8. **Межрегиональный перенос обусловленный аномальными природными явлениями (пожары, пылевые бури, извержения вулканов).**
9. **Межрегиональный перенос обусловленный антропогенной деятельностью.**
10. **Воздействие процессов трансграничного переноса на изменения концентраций загрязняющих примесей в приземном слое в Беларуси.**
11. **Источники трансграничного загрязнения Беларуси.**

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 ВОЗ 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

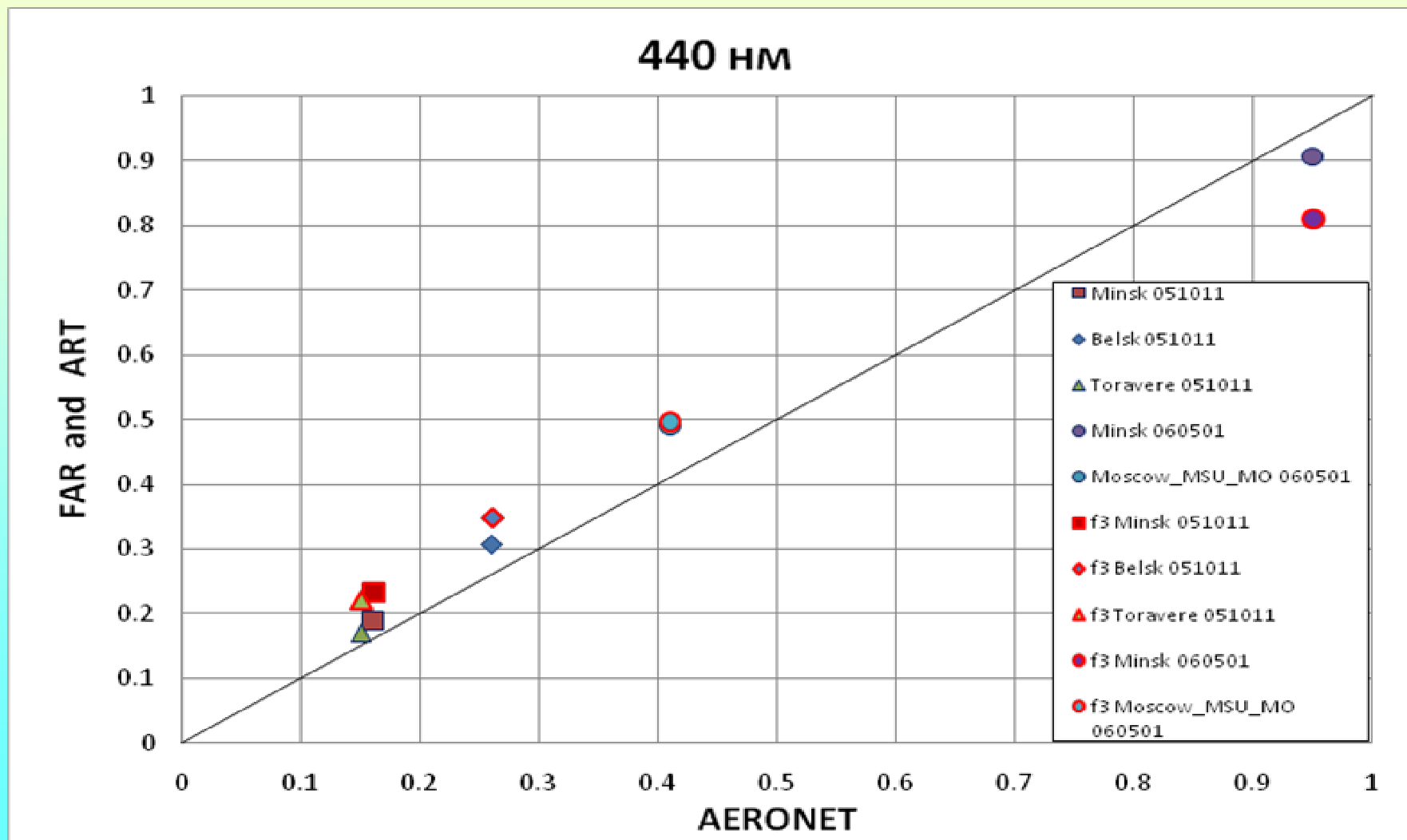
- **Для получения данных об аэрозоле нами использованы материалы разных космических аппаратов**
- **- Космические фотографии земной поверхности, облаков и аэрозольных слоев, измерения оптической аэрозольной толщи выполняемые спектрорадиометром MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) – основным прибором спутников Terra и Aqua. совершающих полный обзор планеты за 1-2 суток <http://modis.gsfc.nasa.gov/>**
- **- С июня 2006 г. доступны данные спутниковых лидарных измерений, получаемые в рамках программы CALIPSO <http://www-calipso.larc.nasa.gov/> .**
- **Карты распределения пожаров – источников выбросов аэрозоля - можно получить на основе спутниковых наблюдений MODIS на сервере The Fire Information for Resource Management System (FIRMS).**
- **- Данные международных сетей мониторинга атмосферы и космических агентств США (NASA) и ЕС (ESA).**
- **Использованы существующие методы обработки информации и собственные разработки**

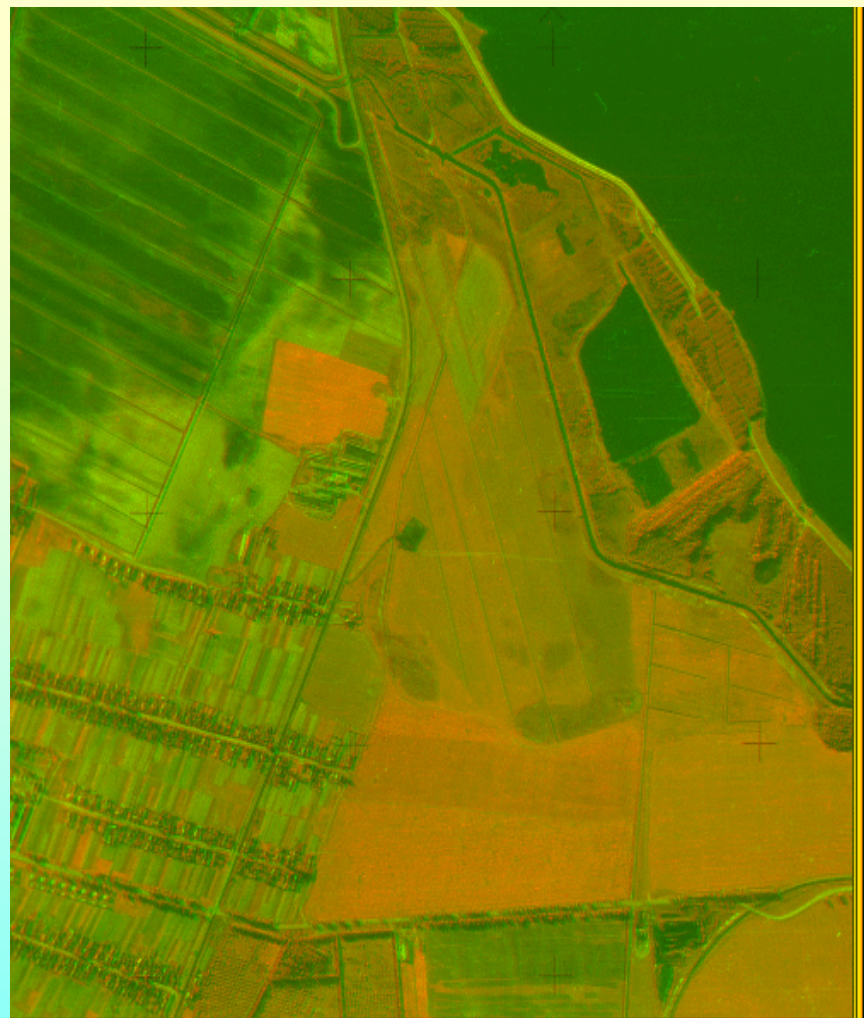
Спутниковое зондирование



Зега Э.П., Кацев И.Л., Прихач А.С., Кохановский А.А.

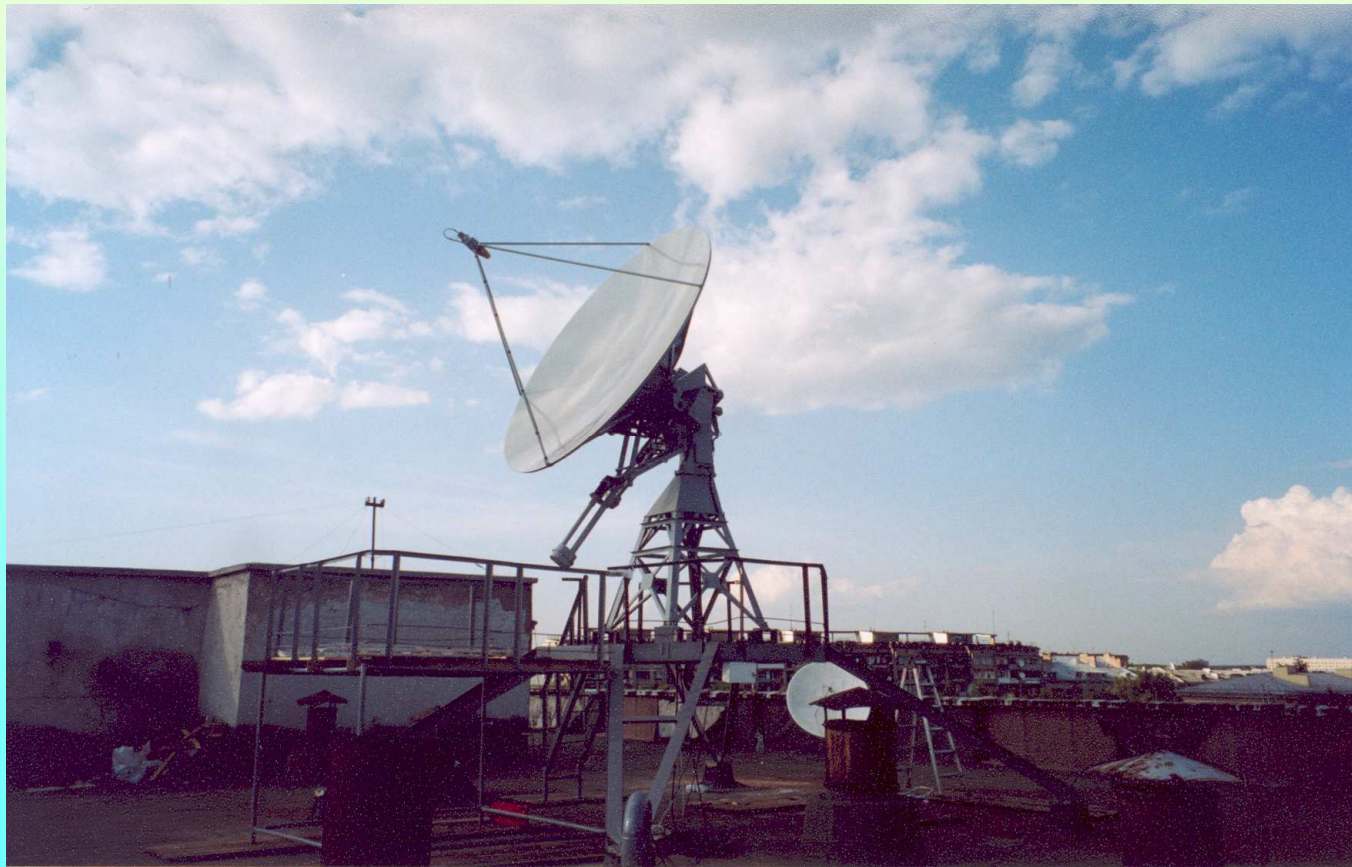
Сравнение значений АОТ, восстановленных по спутниковым данным алгоритмами FAR (f3) и ART, с данными сети AERONET



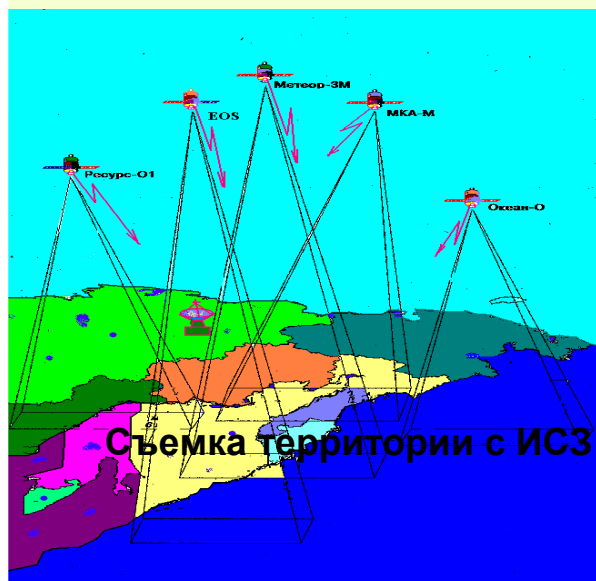


Снимок района Солигорского водохранилища до (слева) и после (справа) коррекции на атмосферную “дымку”.

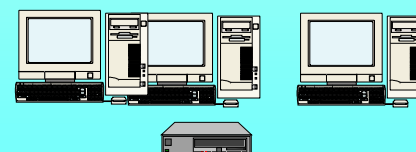
Антенна для приема информации дистанционного зондирования Земли со спутника



Общая схема космического мониторинга поверхности Земли



Тематическая обработка и нанесение обстановки на цифровую карту



Передача обстановки в центр для принятия решения



Прогноз ветрового переноса загрязнений

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

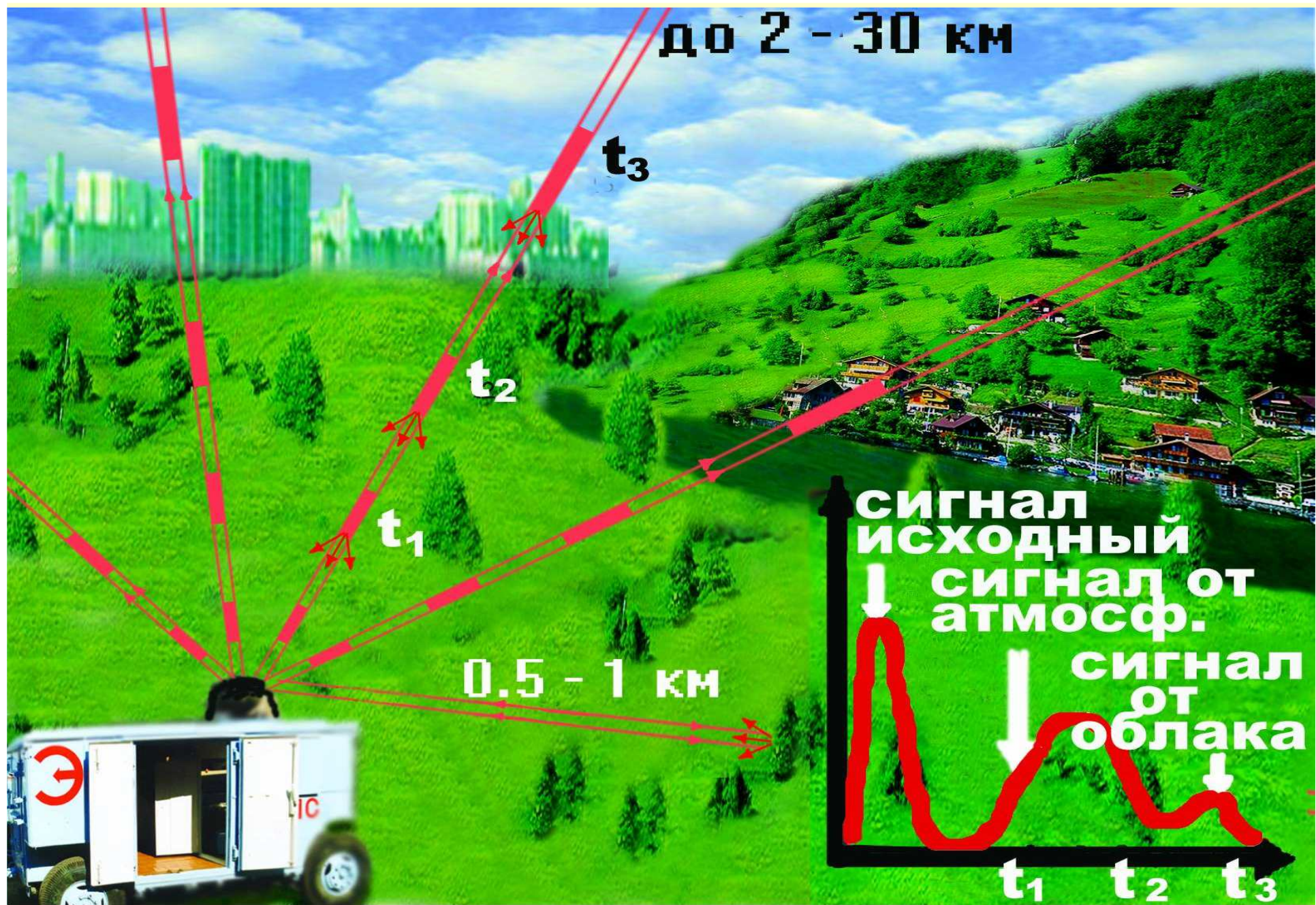





Рис. 1. Идея лидарного зондирования.

Лидарные сети на Евразийском континенте

2. CIS-LiNet

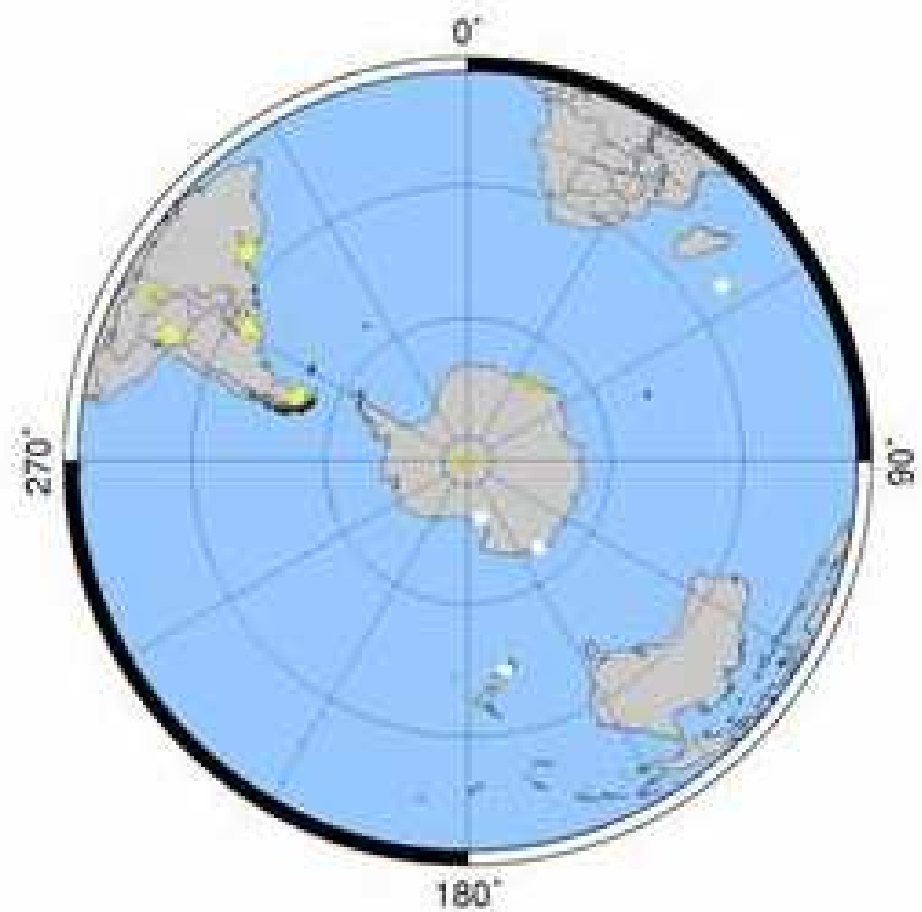
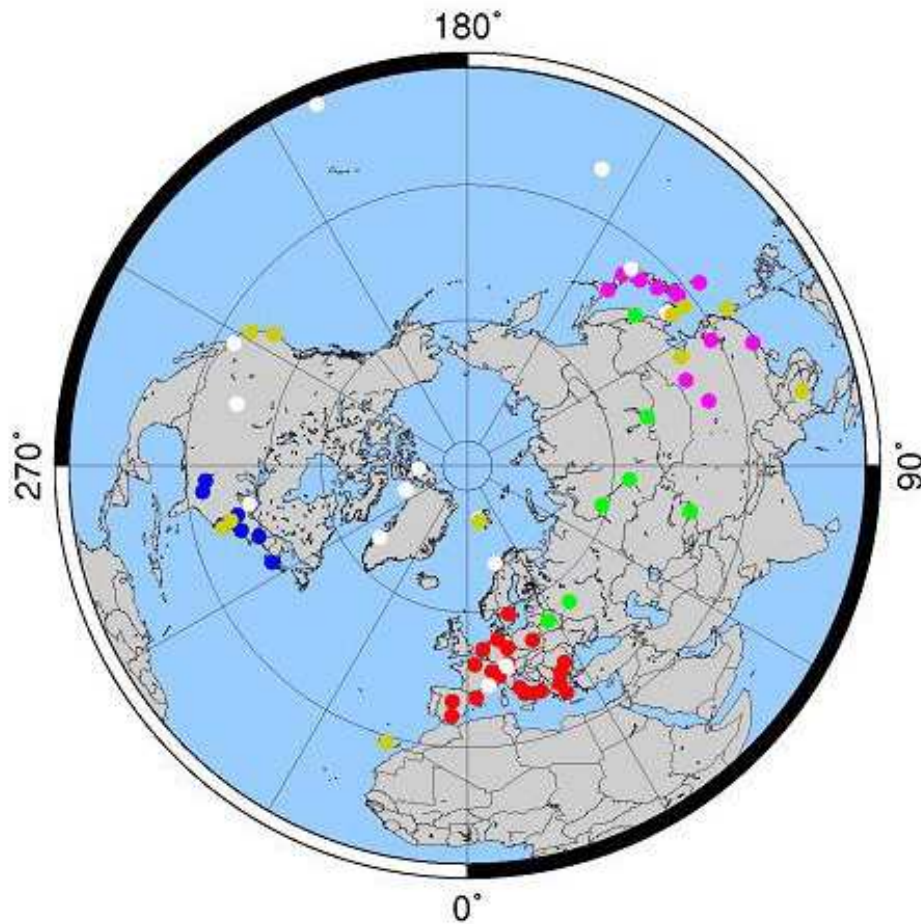


	EARLINET
	AD-Net
	CIS-LiNet

CIS-LiNet stations:

- Stationary lidar stations in Minsk, Moscow, Surgu, Tomsk, Vladivostok
- Alpine stationary lidar station in Teplokluchenska in Central Asia, Kyrgyz Republic
- Seasonal lidar station on the base of a mobile lidar at the Lake Baikal
- Shipboard lidar in Vladivostok

Формирование региональных лидарных сетей GALION



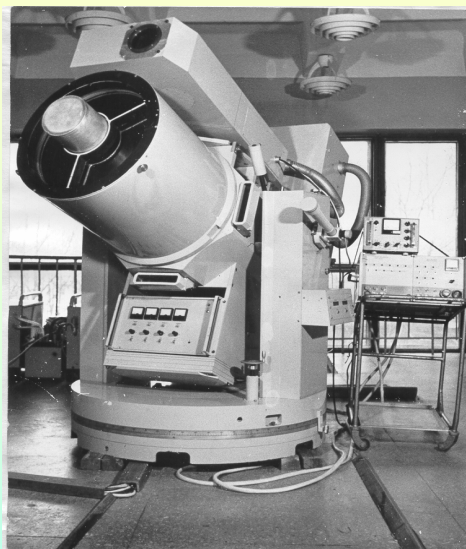
- EARLINET; ● CIS-Linet; ● AD-Net; ● REALM; ● ALINE
● NDACC; ● MPLNET



**Внешний
вид
многоволно-
вого лидара
с Раманов-
скими
каналами**

<i>Излучатель</i>	
Излучатель импульсный Длина волны Энергия импульса Длительность импульса Частота посылки импульсов Диаметр лазерного пучка (расширенный) Расходимость лазерного излучения	Nd:YAG 1064, 532 и 355 нм 100/55/30 мДж @ 1064/532/355 нм 10 нс 10 Гц 50 мм 0.3 мрад
<i>Приемник</i>	
Телескоп (диаметр) Угол приема излучения Длины волн упругого рассеяния Рамановские длины волн	Кассегрен, 300 мм первичное зеркало 0.6 – 5 мрад, 1064, 532, 532 деполяризация и 355 нм 387, 407, 607 нм
<i>Система регистрации</i>	
Каналы регистрации Детекторы Режим регистрации Измеритель Data Output	Сигнал упругого рассеяния, деполяризация, Рамановский сигнал Фотоприемные модули на основе фотоумножителей и лавинных фотодиодов Аналоговый сигнал и счетчик фотонов АЦП (14 bit, 10 МГц), 240 МГц быстрый счетчик фотонов База данных Access
<i>Общие характеристики</i>	
Блок питания Потребляемая энергия Температура Вес Площадь для размещения	220 V/AC, 50 Гц, однофазное 1.5 кВт (без кондиционера) 0-40 °C (без кондиционера) 200 кг 6 м²
<i>Механическая система</i>	
Альт-азимутальная подвеска Диапазон сканирования по азимуту Диапазон сканирования по углу места	Ручное управление 0-360 градусов 0 - 90 градусов
<i>Программное обеспечение</i>	
Программный пакет для обработки данных включает	1. Программа предварительной обработки и синтеза данных 2. Программа расчета параметров аэрозоля 3. Программа конвертирования форматов входных и выходных файлов данных

Лидары в Минске (Беларусь)



Стратосферная аэрозольная поляризационная станция



Панорамная многоволновая станция в комплексе с солнечным радиометром Cimel



ИК канал панорамной станции



Стационарная озоновая станция



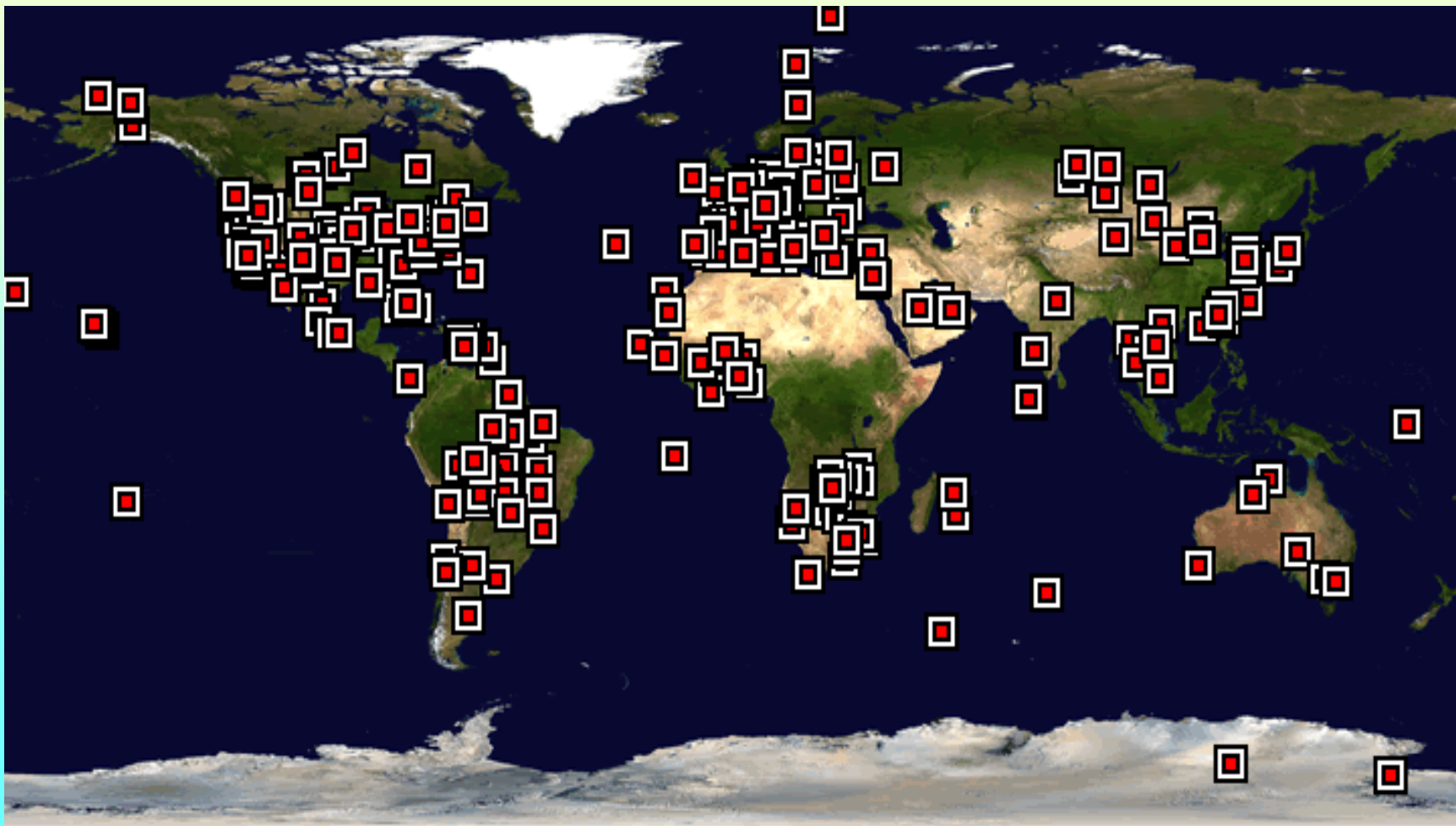
Передвижная многофункциональная станция



Мобильный лидар ИФ (Для перевозки может быть использован легковой автомобиль)

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.

**Мировая фотометрическая сеть AERONET,
предназначенная для контроля спектральной
прозрачности атмосферы и состава аэрозоля**

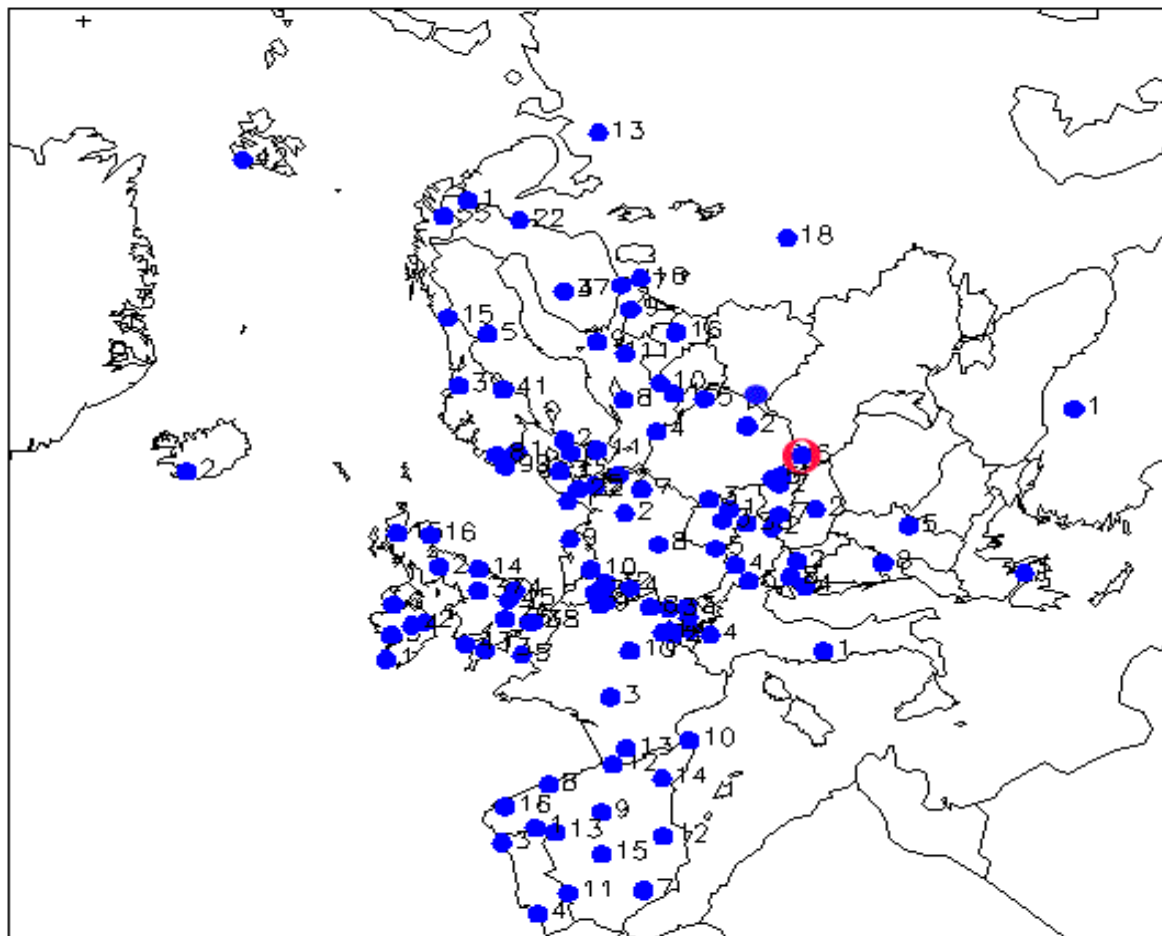




Лидар панорамного обзора и сканирующий солнечный спектральный фотометр CIMEP

Технические параметры спектрального сканирующего солнечного радиометра CIMEL (CE-318).

Òèï ðàäèîì àòðà	Ñï àê òðàëüí ù é ñê àí è ðóð ù è é ñ ëí å÷í ù é ô î òí ì àòð CE 318 (CIMEL)
Êîí ñòðóêéöèÿ	Î ï òè ÷àñêè è è ì äóëü ñ äàòè ÿ êíëëè àòè ðàè è
Ðààí ÷è å äèè ù àí ëí , íì	440, 670, 870, 936, 1020
Ñï àê òðàëüí àÿ ï î ëóø è ðèí à, íì	10
Óàí ë ï ðè àí à ñ ëí å÷í î ñ êí ëëè àòè ðà, ãðàäóñ	1.2
Óàí ë ï ðè àí à ô î í à í åå, ãðàäóñ	
Äàòàê òè ð	Êðàí í è åå ù é ô î òí äàòàê òè ð
Ì àòè ä ñê àí è ðí ààí è ÿ	Ñê àí è ðí ààí è å ï î óäè ó ì àñòà è àçè òóó
Ï î ãðå í î ñ ù ñê àí è ðí ààí è ÿ, ãðàäóñ	0.1
Ýí åðàí ï è òàí è å	Âí åø í ÿ äàòàðÿ è ñ ëí å÷í àÿ ï àí äè ù
Âù àí ä ààí í ù õ è ï åäåà÷à è í ô î ðè àöèè	Âí óòðàí í ÿÿ ï àí ÿü, ÐÑ, Ñè ñòàè à ñàí ðà ààí í ù õ ÷àðç ãàí ñòàöèè í àðí ù å ñí óòè è èè.



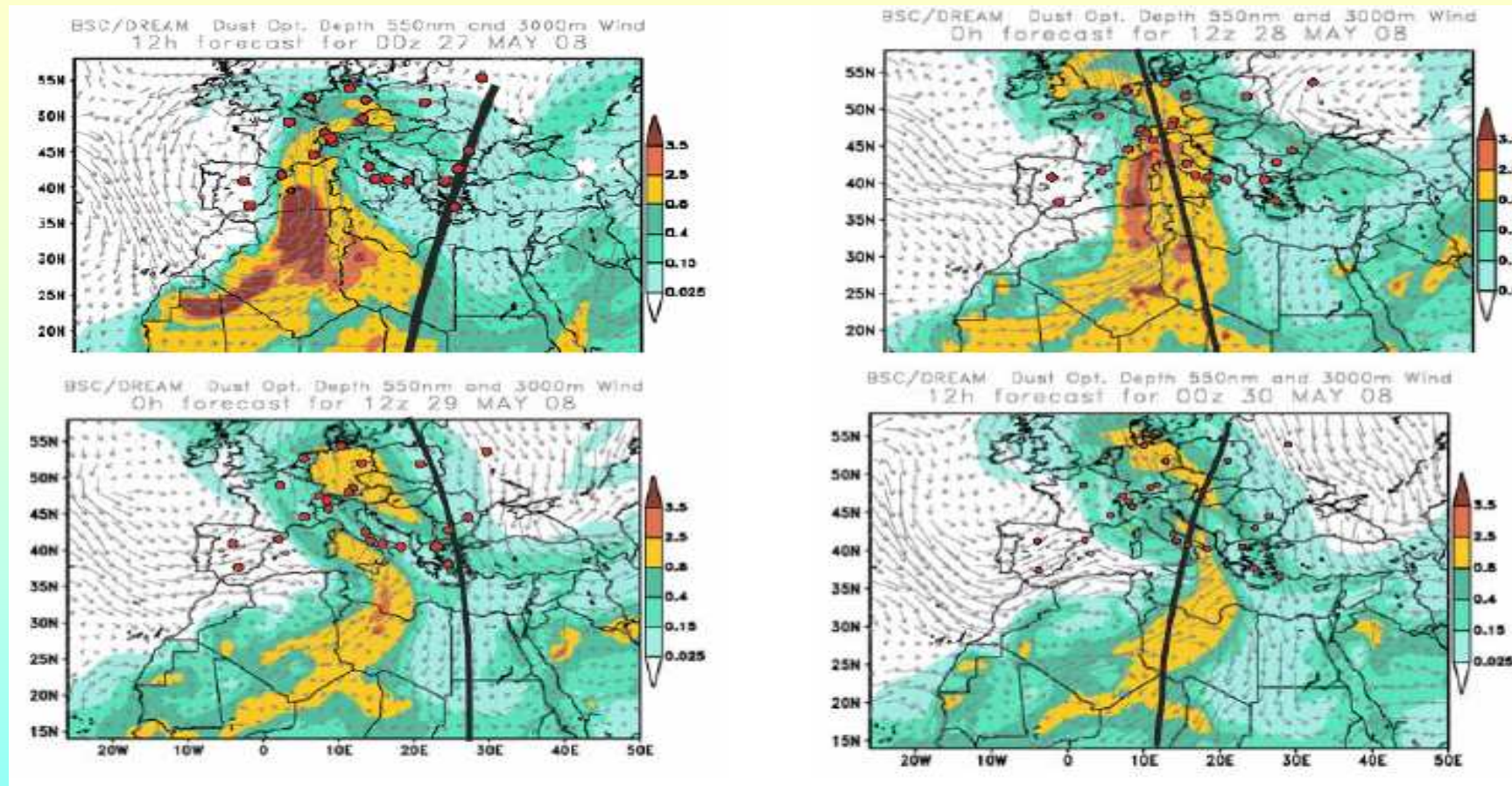
Наземные данные об аэрозоле содержатся в сети ЕМЕП (см. карту), GAW, РЦРКМ и Березинском заповеднике Беларуси, Данные измерений примесей в приземном слое атмосферы в регионах Польши доступны в сети Интернет в оперативном режиме.

Важной задачей является разработка методической основы комплексного дистанционного и локального, наземного и космического мониторинга характеристик взвешенных в атмосфере частиц с целью ее применения в практических работах по контролю загрязнений и крупномасштабного переноса загрязнений.

Признаками, по которым производится идентификация частиц аэрозоля

Тип аэрозоля	Размер, мкм	Форма	Спектр обратного рассеяния пропорционален λ^{-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

Вынос пыли из пустыни Сахара в регионы Восточной Европы.



Траектория пролета CALIPSIO (черная линия) через пространство Европы в период 27 – 30 мая 2008 г. вместе с аэрозольной оптической толщиной АОТ на длине волны 532 нм. и поле ветра на 3000 м, рассчитанные по модели DREAM для 00:00 и 12:00 GMT; расположение EARLINET станций представлено красными точками

Комплексное применение разных методов расширяет возможности исследований, позволяет создавать новые подходы обработки информации, повышает точность, осуществляет валидацию космической информации. Остановимся на валидации.

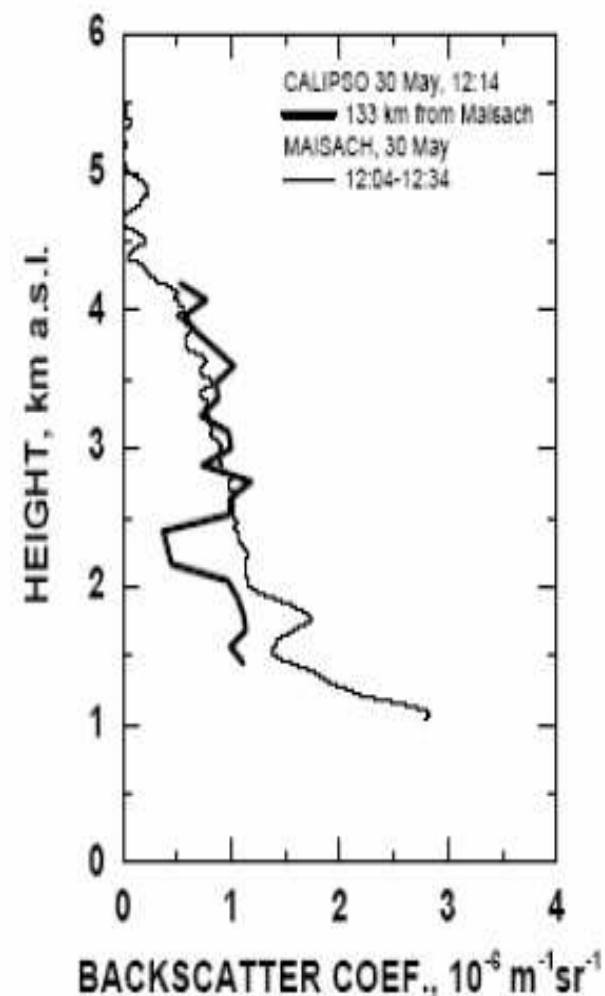
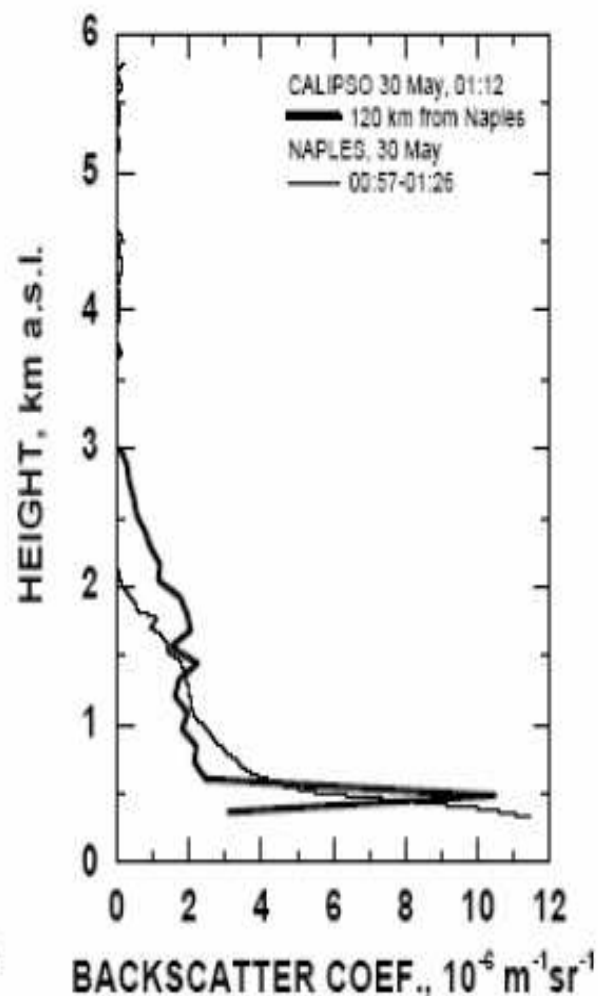
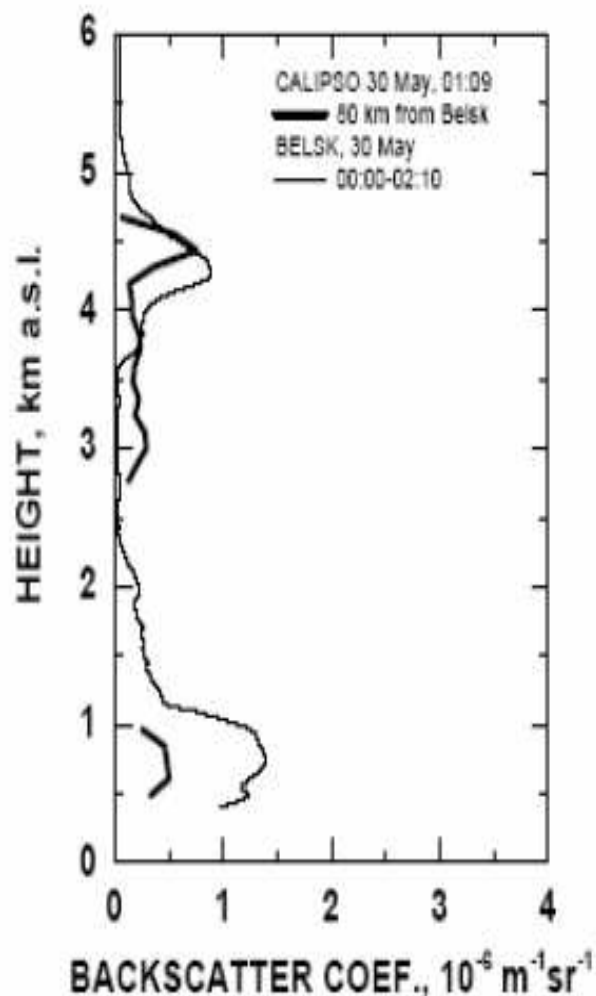
Разработка процедуры комплексного анализа наземных и космических данных для оценки пространственного распределения характеристик взвешенных частиц

- 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, найти корреляции с данными моделирования процессов переноса атмосферных примесей, определить подходы к процедуре объединения данных. Разработка процедуры совместного анализа информации, полученной наземными и космическими системами наблюдения, проводилась для характерных в регионе Беларуси состояний.

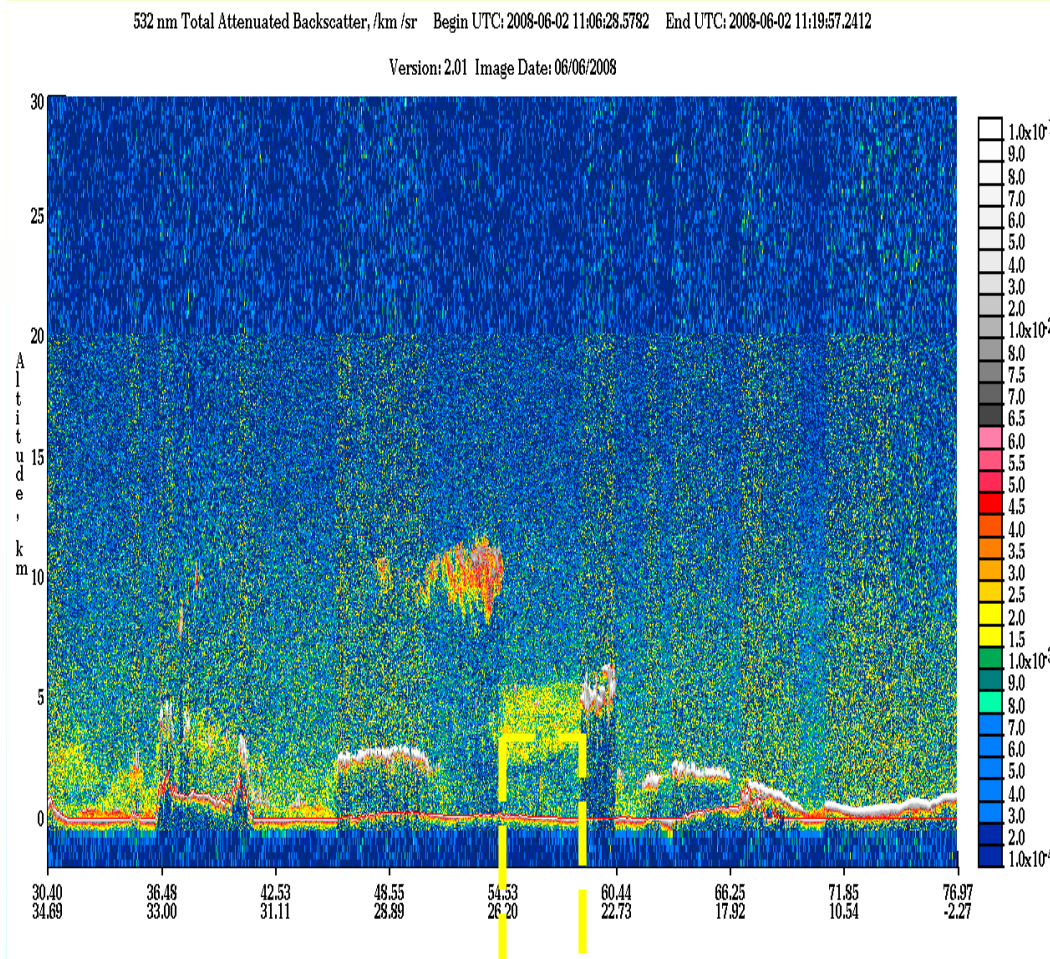
Исследования атмосферного аэрозоля, координированные с космическим лидаром в программе CALIPSO: валидация данных космического лидара

- **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. Для реализации этих функций должны быть обеспечены высокий технический уровень базовых наземных станций и разработаны и реализованы процедуры, обеспечивающие их координированную (сетевую) работу, прежде всего унификацию методики измерений и ключевых аппаратных блоков. Очевидно, все перечисленные мероприятия эффективны только в рамках международного научного сотрудничества.**
- **В настоящей работе в сотрудничестве с рядом научных центров в ЕС с целью разработки методологии применения данных космического лидарного зондирования, начиная с 2006 г, были проведены работы по валидации космического лидара на спутнике CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) посредством координированных лидарных измерений на Европейском пространстве. Космический лидар CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) размещается на платформе CALIPSO и является частью международного космического проекта “A-Train”**

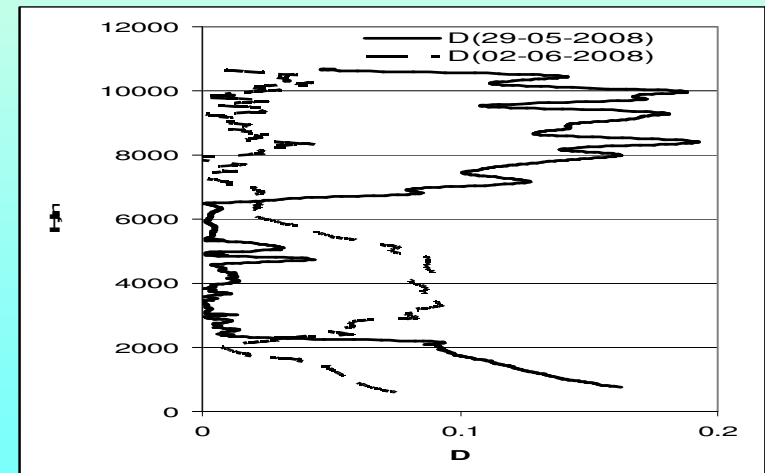
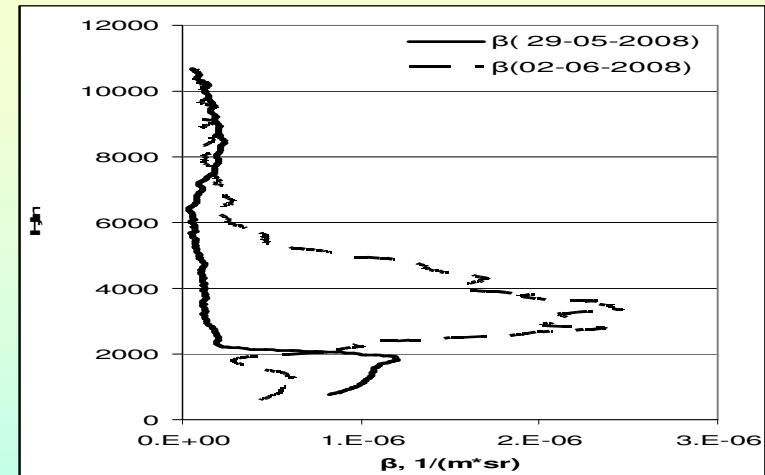
Сравнение измерений показателя обратного аэрозольного рассеяния CALIPSO и EARLINET станций в Бельске, Неаполе, Маисах, 30 мая 2008



Сравнение слоев сахарской пыли в Беларуси по данным космического и наземного лидаров

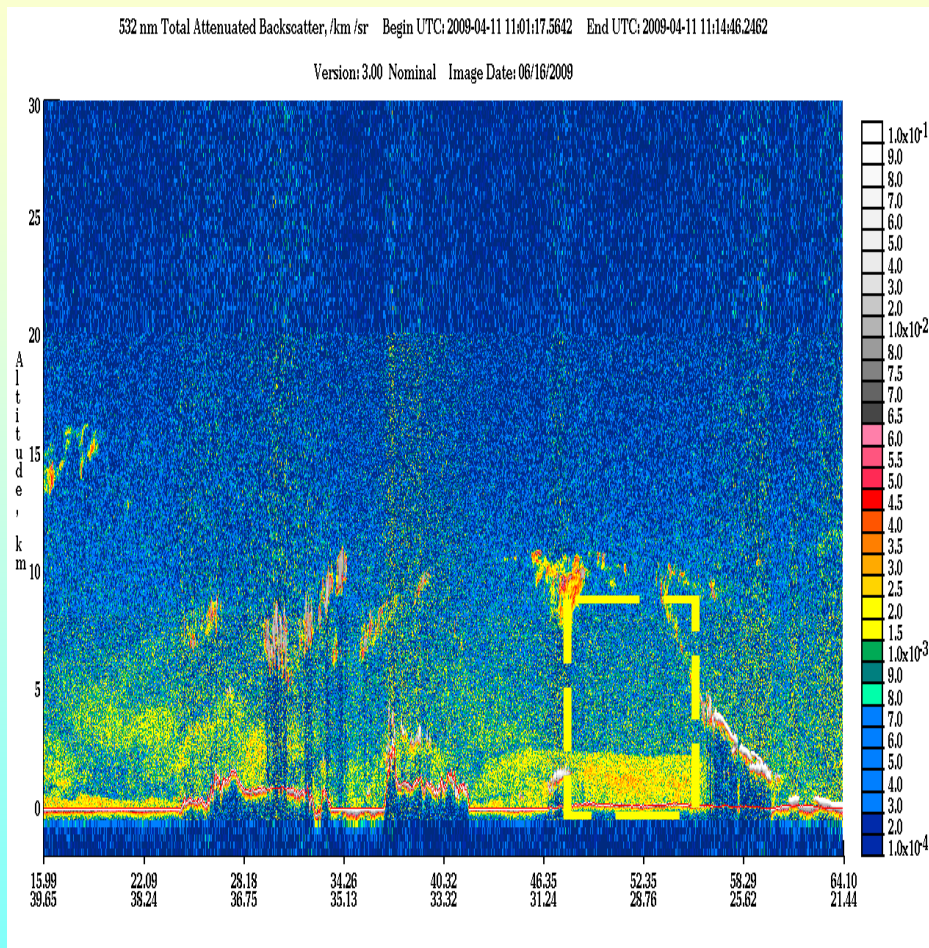


Разрез профиля показателя обратного рассеяния на основе измерений космического лидара CALIPSO. Прямоугольник – регион Беларуси, 02-07-08г

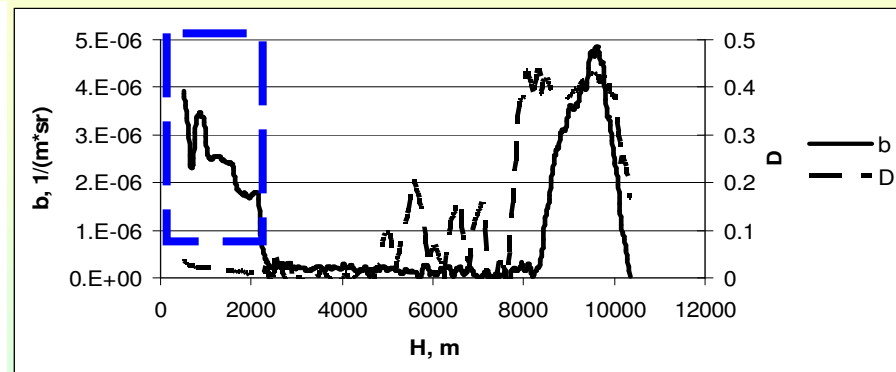


Профили показателя обратного рассеяния (верх) и аэрозольной деполяризации (низ), измеренные в Минске, 29 мая и 02 июня 2008 г

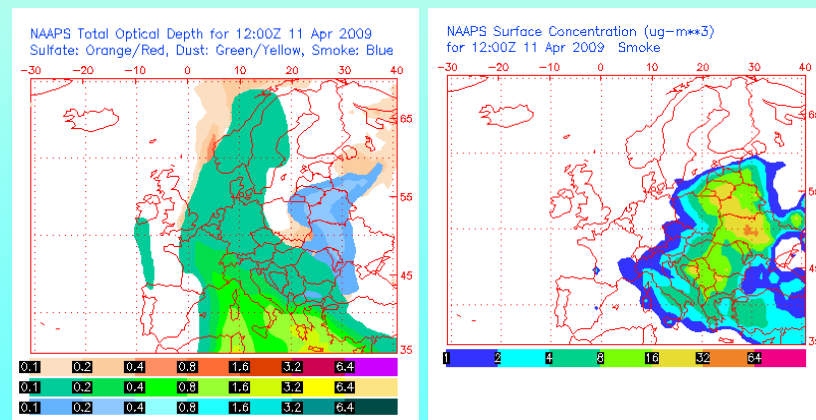
Сравнение результатов переноса продуктов пожаров в России и Украине в регион Беларуси 11-04-2009 г



Разрез высотного профиля показателя обратного аэрозольного рассеяния на основе измерений космического лидара CALIPSO. Выделенный прямоугольником участок – регион Беларуси

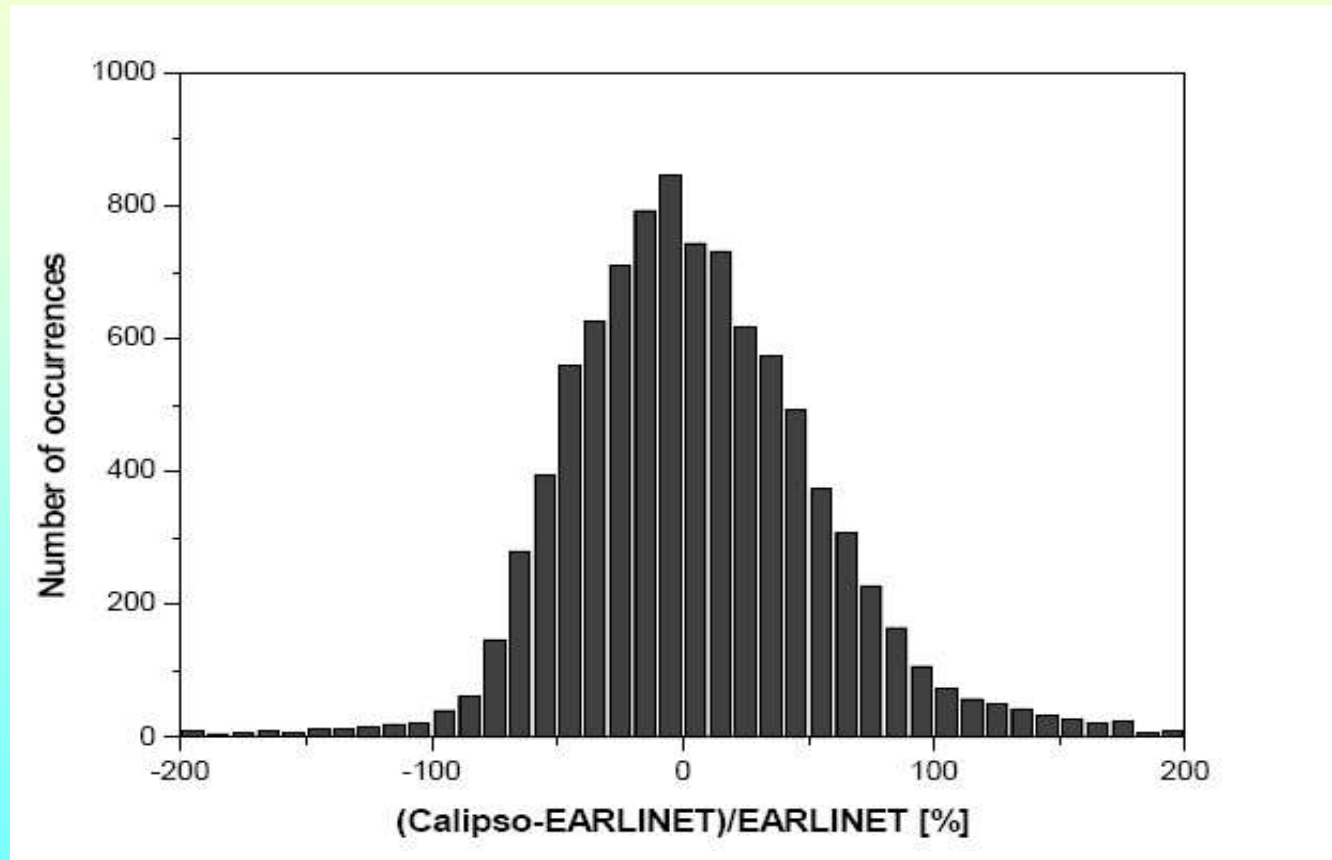


Лидарные измерения профиля показателя обратного аэрозольного рассеяния (b) и степени деполяризации (D) в Минске, синим прямоугольником выделен слой, загрязненный частицами дыма



Распределение аэрозольной оптической толщи (слева) и дымов (справа) в приземном слое, модель NAAPS

Распределение относительных разностей между измерениями обратного рассеяния данных CALIPSO и станций EARLINET



Следующие параметры характеризуют полученное распределение: среднее отклонение (относительное) - 4.6%, относительное стандартное отклонение - 50% и медиана - 0.6%.

Модели распространения загрязнений

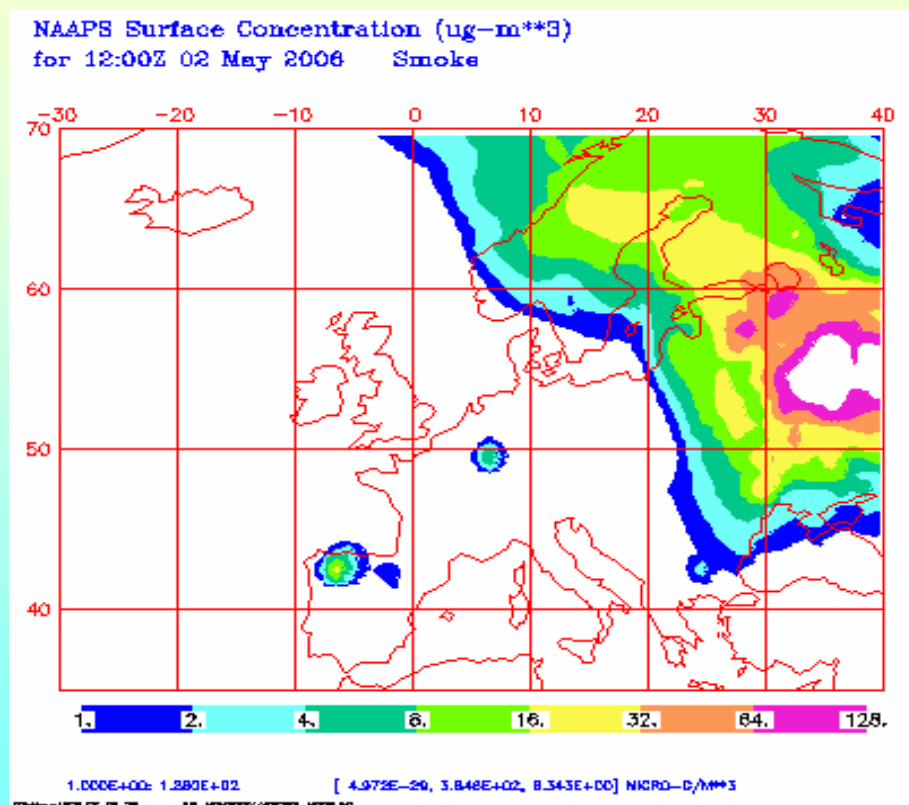
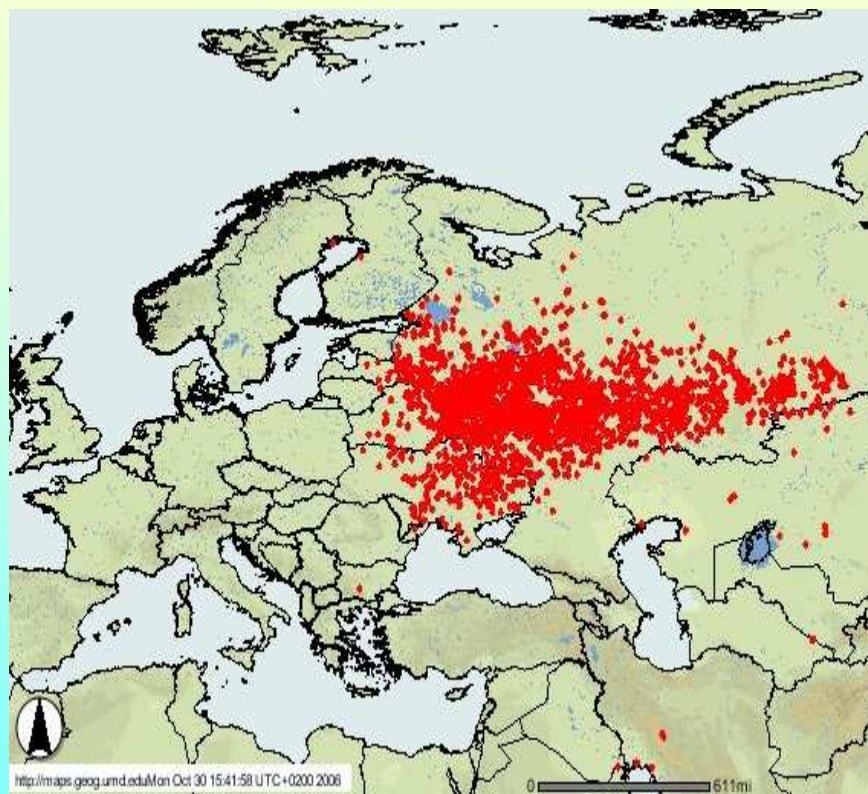
- NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System) предлагает модель распространения аэрозольных компонентов (сульфатный аэрозоль, пыль, дымы), прогноз эпизодов крупномасштабного переноса аэрозоля и определяет регион распространения загрязнения.
- Модели переноса Сахарской пыли представлены на сайте университета Афин (Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group of National and Kapodistrian University of Athens) и вычислительного центра в Барселоне (BSC-CNS - National Supercomputing Center in Barcelona), Испания.
- EURAD- Мезомасштабная химическая модель предназначена для прогнозирования переноса атмосферных примесей в тропосфере и нижней стратосфере и оценки качества воздуха в Европейском регионе. Информация об источниках выбросов берется из базы данных EMEP.
- метод, основанный на статистике обратных траекторий. *Входными данными этого метода являются данные мониторинга содержания примеси за длительное время (например, за год или несколько лет) и набор обратных траекторий воздушных масс, приходящих в точку мониторинга в моменты измерения концентрации.*

Процедура мониторинга трансграничного переноса загрязнений в атмосфере в регионе Беларуси



**Межрегиональный
перенос обусловленный
аномальными
природными явлениями
(пожары, пылевые бури,
извержения вулканов)**

Загрязнение воздуха продуктами лесных и торфяных пожаров



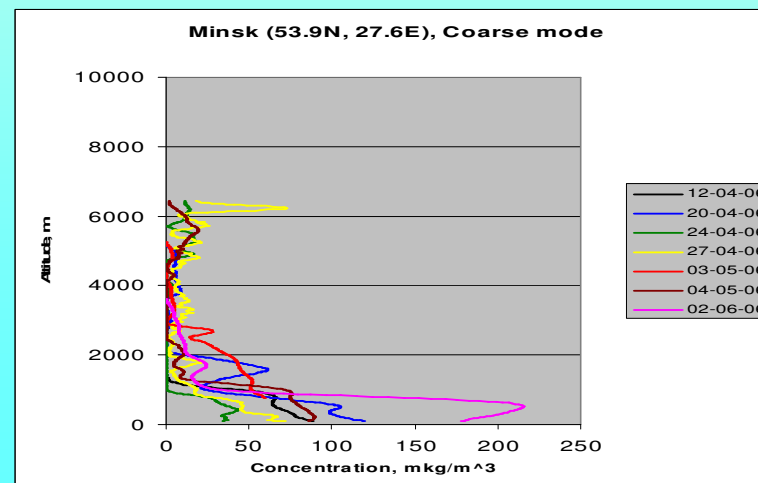
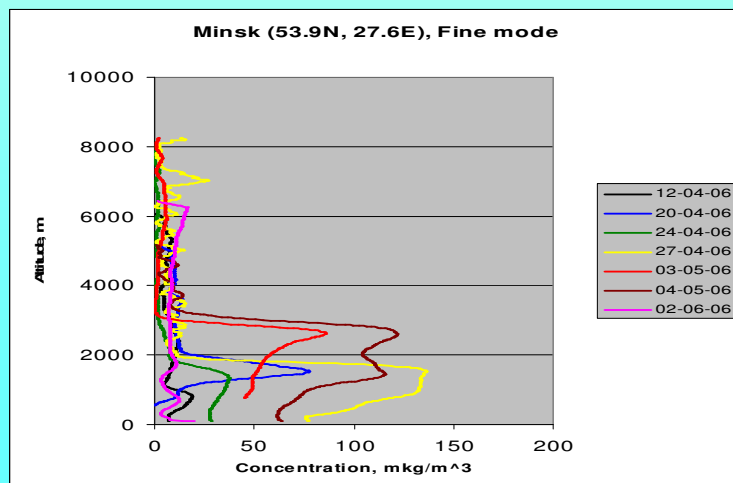
– Развитие пожаров в сопредельных с Беларусью регионах 02 мая 2006 по данным MODIS (слева) и распределение концентрации дымов в приземном слое по данным FIRMS на сайте <http://maps.geog.umd.edu> (справа) Ветры дули с Украины и западных районов России

Одним из значимых негативных последствий выноса дымов явилось загрязнение Арктического региона. Для наблюдения за этим процессом было организована координированная работа лидарных и радиометрических станций на пространстве от Беларуси до Шпицбергена [21].

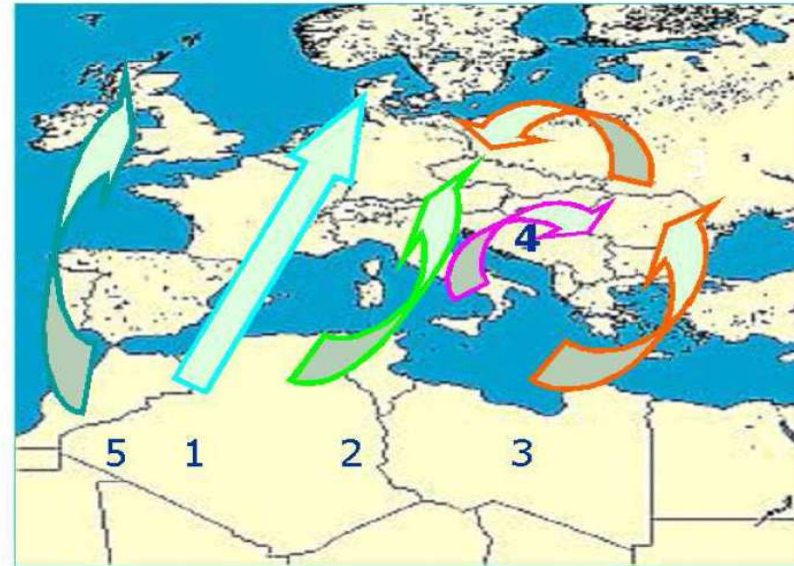
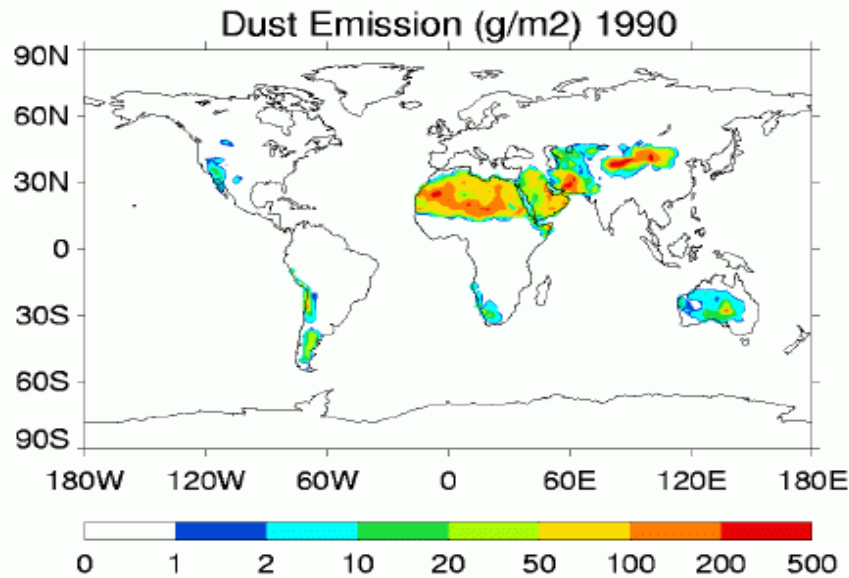
Схема станций приведена на рисунке.



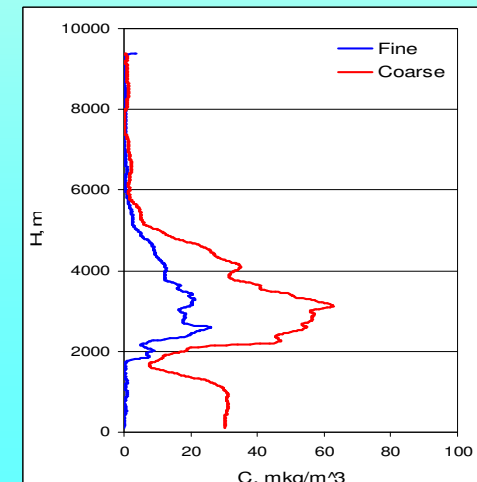
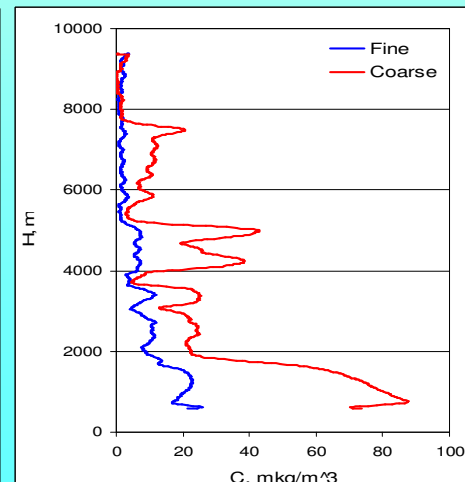
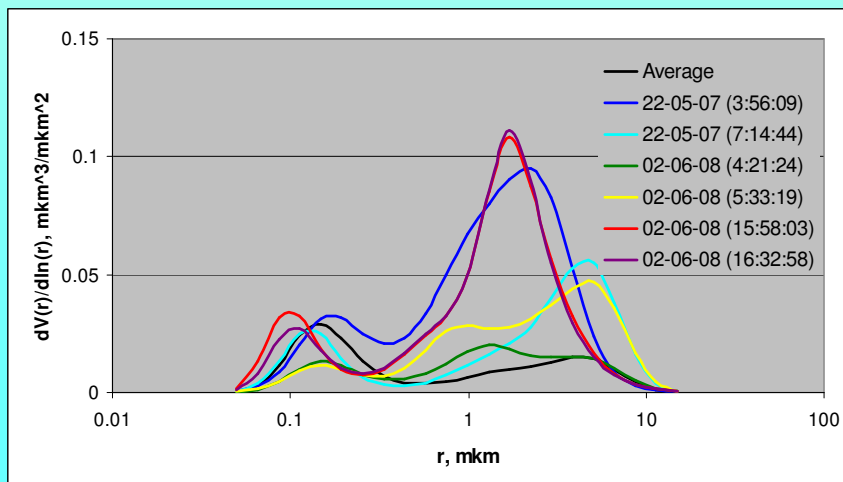
Перенос продуктов пожаров приводит к возрастанию концентрации мелкодисперсной фракции взвешенных частиц с диаметром менее 1 мкм. Соотношение между концентрациями PM-2.5 к PM-10, приблизительно равными в обычных условиях при загрязнении продуктами дымов в регионе Беларуси смещалось в сторону 5-10 кратного увеличения относительной концентрации мелких частиц, что вредно для здоровья населения в загрязненных регионах.



Перенос пыли в районы Беларуси



Доля дней в году, когда наблюдается перенос пыли в Европу составляет 5-7 %. Наибольшая частота обнаружения пыли – 10 %- юг Италии. Лидарная станция в Минске обнаруживала слои пыли для около 2% дней наблюдений. В период выноса пыли концентрация крупнодисперсной моды значительно возрастает, в то время, как мелкодисперсная фракция остается сравнительно стабильной.



**Загрязнение
атмосферы
действующими
вулканами**

Перенос вулканического пепла вулкана Eyjafjallajökull в регионы Европы (20 марта – 20 мая 2010 года)

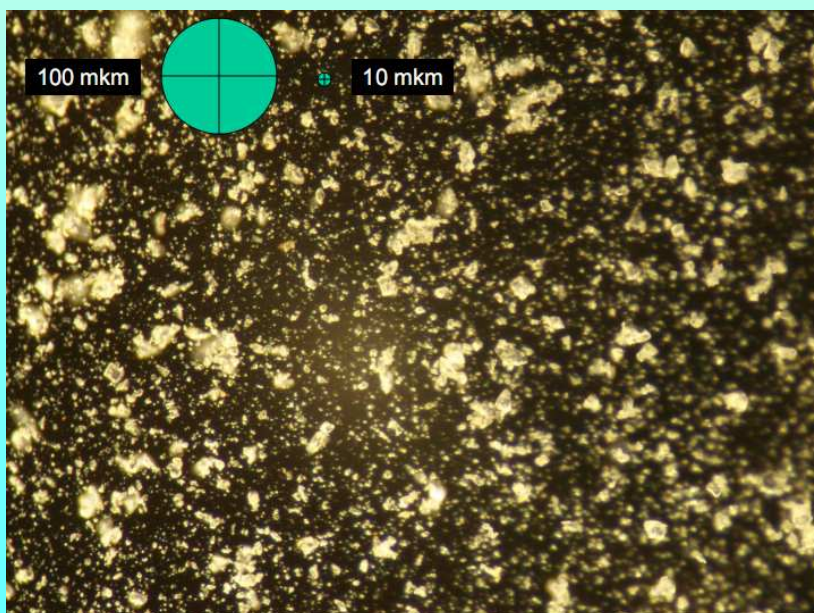
Дистанционные наблюдения за облаком пепла проводились в европейской лидарной сети EARLINET, в том числе на станции в г. Минске и в районе г. Лилля (Франция) в сотрудничестве с учеными Лилльского университета. Результаты измерений в Лилле и Минске позволили оценить трансформацию характеристик взвешенных частиц в процессе их переноса. В 2011 г. вулканическая деятельность в Исландии в Беларуси не проявилась.



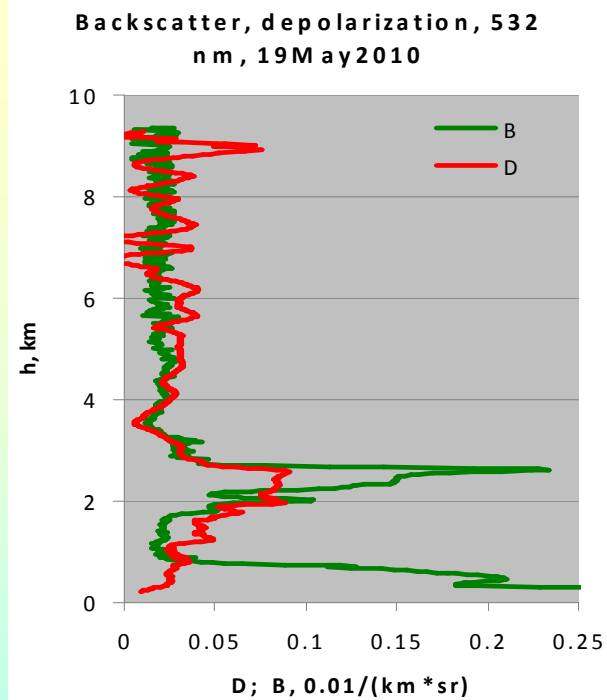
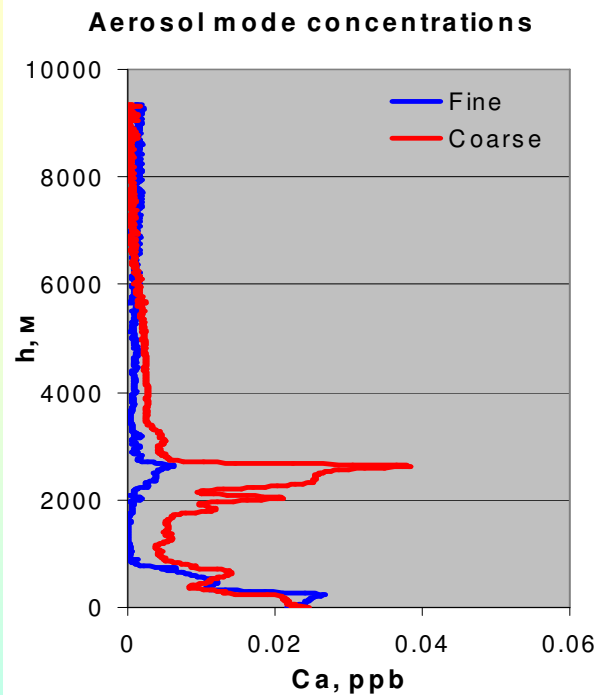
Солнечный спектральный фотометр (в самолете) для измерения параметров аэрозоля



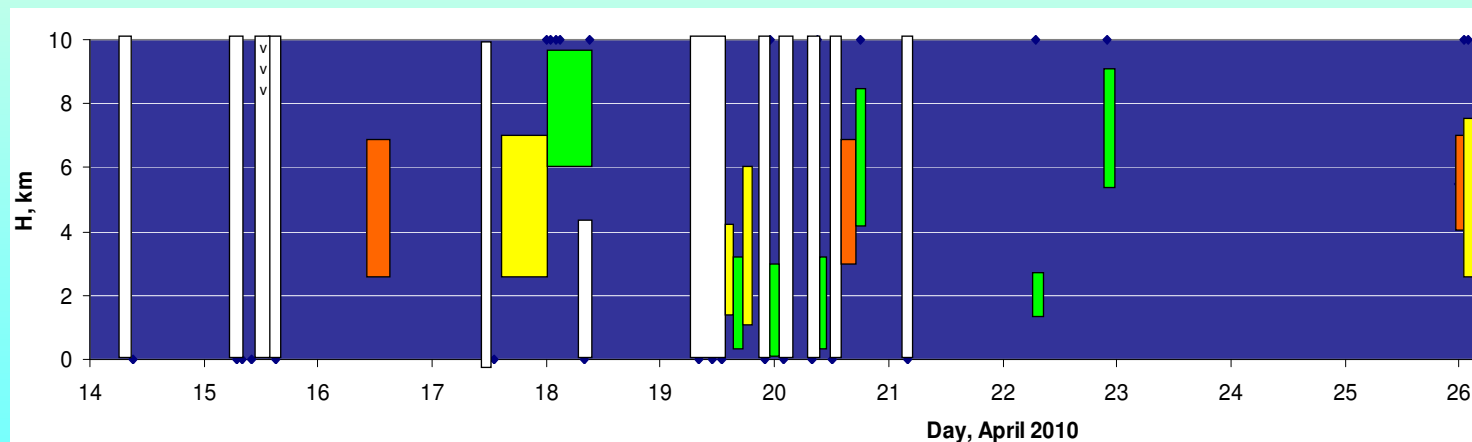
Многоволновый поляризационный Рамановский лидар и солнечные радиометры



Микрофотография частиц вулканического пепла, круги размером 10 и 100 мкм приведены для сравнения



**Высотные профили
концентрации
мелкой (Fine) и
крупной (Coarse)
фракций аэрозоля,
показателя
обратного рассеяния
(B) и аэрозольной
деполяризации,
Лилль**

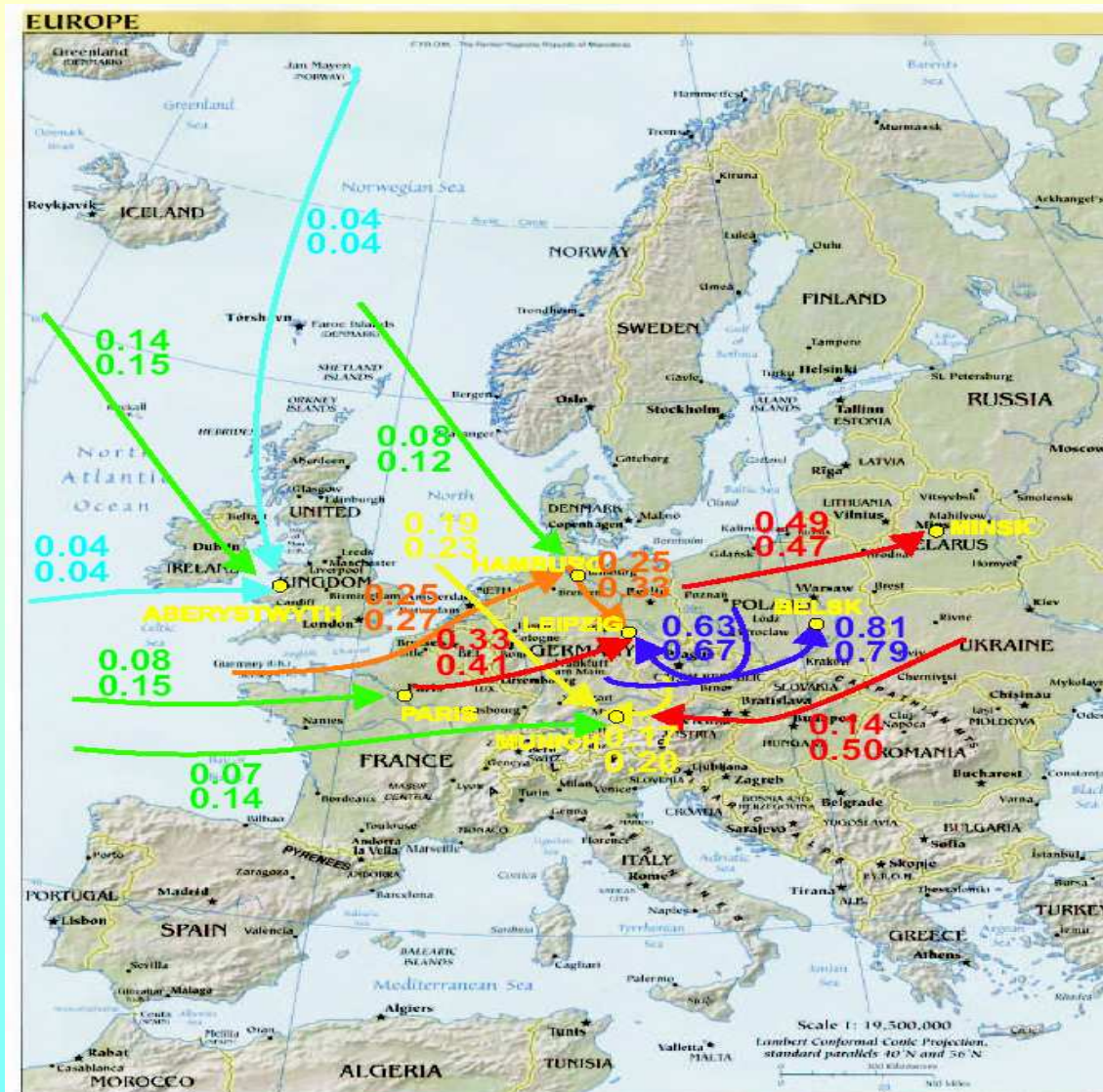


Результаты идентификации слоев вулканического пепла в Минске в период 14 – 27 апреля 2010 г. Цвет белый-пепел отсутствует; оранжевый - пепел; желтый - следы пепла; зеленый – смесь.

**Межрегиональный
перенос
обусловленный
антропогенной
деятельностью**

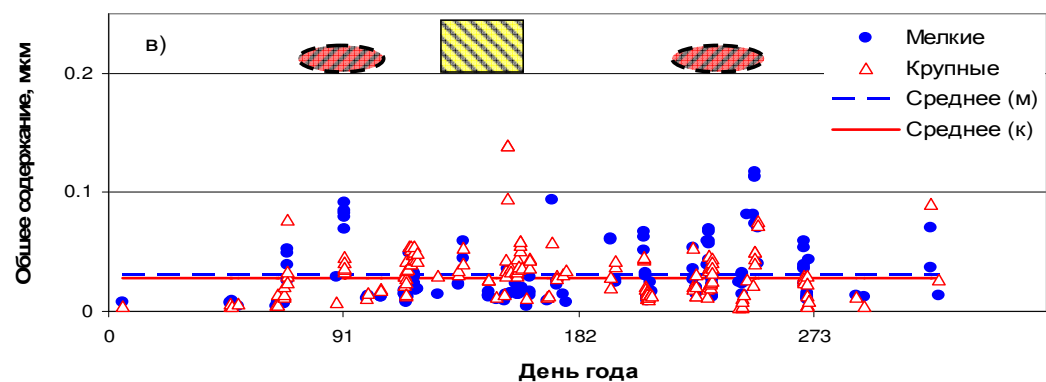
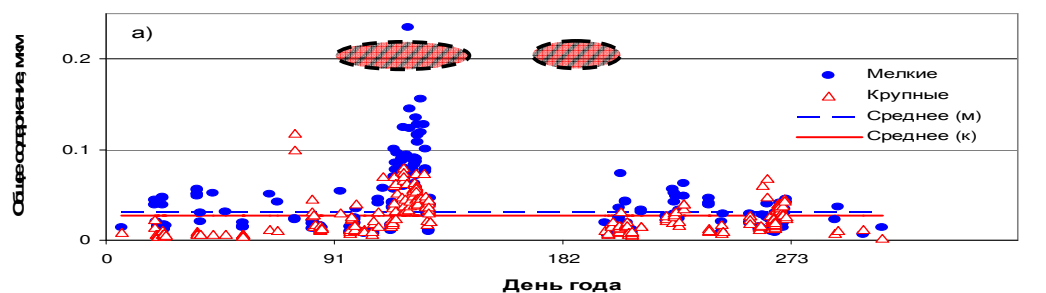
Загрязнение воздуха антропогенным аэрозолем

- **Значительную часть загрязняющих примесей выбрасывают в атмосферу антропогенные источники, в частности, до 10 – 20 % общей массы аэрозольного вещества. Источники антропогенного аэрозоля сосредоточены в индустриальных и населенных районах. Данные о мощности выбросов содержатся в отчетах ЕМЕР. Воздействие переноса загрязнений антропогенного происхождения в Беларуси проявляется в основном в увеличении средних значений концентраций примесей. Однако антропогенные выбросы и перенос этих продуктов могут быть причиной резких подъемов концентрации частиц РМ-10, наблюдаемых в холодные периоды на станции в Березинском заповеднике (Беларусь) и Бельске (Польша). В это время в связи с отопительным сезоном возрастает мощность выбросов и уменьшается высота слоя перемешивания. Эти факторы способствуют накоплению частиц в приземном слое. Модель NAAPS прогнозирует для таких условий формирование области значительного регионального загрязнения с концентрацией взвешенных частиц порядка 20-30 мкг/м³.**



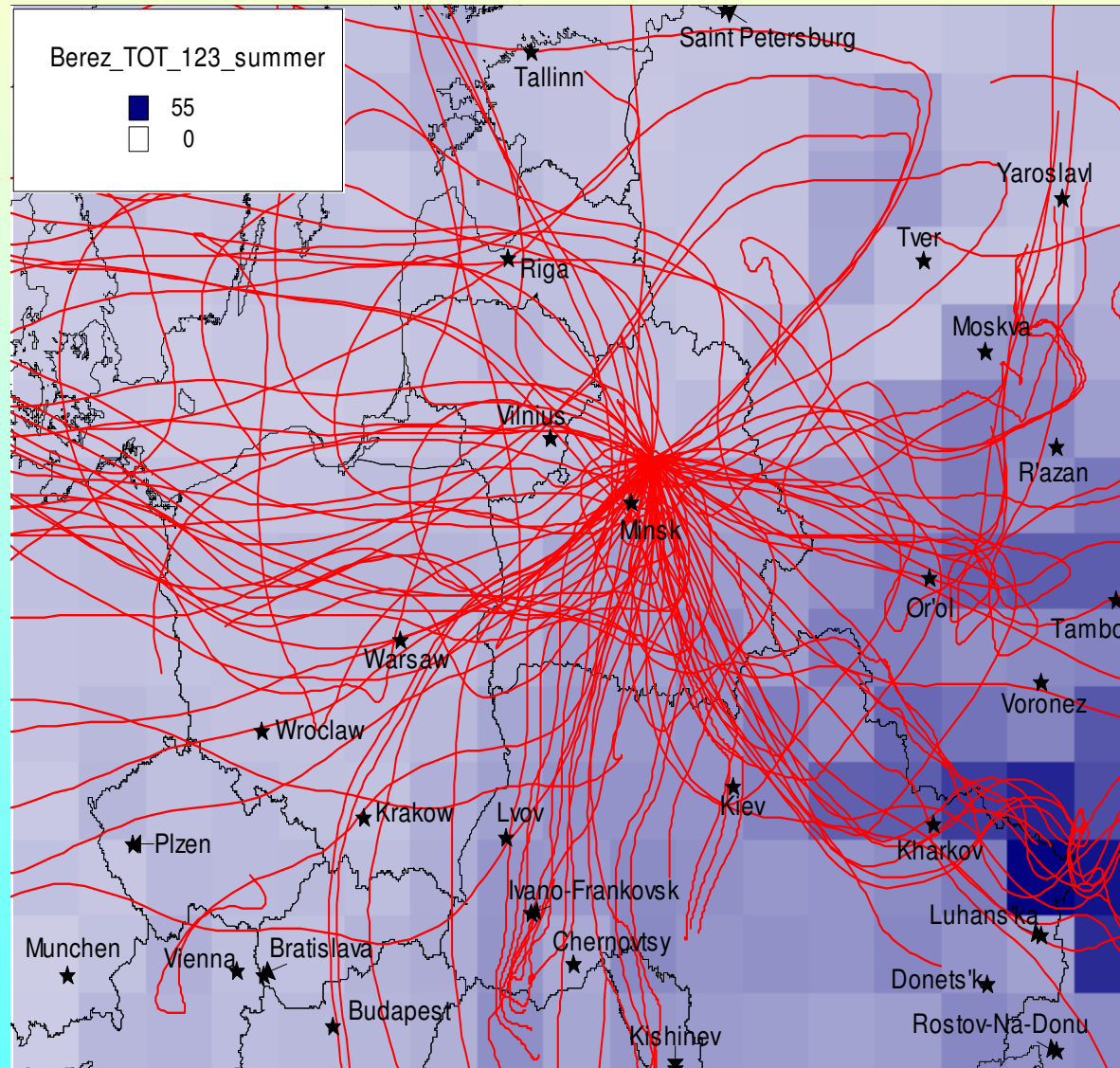
Воздушные потоки через Европейский регион и устанавливаемые ими оптические аэрозольные толщину, длина волны 355 нм, верхняя цифра – зимний период, нижняя – летний период.

Общее содержание мелкой и крупной аэрозольных фракций по данным радиометрических измерений, 2006 – 2008 гг. , Минск; овалами отмечены события переноса продуктов пожаров, прямоугольниками - пыли



Отношение содержания частиц PM-2.5 к PM-10, в среднем равное 0.6, при загрязнении атмосферы выносами дымов увеличивалось до 0.8, т.е. загрязнение происходит в большей степени за счет повышения концентрации наиболее опасной для здоровья человека мелкой фракции взвешенных частиц

Пространственная плотность мощности источников аэрозолей, влияющих на состояние атмосферы в Березинском заповеднике в теплые сезоны и траектории воздушных масс, на высоте 950 гПа (650 м.) в дни с концентрациями аэрозолей, в два и более раз превышающие средние



Густота траекторий свидетельствует о том, насколько часто проявлялось влияние этих источников. Видно, что в теплые сезоны наиболее мощные источники аэрозолей находятся на восточной границе Украины с Россией, более слабые - на западе Украины и черноземном поясе России. В холодные сезоны (рисунка нет) наиболее мощные источники аэрозолей расположены на большей части Украины, юго-востоке Беларуси, в районе Москвы. Наибольший вклад в загрязненность атмосферы Минска взвешенным веществом дают южные и восточные территории. Менее всего загрязняют атмосферу северные территории.

Благодарю

за

ВНИМАНИЕ