

Федеральная служба по гидрометеорологии  
и мониторингу окружающей среды



**ГЛАВНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ  
ОБСЕРВАТОРИЯ  
ИМ. А. И. ВОЕЙКОВА**

*Год основания 1849*



# МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА: ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Е.Л. Генихович

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

Научно-практическая конференция «Загрязнение атмосферы городов»,  
С. Петербург, 1-3 октября 2013 г.

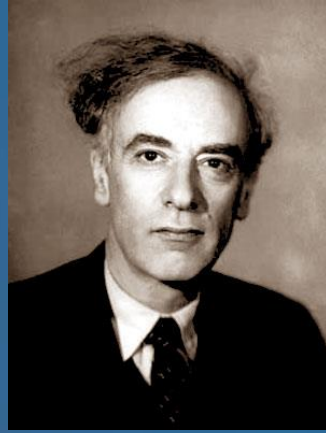


# Введение

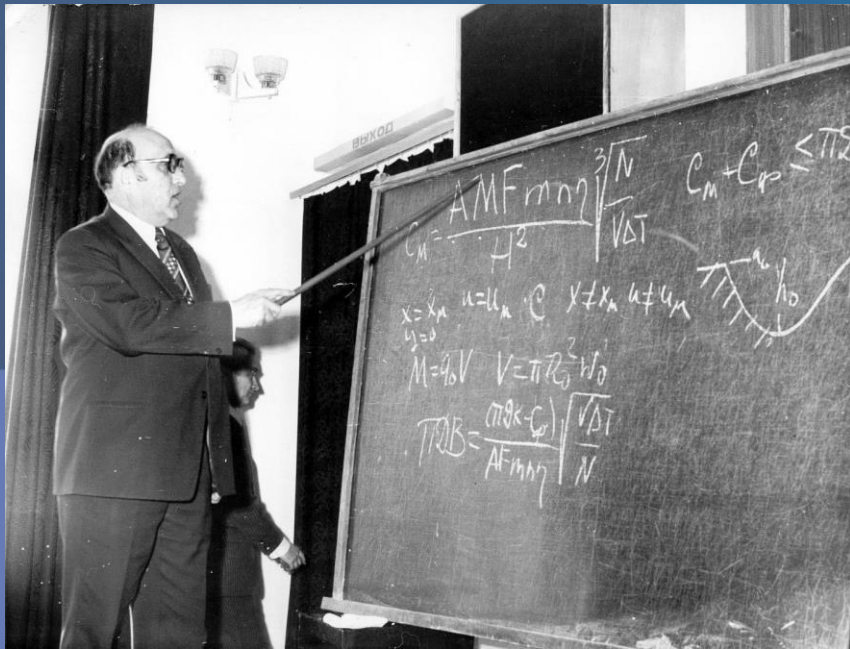
- Исследования в области моделирования и прогноза загрязнения атмосферы активно ведутся во многих развитых странах;
- В России еще в советское время успешно работающие в этом направлении научные коллективы сформировались в ряде городов страны;
- Поскольку, однако, наша конференция имеет «юбилейный характер», я сосредоточусь, главным образом, на работах ГГО;
- Прежде всего, в данной связи я хотел бы вспомнить проф. М.Е. Берлянда, сыгравшего выдающуюся роль в развитии научных основ и практической организации системы мониторинга загрязнения воздуха в нашей стране;
- В связи с задачами прогнозирования загрязнения воздуха я хотел бы специально упомянуть также проф. Л. Р. Сонькина (см. далее).



# М.Е. Берлянд (1919 – 2006)

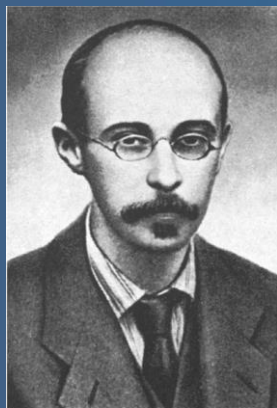


- М.Е. Берлянд – теорфизик, ученик Д.Д. Иваненко и, «через него», Л.Д. Ландау (сдал «Ландау-минимум»). Это при том, что в студенческие годы (1924 – 27) Иваненко и Ландау тесно дружили и совместно работали, но потом личные отношения у них были скверные;
- Главные направления научной деятельности :  
теплоперенос в АПС;  
прогноз туманов; атмосферная диффузия и загрязнение атмосферы;
- Основной идеолог и организатор национальной системы мониторинга, моделирования и прогноза загрязнения атмосферы и нормирования промышленных выбросов в атмосферу





# Учителя

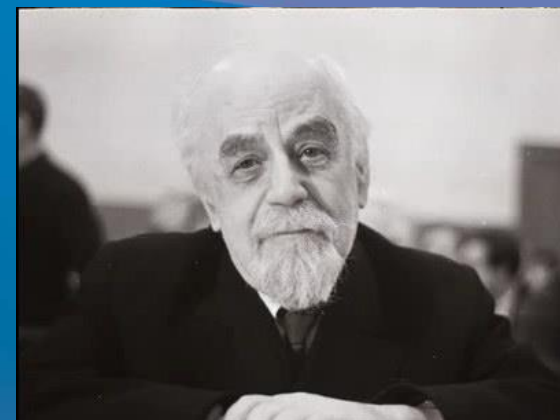


*А.А. Фридман*

А.А. Фридман



Акад. В.А.Фок



Акад. В.И. Смирнов



Акад. О.А. Ладыженская



Акад. Л.Д. Фаддеев

Фок – ученик Фридмана;

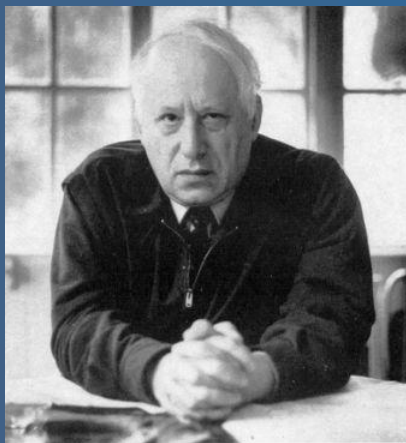
Смирнов – дружил с Фридманом (через своего соавтора и друга Я.Д. Тамаркина, который был одноклассником Фридмана);

Ладыженская – аспирантка С.Л. Соболева, ученика В.И. Смирнова, и его (В.И.) многолетняя сотрудница;

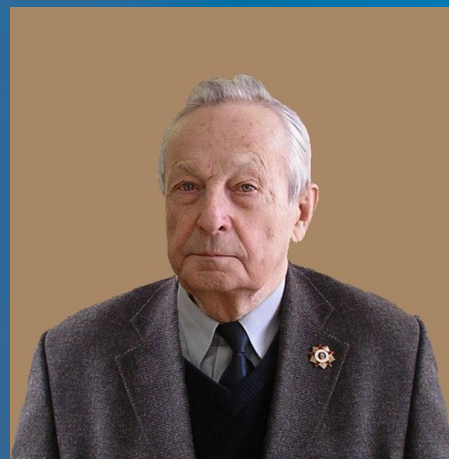
Фаддеев – ученик Ладыженской



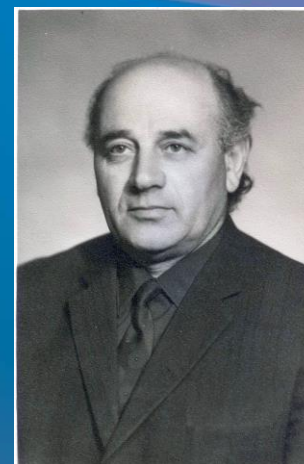
# Коллеги



Акад. М.И. Будыко



Акад. К.Я. Кондратьев



Д.Л. Лайхтман



М.И. Юдин



Л.С. Гандин



А.С. Дубов



Р.Л. Каган



М.Е. Швец



# Как это началось

- В начале 1960-х годов в стране возникла потребность в резком наращивании мощностей тепловых электростанций. Однако существовавшие в то время формулы для определения минимальной высоты дымовой трубы (напр., формула Андреева) приводили для этих новых мощных ТЭС к нереально высоким трубам (500 м и более);
- В ГГО этой проблемой занялись 2 группы, которыми руководили профессор М.Е. Берлянд и Д.Л.Лайхтман, и в остром соревновании «победила группа М.Е. Берлянда». От энергетиков в работах участвовали Б.В. Рихтер, Э.П. Волков, Е.И. Гаврилов и др., а от гигиенистов – Р.С.Гильдкенскиольд, К.А.Буштуева и др.
- Модель ГГО, на основе которой были разработаны последующие документы, включая действующий ОНД-86, прошла тщательную экспериментальную проверку на материалах натуральных и лабораторных измерений, проводившихся в нашей стране и за рубежом, неоднократно успешно участвовала в сравнениях с зарубежными моделями.
- Научные результаты, полученные при разработке модели ГГО, были учтены при создании государственной системы инструментального мониторинга ЗА.

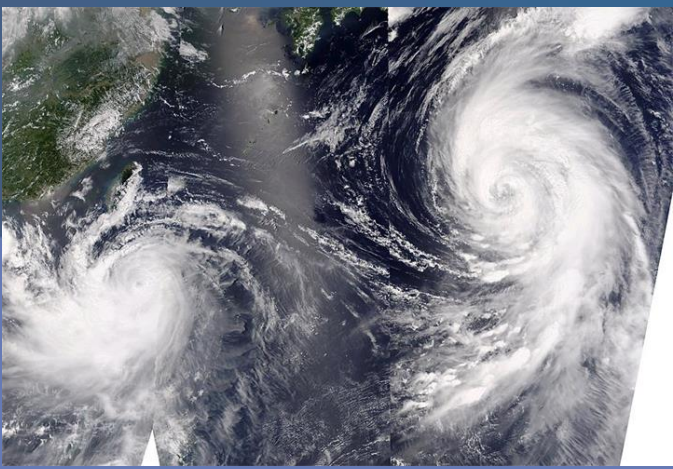
# Специфика моделирования атмосферной диффузии – в необходимости учета влияния турбулентных вихрей на всех пространственно-временных масштабах



Дым от горящей спички



Меандрирующий факел:  
лесной пожар  
в районе  
оз. Байкал



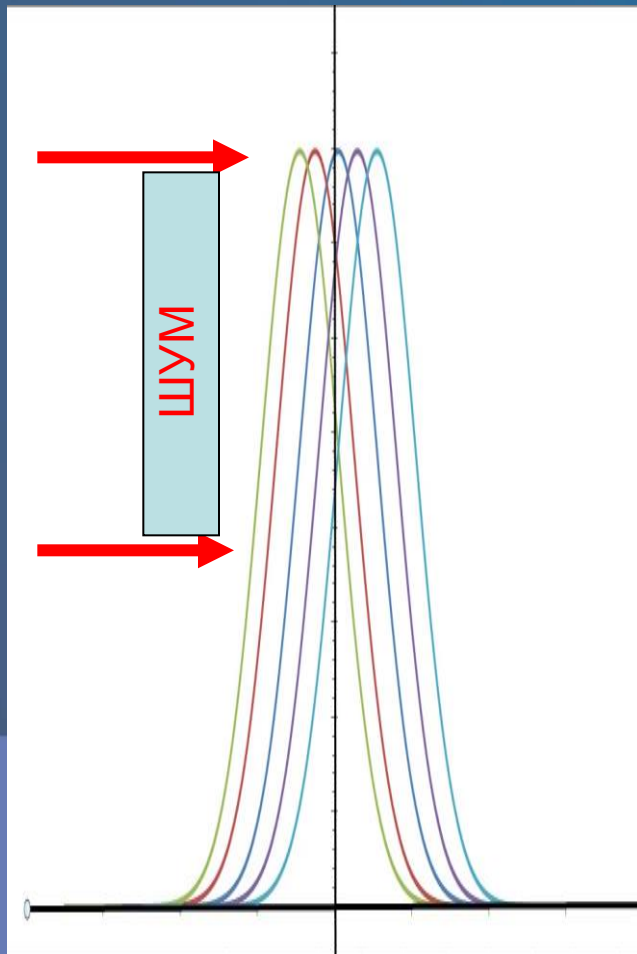
Двойной тайфун в Южно-  
Китайском море, 2004 г.



Меандрирование  
факела по гори-  
зонтали и по  
вертикали



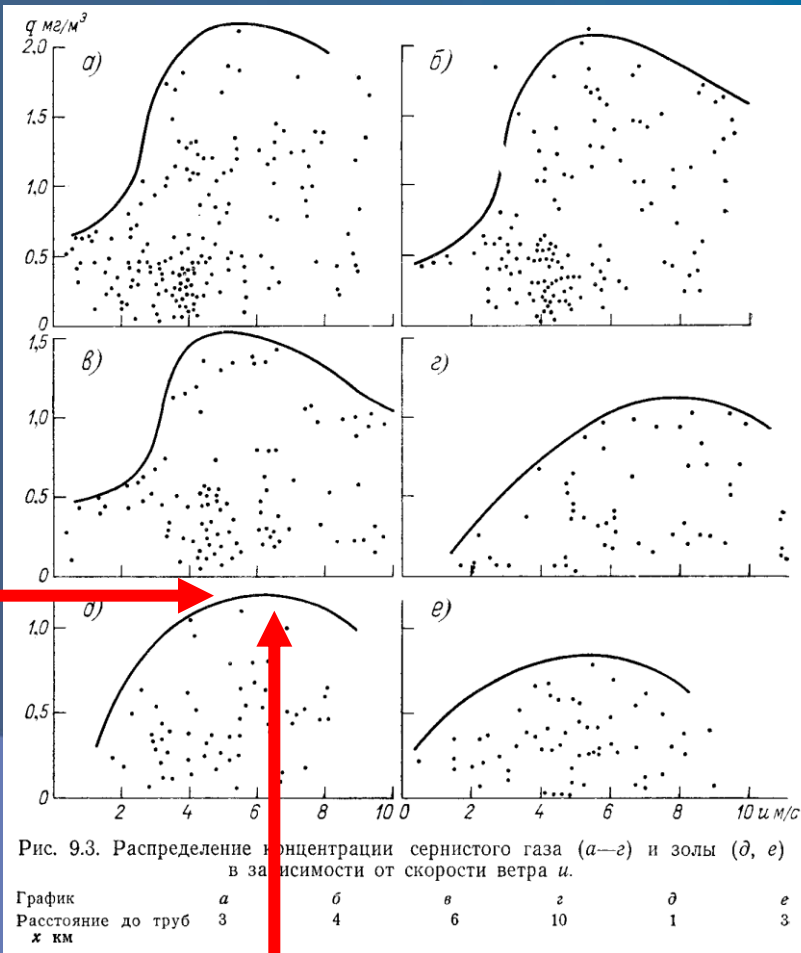
# Измерение концентраций в меандрирующей факеле



- При фиксированном среднем направлении ветра положение факела относительно прибора за счет меандрирования изменяется случайным образом.
- Поскольку факел «узкий», это приводит к значительным случайным колебаниям измеряемых концентраций, в то время как модель при постоянном среднем направлении ветра будет предсказывать постоянное значение концентрации на приборе.
- Отсюда – огромные (сотни и тысячи процентов) погрешности, возникающие при валидации моделей атмосферной диффузии.

# Идея М.Е. Берлянда – переход к максимальным концентрациям

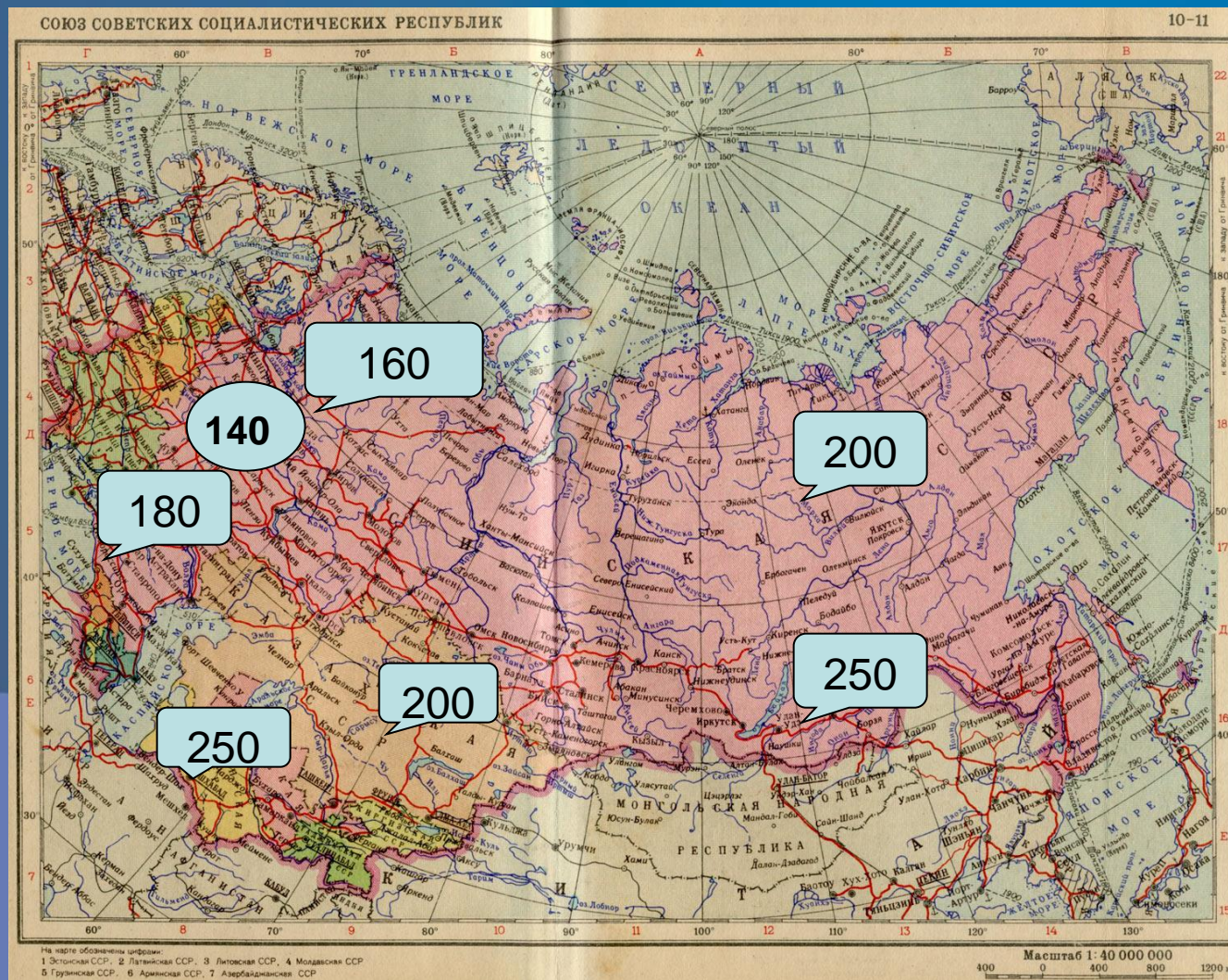
- Для каждой дистанции строится зависимость измеренных концентраций от скорости ветра;
- Для получившегося «облака точек» строится огибающая, причем «незначительное количество точек» может быть «оставлено снаружи»;
- Сейчас «технология» несколько изменилась, но идея «мажорантной фильтрации» случайного шума, возникающего за счет меандрирования факела, остается центральной;
- «Отскочившие точки» соответствуют НМУ. Если по прогнозу ожидается НМУ, то выбросы ЗВ должны регулироваться.



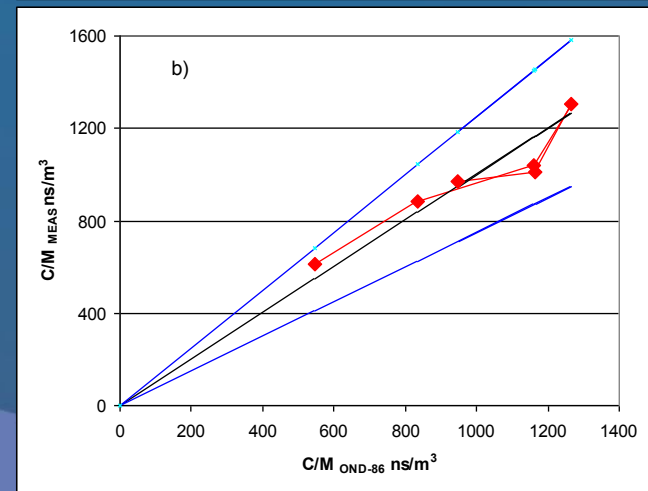
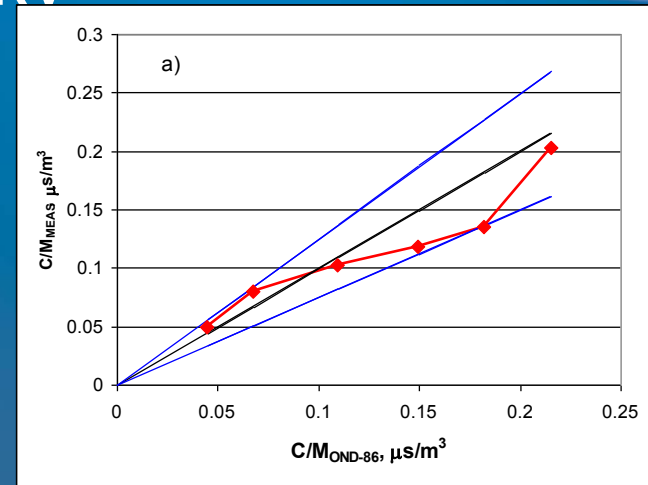
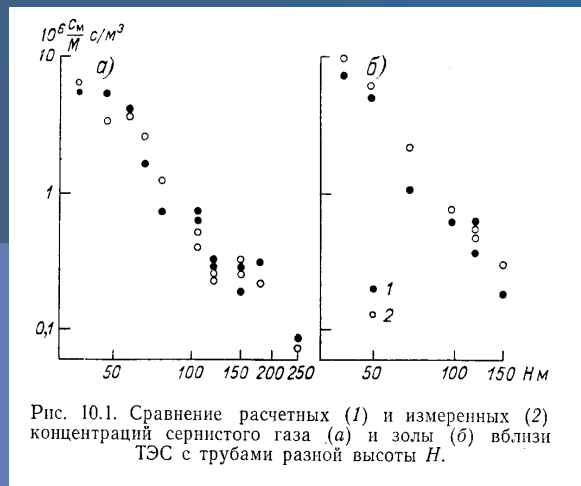
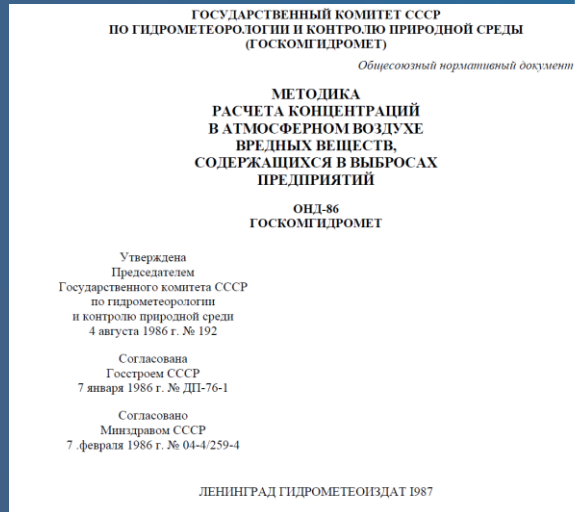
Опасная концентрация

Опасная скорость

# Распределение к-та А по территории СССР / России



# Разработанные методики расчета прошли тщательную экспериментальную проверку



Кинкейд

Индианаполис

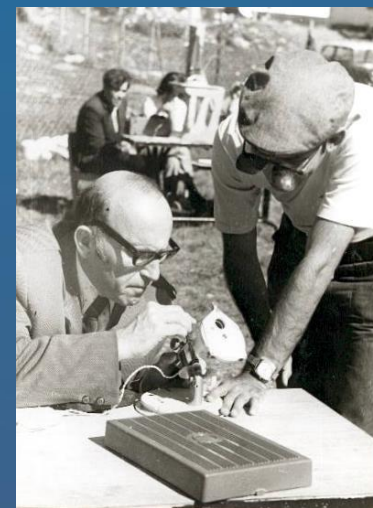
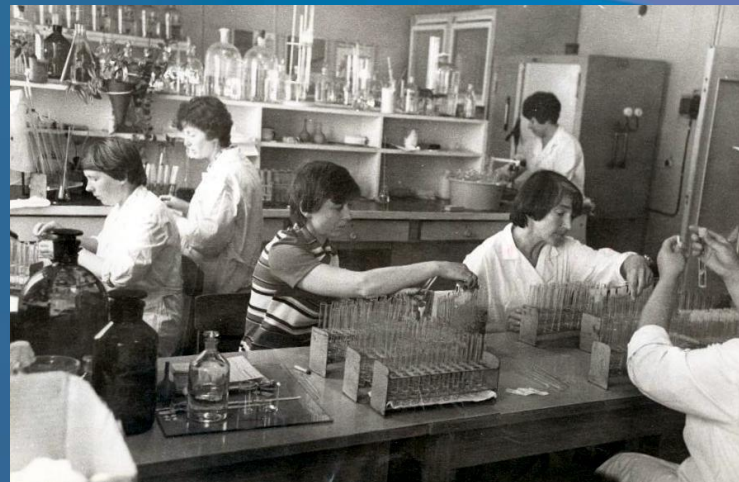
**Погрешность расчетной модели ~ 25%**

# Огромную роль в развитии работ по моделированию ЗА сыграли экспедиционные исследования, натурные и лабораторные эксперименты

- Проведены десятки экспедиций в различные регионы страны, причем исследования проводились вблизи электростанций, алюминиевых заводов, химкомбинатов, строящихся предприятий (напр., Разданский ГХК), электродных заводов и др.
- В рамках проекта КЕНЭКС (Комплексный энергетический эксперимент) детально обследован воздушный бассейн крупного промышленного города (Запорожье);
- Совместный с США эксперимент АВТОЭКС был посвящен, в частности, изучению загрязнения выхлопными газами автотранспорта воздушного бассейна С. Петербурга и ряда других городов;
- ГГО принимала участие в работах по созданию взрывом противоселевой плотины вблизи Алма-Аты (5000 тонн тротила);
- По техническому заданию ГГО и при участии специалистов ГГО и МГУ проведены детальные исследования моделей препятствий (“Russian Hill”) в геофизической аэродинамической трубе ЕРА (США);
- Лабораторные исследования проводились также в а/д трубах МГУ и Ленинградского кораблестроительного института.



# Экспедиции и эксперименты





# Международное сотрудничество



EPA-600/4-91-067  
August 1981

FLOW AND DISPERSION OF POLLUTANTS OVER TWO-DIMENSIONAL HILLS  
Summary Report on Joint Soviet-American Study

by

Leon H. Khurshudyan  
Main Geophysical Observatory  
Leningrad, U.S.S.R.

William H. Snyder  
Meteorology and Assessment Division  
Environmental Sciences Research Laboratory  
U.S. Environmental Protection Agency  
Research Triangle Park, NC 27711

Igor V. Nekrasov  
Institute of Mechanics  
State University of Moscow  
Moscow, U.S.S.R.

ENVIRONMENTAL SCIENCES RESEARCH LABORATORY  
OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT  
U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY  
RESEARCH TRIANGLE PARK, NC 27711





# Л.Р. Сонькин (1928 – 2011)



- Окончил ЛГМИ (1952 г.) и Военно-морскую академию кораблестроения и вооружения им. А.Н. Крылова (1953 г.);
- Служил на Камчатке;
- В 1960 г. поступил в аспирантуру ГГО;
- В 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию и поступил на работу в ГГО;
- Ведущий автор (совместно с М.Е. Берляндом) основных нормативно-методических документов по прогнозу ЗА.



# Основные особенности традиционного подхода ГГО к прогнозированию ЗА

ГЛАВНАЯ  
ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ  
ОБСЕРВАТОРИЯ  
ИМ. А.И.ВОЕЙКОВА



- Долгосрочное прогнозирование ведется с использованием детерминированных, а оперативное краткосрочное – с использованием стохастических моделей (одна из причин – отсутствие данных, в том числе, оперативных, о выбросах ЗВ).
- Как моделирование, так и прогнозирование ЗА основаны на едином понимании физики процессов, определяющих ЗА;
- Для повышения качества результатов должна предусматриваться фильтрация шумов;
- Аппарат стохастического моделирования должен обеспечивать возможность учета реальных особенностей протекающих в атмосфере процессов, в том числе, нелинейность связей, наличие периодических компонент и трендов, возможные отклонения от нормального закона в распределениях рассматриваемых переменных и др.;
- Конечной целью работ является внедрение соответствующих моделей в оперативную практику территориальных подразделений гидрометслужбы, в том числе, с целью прогноза НМУ и выдачи предупреждений о необходимости обеспечить регулирование выбросов ЗВ в атмосферу;
- В связи с массовостью применения, разработка и использование в оперативном режиме моделей прогноза в сетевых подразделениях не должны быть связаны с нереально высокими требованиями к квалификации прогнозистов.

# Оперативный прогноз ЗА в территориальных органах гидрометслужбы (будет еще секционный доклад!)

- В 2012 г. работы по оперативному прогнозированию ЗА велись для 352 городов РФ;
- Прогнозами обслуживались около 1600 предприятий;
- Работы по оперативному прогнозированию ЗА частично ведутся в рамках специализированного обслуживания потребителей;
- ГГО обеспечивает научно-методическое руководство, обучение специалистов на курсах, а также участвует в выполнении региональных тем, связанных с разработкой новых схем прогноза.



# Современное состояние и перспективы развития работ по моделированию и прогнозу загрязнения атмосферы - 1

- Разработана методология расчета среднегодовых концентраций;
- Созданы заделы для разработки метода расчета «актуальных» концентраций;
- Завершается разработка химической транспортной модели XTM\_ГГО. В качестве метеорологического драйвера с ней испытаны региональные численные модели WRF и MM5;
- Запущена интегрированная система численного прогнозирования последствий лесных пожаров IS4FIRES, разработанная ФМИ. Ведутся работы по ее подключению к XTM SILAM (ФМИ);



# Современное состояние и перспективы развития работ по моделированию и прогнозу загрязнения атмосферы - 2

- Начаты работы по стыковке ХТМ\_ГГО с региональной климатической моделью ГГО (РКМ\_ГГО);
- Методология физико-статистического прогноза загрязнения воздуха в городах обобщена на примере г. Сочи на случай использования автоматизированных систем мониторинга загрязнения атмосферы («прогноз на 1.5 суток + на неск. часов в реальном масштабе времени»). Разработанная стохастическая модель передана НПО «Тайфун» и будет использована, в частности, в период проведения Зимних олимпийских игр в 2014 г.;
- Разрабатывается метод оперативного прогнозирования загрязнения воздуха с использованием детерминированных моделей атмосферной диффузии.
- Выполнена оценка влияния возможных изменений климата до середины XXI века на параметр, учитывающий влияние атмосферной турбулентности в методике расчета загрязнения атмосферы;
- Следующие слайды иллюстрируют некоторые из полученных результатов.



# Поле среднегодовых концентраций $SO_2$ в городе Раахе (Финляндия)

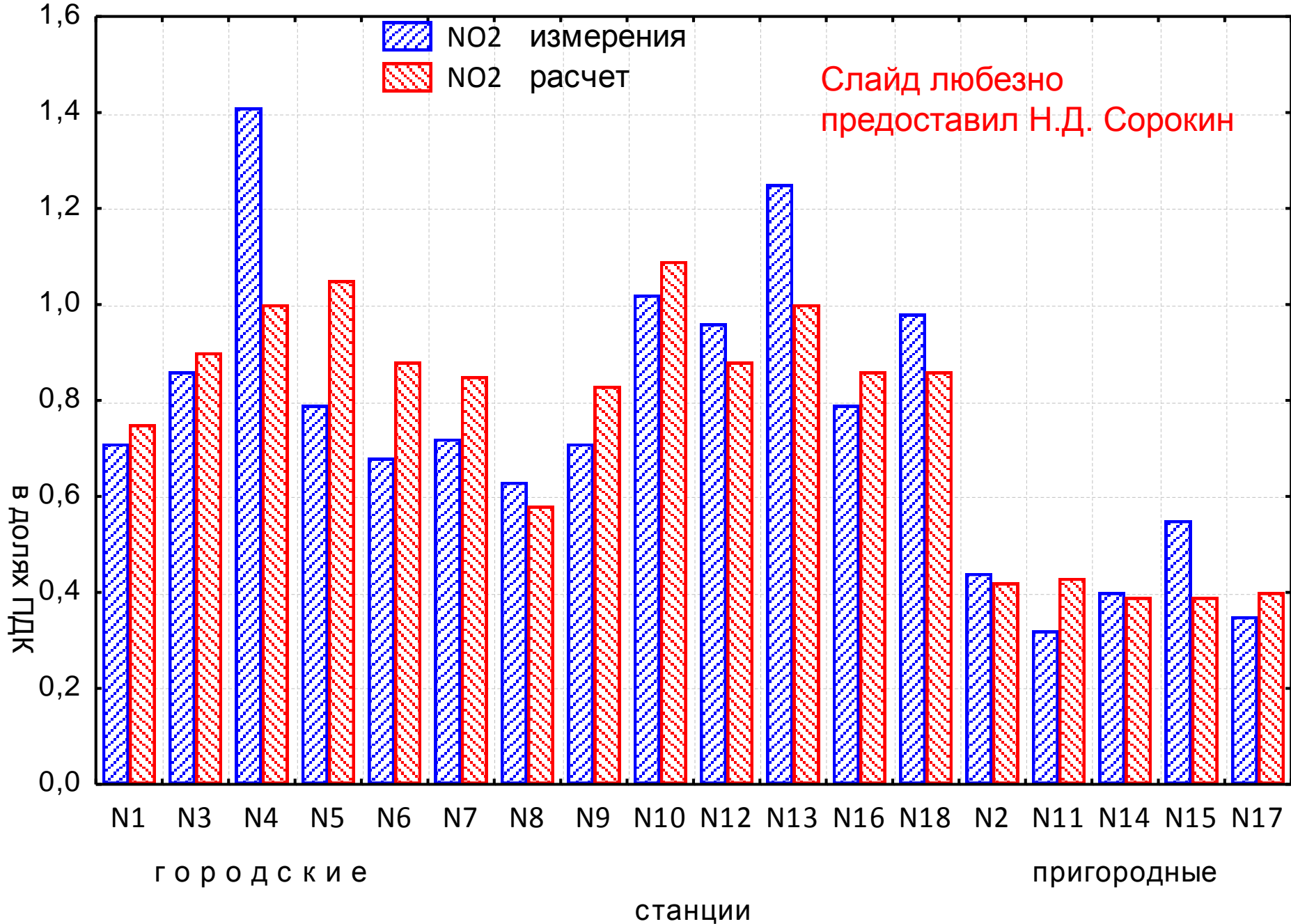


Пост	Координаты		Сизм, мкг/м <sup>3</sup>	Срарч, мкг/м <sup>3</sup>
	Х, м	У, м		
1	1860	2860	11,6	10,2
2	4140	5540	13	13,1

- Данные о выбросах и режиме метеоэлементов были переданы в ГГО из ФМИ;

- Измеренные концентрации были получены в ГГО после передачи в ФМИ результатов расчетов.

# Сопоставление среднегодовых значений NO2 за 2008 г., СПб



# Новая редакция нормативной методики расчета ЗА



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ПОДРОСМЕТРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (РОСГИДРОМЕТ)	
РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ	РД 52.04.212- 2011
МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ	
Санкт-Петербург ФГБУ «ГГО» 2012	

РД 52.04.212-20\_\_

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным учреждением «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» Росгидромета (ФГБУ «ГГО»)

2 РАЗРАБОТЧИКИ С.С. Чернин, канд. физ.-мат. наук, Е.П. Генрихович, д-р физ.-мат. наук, И.Г. Грачева, канд. физ.-мат. наук, А.Д. Зиг, канд. физ.-мат. наук, Р.И. Оникел, канд. физ.-мат. наук, Е.Н. Филатова, канд. физ.-мат. наук, Е.А. Дюкелова

Раздел 13 разработан при участии специалистов ОАО «НИИ Атмосфера» А.Ю. Недре, канд. техн. наук, Н.С. Буренин, канд. геогр. наук, П.М. Шемяко.

3 СОГЛАСОВАН с УМЗА Росгидромета «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г., ФГБУ «НПО «Тайфун» «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.,

4 УТВЕРЖДЕН Руководителем Росгидромета «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

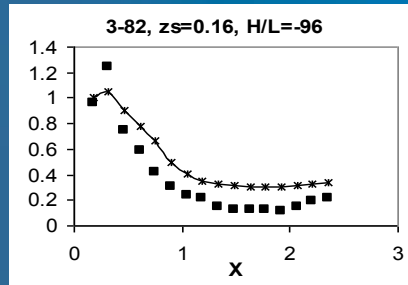
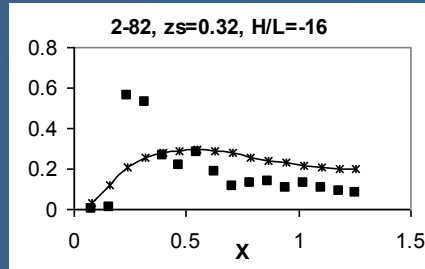
5 ЗАРЕГИСТРИРОВАН ФГБУ «НПО «Тайфун» за номером РД 52.04.212-20\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

6 ВЗАМЕН РД 52.04.212-86 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86». – Д.: Гидрометцентр, 1987

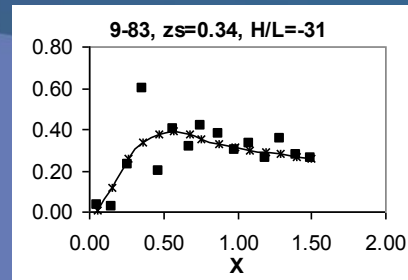
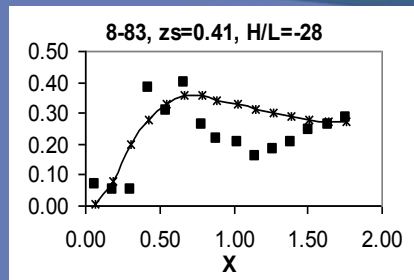
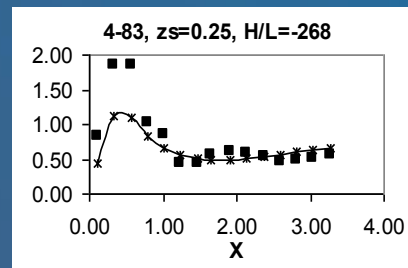
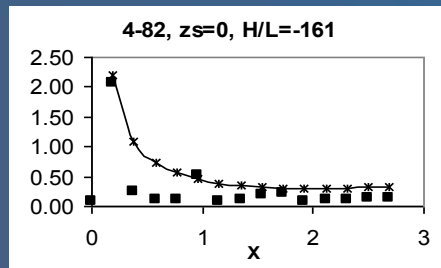
- Новая методика расчета, разработанная взамен ОНД-86, прошла согласование в Росгидромете и находится в МПР на рассмотрении и утверждении;
- В рамках договорных работ с использованием предоставленных заказчиком данных инвентаризации выбросов проведены расчеты загрязнения атмосферного воздуха для одного из крупных северных промышленных городов России, причем отношение рассчитанного и измеренного 98-го перцентиля разовых концентраций оказалось равным 1.07 !

- ❖ Элементы новой методики расчета ГГО уже широко используются в России и официально внедрены в Казахстане и в Белоруссии;
- ❖ Мы получили из МПР замечания по методике и в ближайшее время направим в Росгидромет ее откорректированный вариант.

# Экспериментальная проверка модели расчета актуальных концентраций на данных эксперимента CONDORS (Боулдер, США)

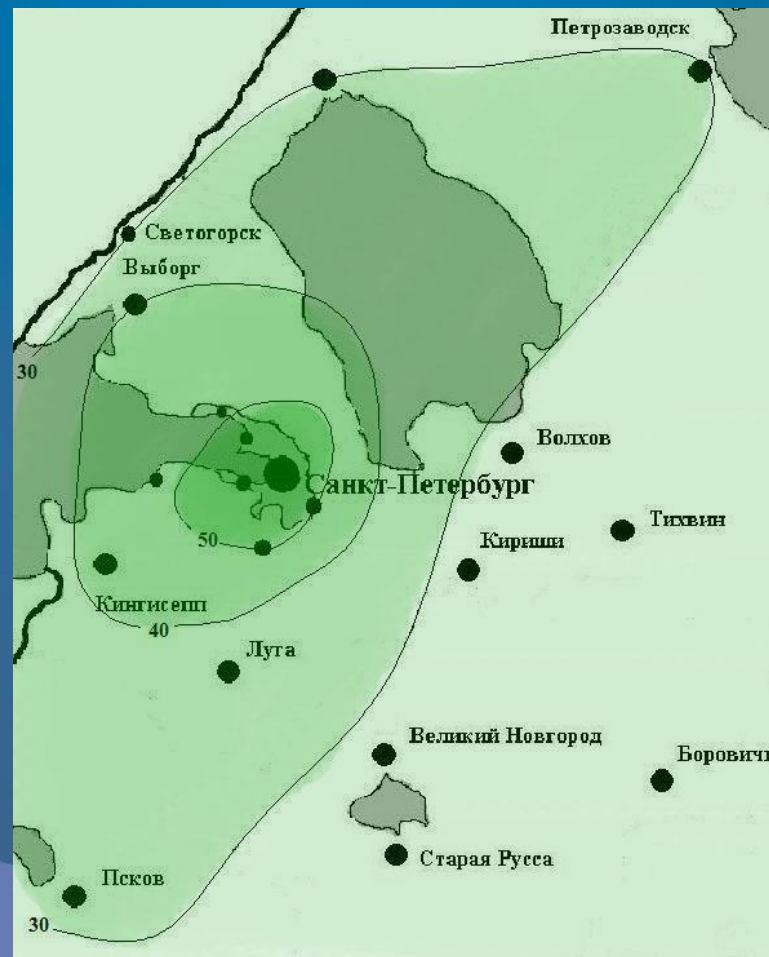
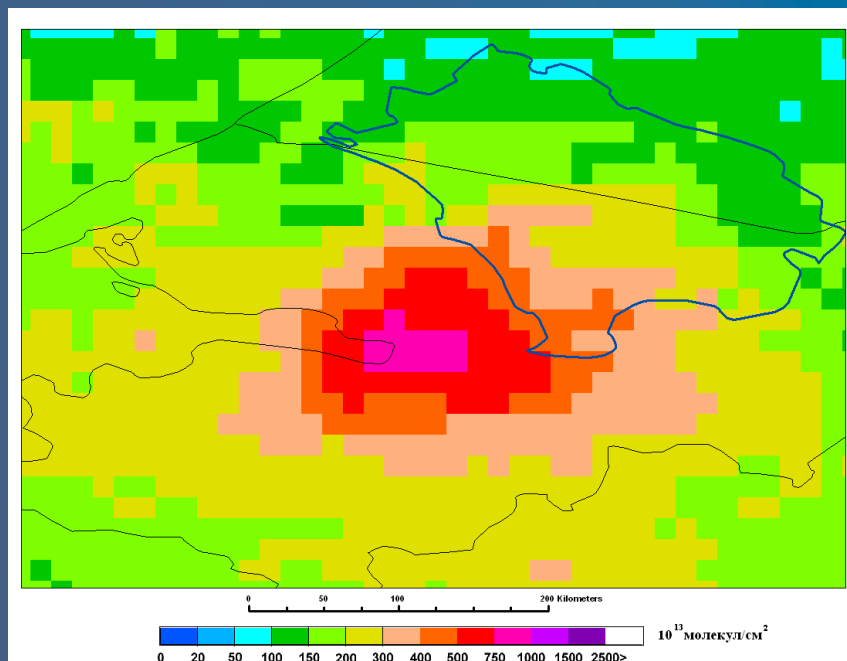


На рисунках указаны  
 номер серии  
 измерений,  
 нормированная  
 высота источника  $z_s$ ,  
 отношение высоты  
 пограничного слоя  $H$  к  
 масштабу Монина-  
 Обухова  $L$ . Черные  
 квадратами нанесены  
 данные измерений, а  
 крестиками – расчет.



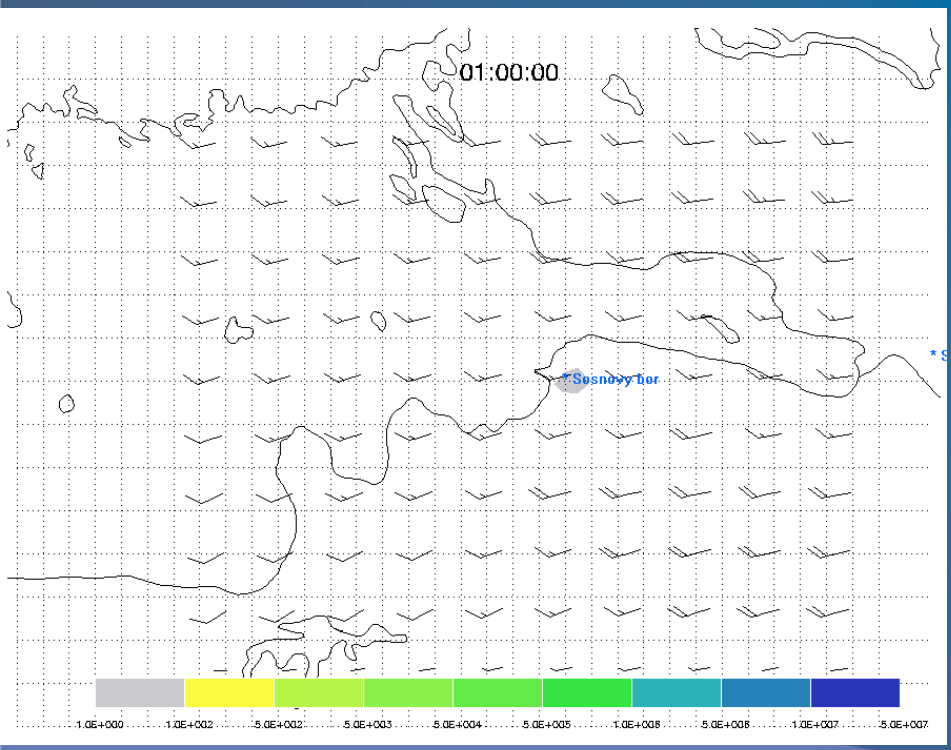


# Среднегодовое поле концентрации $\text{NO}_2$ (мкг/м<sup>3</sup>) по материалам пятилетних спутниковых наблюдений региона С.Петербурга

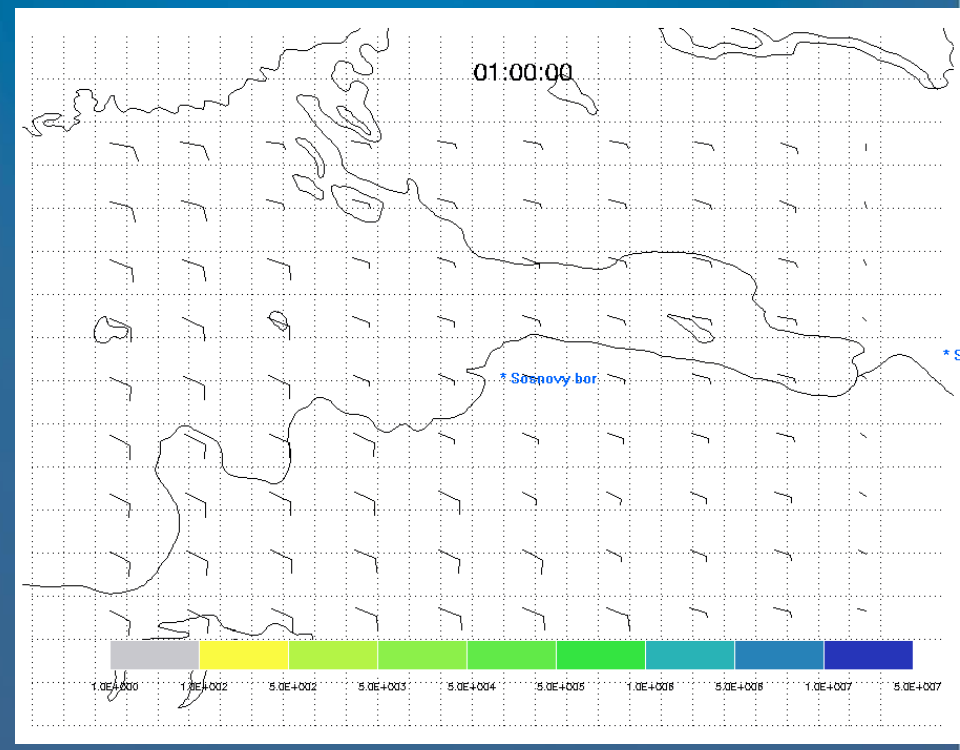


С точки зрения загрязнения  
воздуха вся эта территория  
"есть один мегаполис"

# Прогноз распространения гипотетических аварийных выбросов от ЛАЭС для метеоусловий 10.01.2007 (от 18:00, слева) и 20.05.2010 (от 0:00, справа)



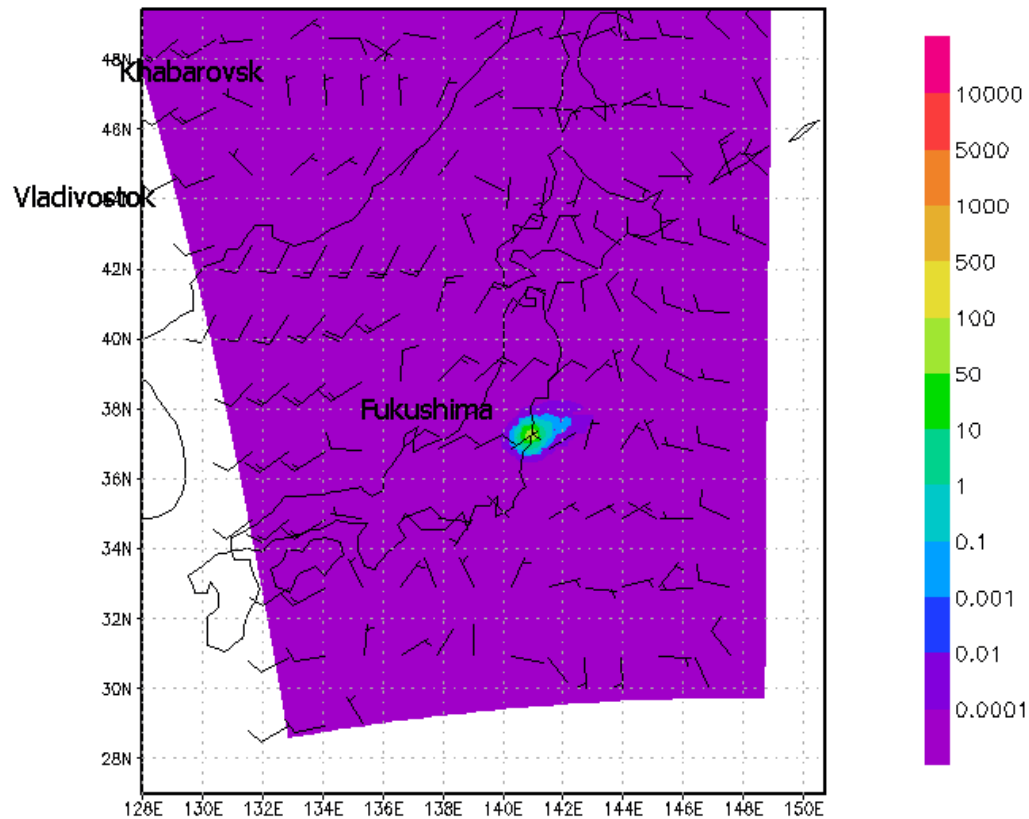
Циклон



Промежуточное поле

# Оценка последствий аварий на АЭС «Фукусима»

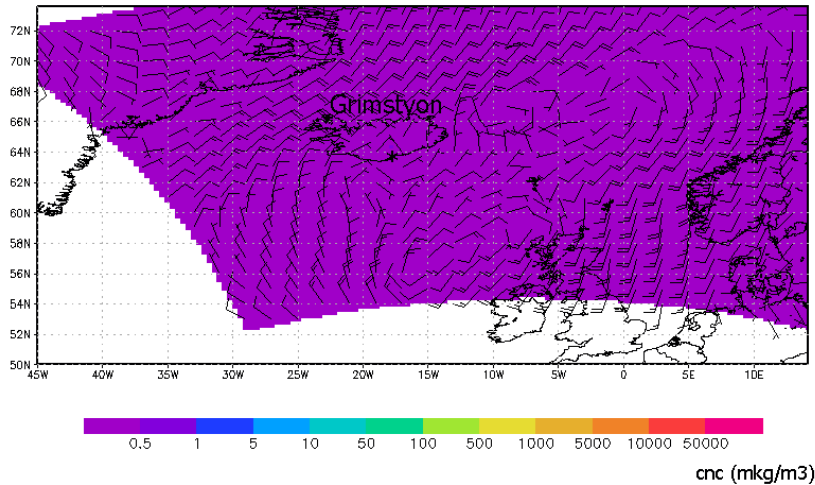
Fukushima 21-03-2011 + 73 h



# Оценка последствий извержения вулкана Гримсвотн

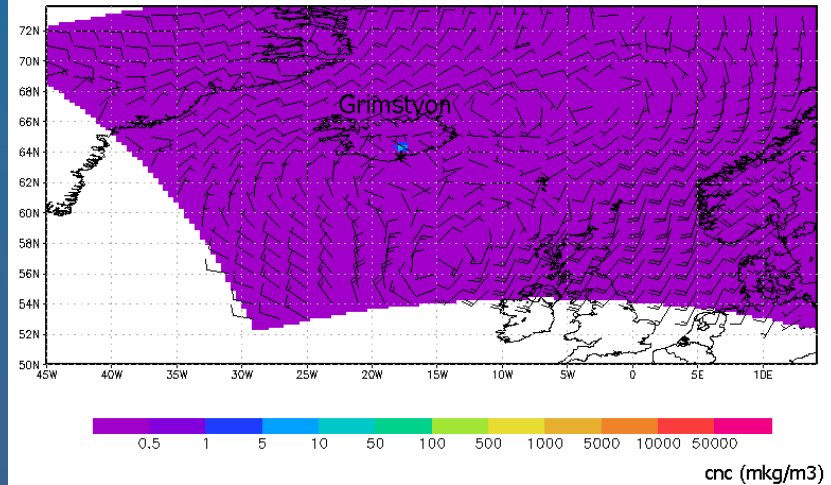
Grimstvon  
Hsource = 8000 m  
Rate = 6500 kg/sec  
h = 700-1300 (sigma=0.90622)

21.05.2011 18-00 + 1 h



Grimstvon  
Hsource = 8000 m  
Rate = 6500 kg/sec  
h = 2500-3100 (sigma = 0.71884)

21.05.2011 18-00 + 1 h



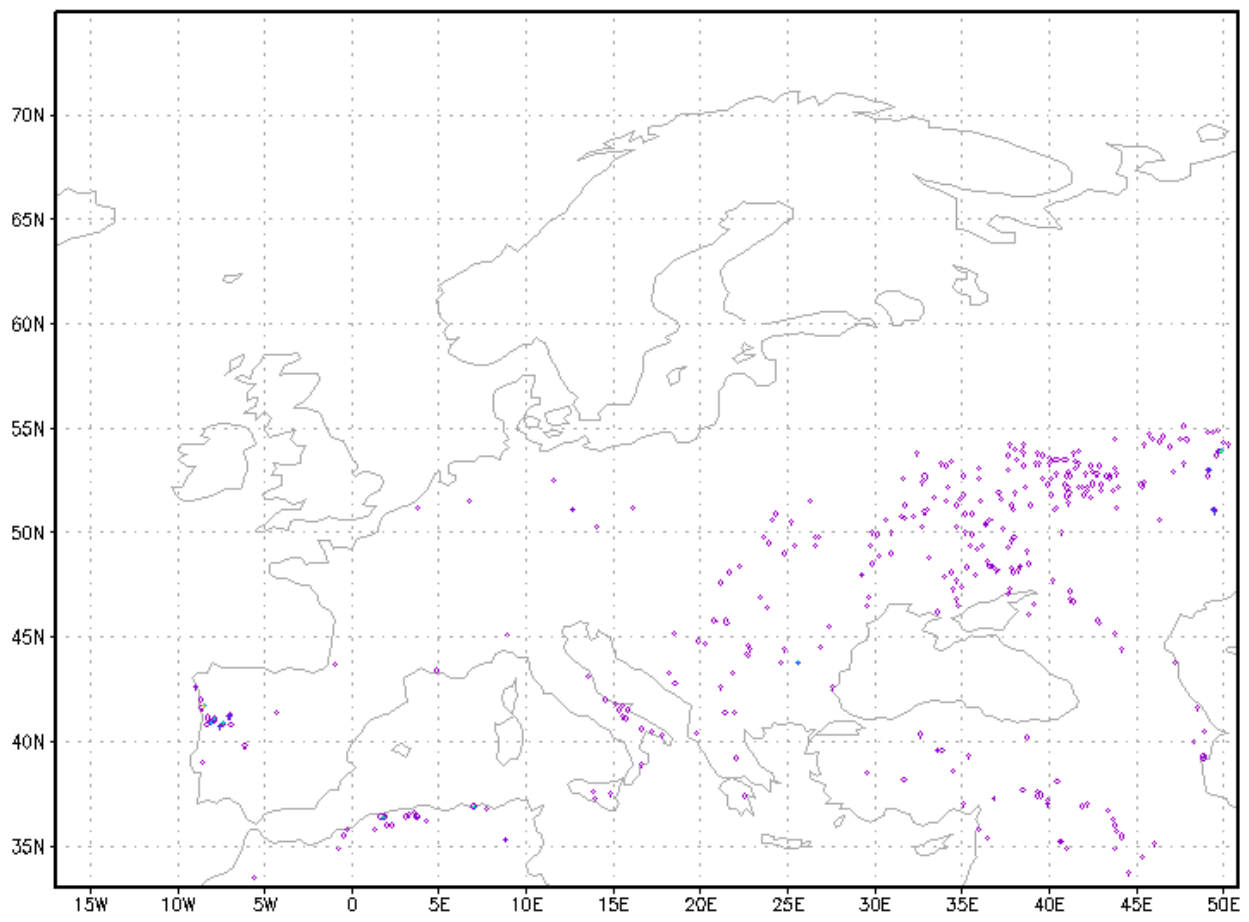
# Особенности реализации модели



## ХТМ\_ГГО:

- Адвекция – усовершенствованная в ГГО численная схема М.В. Гальперина;
- Турбулентная диффузия – схема ГГО;
- Химический блок – модель СВ IV (32 вещества, 81 реакция, численное решение на последнем шаге расщепления методом Розенброка – вариант Sandu et al.);
- Сухое осаждение – схема EMEP (исправлены грубые ошибки!!!);
- Близкая по идеологии модель – SILAM (там есть «наши блоки», но в целом – много и отличий), которую мы сейчас запускаем в рамках «пожарного комплекса»;
- «Альфа-версия» передана СЗУГМС в опытную эксплуатацию;
- Добавочная информация – в секционном докладе.

# Прием спутниковой информации о пожарах с помощью IS4FIRES



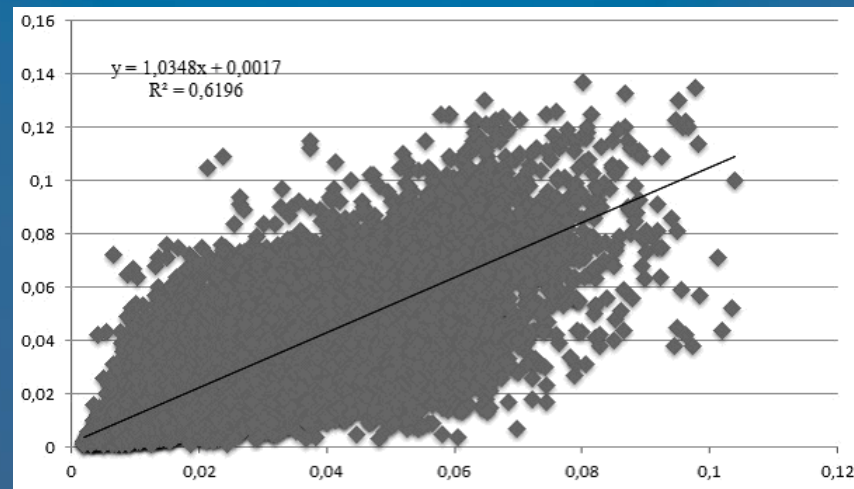
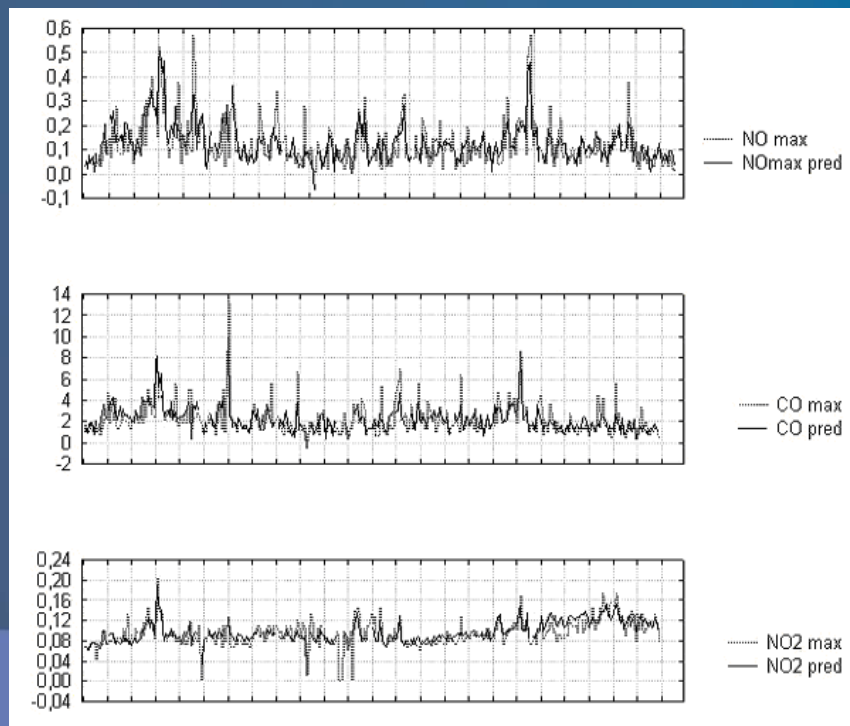
GrADS: COLA/IGES

2013-09-20-12:22

**БЛАГОДАРНЫ ЗА ПОМОЩЬ Р. ВАНКЕВИЧУ И С. МОСТАНДИ**



# Прогноз для Сочи суточных максимумов концентрации на 36 часов (слева) и текущий прогноз на 1 час (справа)



Исходная информация предоставлена НПО «Тайфун», результаты переданы для использования в оперативной практике, в том числе, в период Зимней олимпиады 2014 г.

# Количественные оценки эффективности прогноза на 36 часов для Сочи (R – к-т корреляции, У – оправдываемость)



Показатель загрязнения	Примесь	Период года	Количество прогнозов	R	У
Параметр Р	Диоксид азота	Холодный	268	0,81	100
		теплый	241	0,81	89
	Оксид азота	Холодный	265	0,73	84
		теплый	241	0,81	83
	Оксид углерода	Холодный	265	0,75	80
		теплый	218	0,75	88
Суточный максимум концентрации	Диоксид азота	Холодный	331	0,79	99
		теплый	270	0,77	98
	Оксид азота	Холодный	331	0,80	95
		теплый	270	0,75	98
	Оксид углерода	Холодный	325	0,79	80
		теплый	268	0,67	64



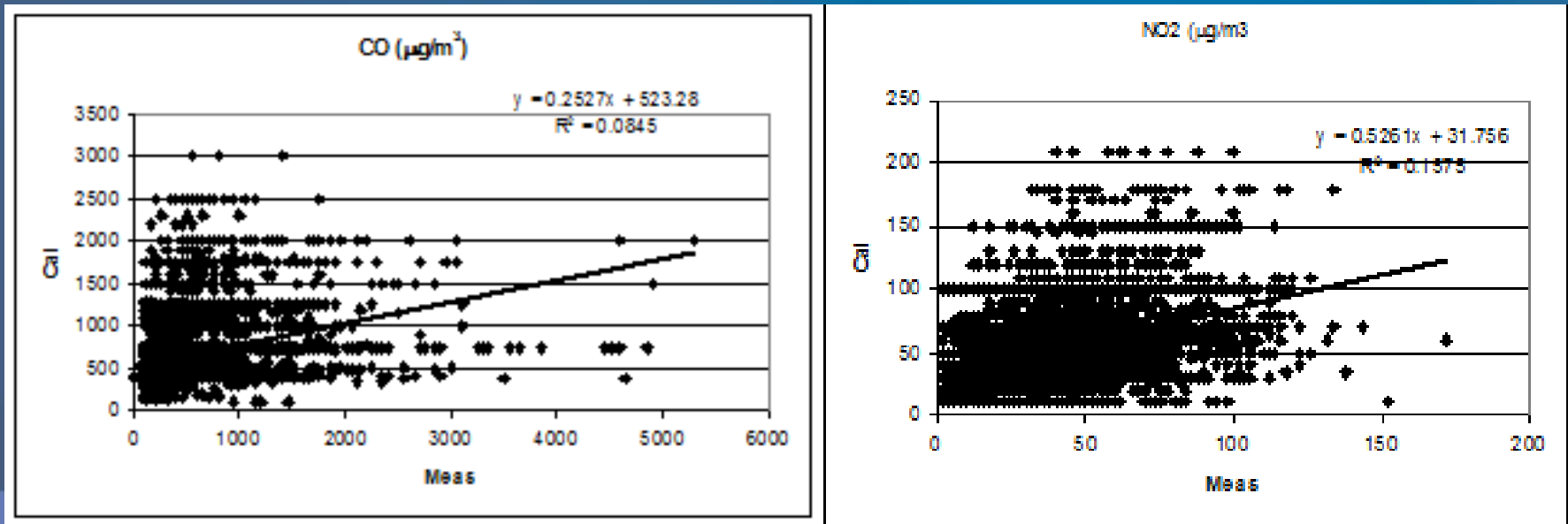


# Оперативное прогнозирование загрязнения воздуха с использованием детерминированных моделей атмосферной диффузии

- На сети уже ведется такая работа с применением ОНД-86, и мы планируем усовершенствовать эту методологию;
- Хотелось бы использовать также сеточные модели, но здесь имеется ряд серьезных проблем, в том числе: отсутствие данных о выбросах (углеводороды покомпонентно!), несоответствующее структуре городского поля концентраций пространственное разрешение и др.
- В мире сеточные модели для прогноза загрязнения воздуха в городах напрямую не используются (только региональная компонента);
- Мы планируем на следующие 3 года разработку методологии совместно с ГМЦ (И.Н. Кузнецова);
- Пока что Ирина Николаевна и ее коллеги попробовали провести расчеты по французской ХТМ CHIMERE для центра ЕТР и выложили результаты в сеть (думаю, И.Н. будет рассказывать это завтра);
- Мы сопоставили эти расчеты с данными мониторинга в Москве (тоже лежат в сети)

# Сравнение измеренных в Москве и рассчитанных по ХТМ Chimere концентраций CO и NO<sub>2</sub>

ГЛАВНАЯ  
ПЕЧАТНИЦА  
ОБСЕРВАТОРИЯ  
ИМ. А.И.ВОЕЙКОВА



Расчеты – с сайта [www.meteoinfo.ru/about/frclmuz](http://www.meteoinfo.ru/about/frclmuz) (см. Зарипов, Коновалов, Кузнецова, 2013)



# Неотложные проблемы

- Качественная и доступная инвентаризация выбросов;
- Доступные базы данных по 3D рельефу местности, застройке и пр.
- Переход на автоматизированные системы контроля ЗА с поддержанием качества и единства наблюдений и оперативной передачей информации.



# Заключение

- Для России, где нормативы ПДК в атмосферном воздухе установлены для ~ 2000 примесей, а инструментальные измерения фиксируют ~100 примесей, расчетный и гибридный мониторинг являются насущной необходимостью;
- Хотя методология моделирования и прогноза загрязнения воздуха развивается во всем мире бурными темпами, до сих пор имеется ряд нерешенных проблем, рассмотрение которых требует интенсификации научных исследований;
- В ряде случаев результаты, полученные за рубежом, «не переносятся на российскую почву» в связи с отсутствием заинтересованности в нашей стране (напр., распространение аллергенов или «дурных запахов»);
- Внедрение современных методов моделирования и прогноза загрязнения атмосферы может расширить возможности сети в плане специализированного обслуживания потребителей;
- Имеет смысл уже сейчас начать постепенно готовить сеть к решению соответствующих задач (обучение специалистов, обеспечение вычислительными платформами и пакетами программ).



**СПАСИБО ЗА  
ВНИМАНИЕ!**