



Моделирование распространения примесей в городских условиях с учетом априорной и восстановленной информации

Гочаков А.В.¹, Пененко А.В.^{2,3}, Колкер А.Б.^{1,5}, Антохин П.Н.⁴

*¹Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, г. Новосибирск, Россия*

*²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г.
Новосибирск, Россия*

³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

⁴Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

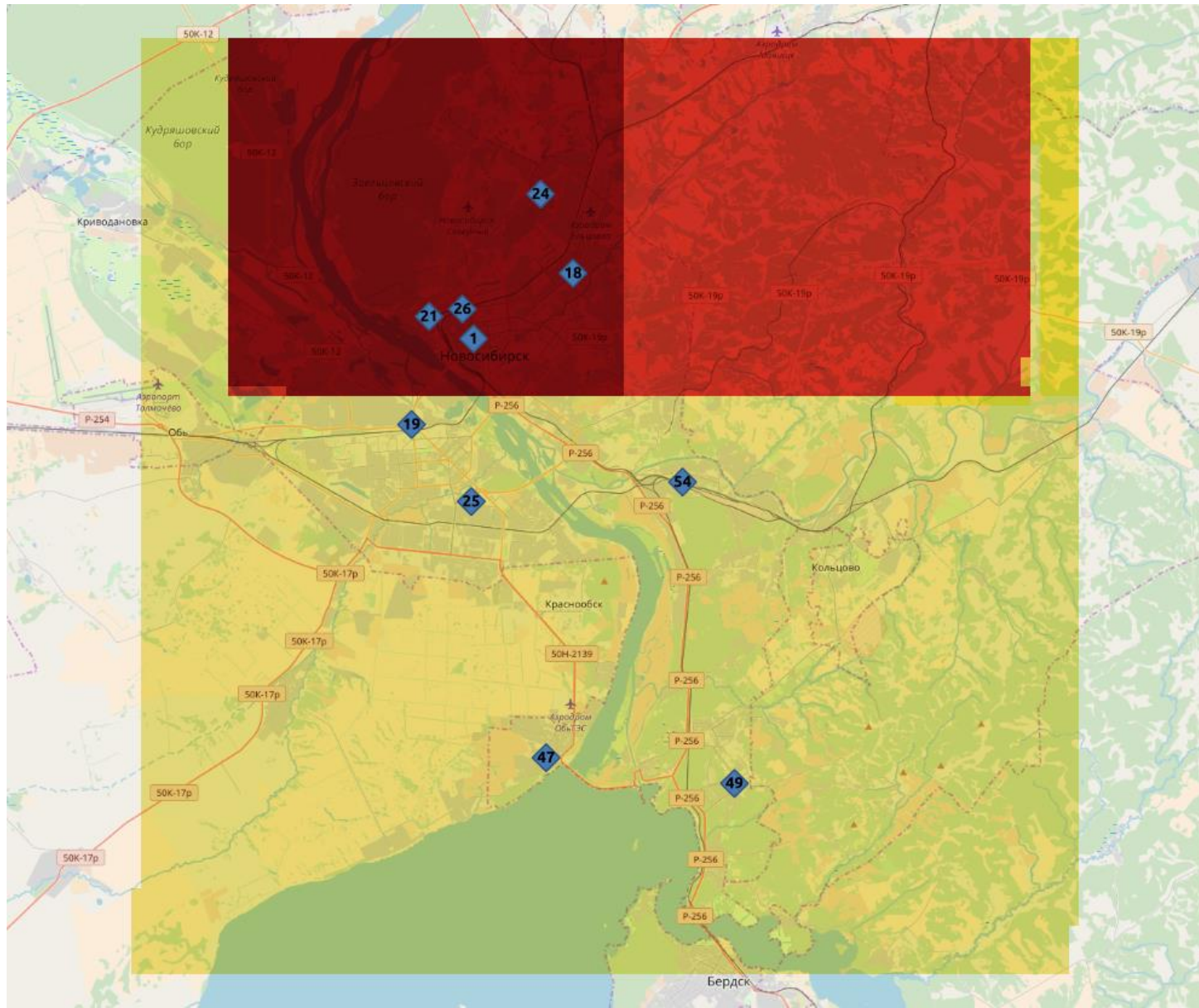
⁵Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

2018, Томск

Актуальность

- Широкий спектр негативного влияния на здоровье человека малых газовых примесей антропогенного происхождения (WHO, 2006).
- Современные численные модели прогноза погоды, включающие блок распространения и трансформации примесей, позволяют использовать разнообразную априорную информацию, влияющую на качество прогноза.
- В случае моделирования распределения загрязняющих веществ в масштабах городской агломерации особенно актуально уточнение эмиссий выбросов (Markakis, et al., 2015), (Holnicki, et al., 2015).
- Информация с постов центра мониторинга химического состава атмосферы города (центр мониторинга окружающей среды, Росгидромет), концентрации SO₂. Оборудование: Фотоэлектроколориметр КФК-3 «ЗОМЗ»; аспиратор АПВ-4, сорбционные трубки СТ 212 (подробнее см РД 52.04.822-2015).
- Для работы схем городской параметризации возможно использования данных открытых геоинформационных систем (Varentsov, et al., 2017)

Домен агломерации г. Новосибирск, эмиссии EDGAR



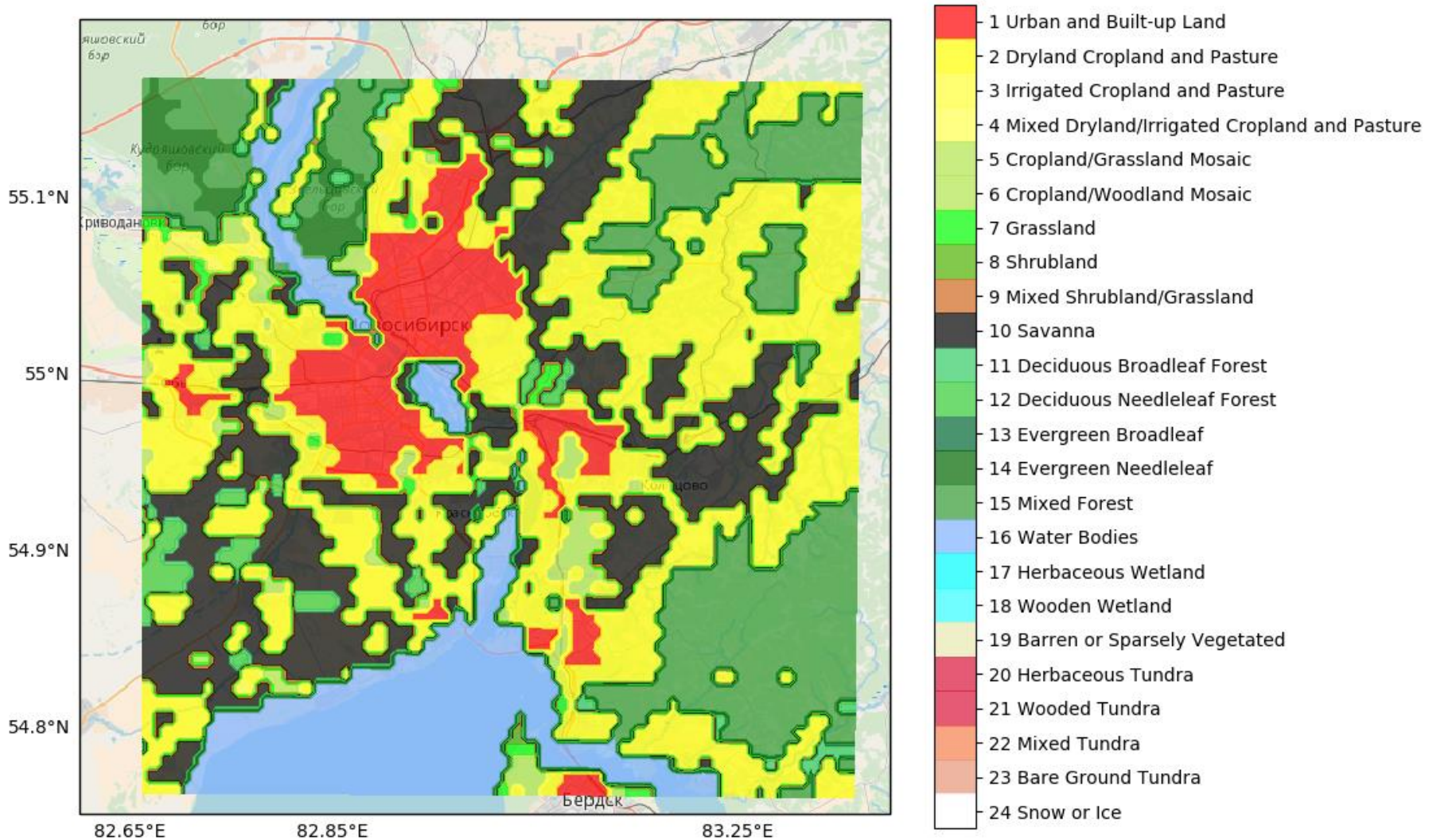
Эмиссия SO₂,
моль
км² · ч

0
0.25
0.5
1
1.5
2



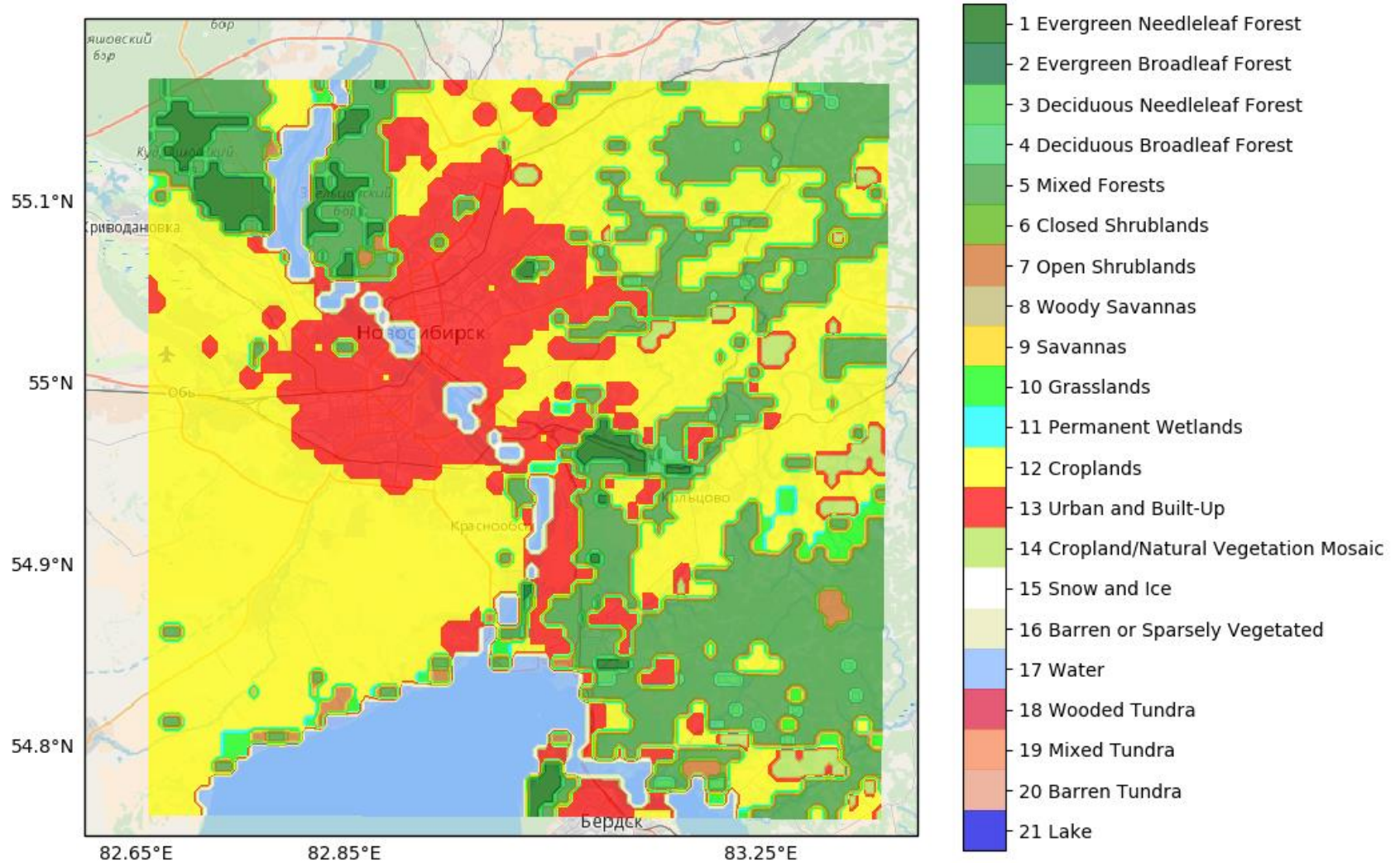
Категории землепользования, USGS, WPS 3.5.1

Land use USGS



Категории землепользования, MODIS_MODIFIED, WPS 3.9.1

Land use MODIFIED IGBP MODIS NOAH



Цель работы

- Подготовить эмиссии на примере примеси SO_2 для расчетов высокого разрешения (ячейка 460 метров) с использованием открытой информации о расположении источников выбросов (ТЭЦ, автотранспорт), интенсивности движения автотранспорта.
- Подготовить категории землепользования для расчетов высокого разрешения, для городской схемы параметризации.
- Оценить на реальных данных эффективность одного цикла системы моделирования с усвоением данных постов центра мониторинга окружающей среды для города Новосибирска с учетом априорной информации

Системы для обратного моделирования и усвоения данных (ICM&MG Inverse modeling and Data Assimilation Framework, сокращенно IMDAF)



- Прямая задача: модель переноса примесей (Пененко В.В, 1981), (Марчук, 1982), (Пененко В.В. и др., 1985) – известны источники, требуется найти распределение концентраций
- Обратная задача: известны результаты измерений концентраций в точках сетки, требуется найти все источники (Марчук, 1982), (Пененко В.В., и др., 1985), (Pudykiewicz, 1998), (Penenko V.V., и др., 2002), (Issartel, 2003).
- Обратная задача с априорной информацией: действуют источники 2-х типов с неотрицательными мощностями (Пененко А. В.)
 - Редкие измерения (для SO₂ 5 точек сетки домена WRF, наблюдения 3 раза в сутки) – 345 неизвестных, 45 измерений (14-17 июля 2008г)
 - Параметризация источников: постоянные источники: «ТЭЦ», переменные источники: «Транспорт». Требуется задать расположение источников, коэффициент зависимости интенсивности источников от времени.
- IMDAF расчетный домен, согласованный с доменом WRF

Конфигурация 1 WRF-Chem, восстановление эмиссий SO₂

- WRF-CHEM v3.5.1 (Fast, и др., 2006), WPS 3.5.1
- **Начальные и граничные условия:**

Метеорологические начальные и граничные условия для полей метеорологических величин задавались с использованием данных модели FNL (NCEP)

Химические - задавались нулевыми.

Подготовка файлов эмиссий: утилита PREPCHEM и глобальная база EDGAR

- **Микрофизика облачности:** WSM 5-class scheme (Hong, и др., 2004)
- **Длинноволновая радиация:** RRTM scheme (Iacono, и др., 2008)
- **Коротковолновая радиация:** Dudhia scheme (Dudhia, 1989)
- **Пограничный слой:** Yonsei University scheme (Hong, и др., 2006)
- **Приземный слой:** Monin-Obukhov similarity theory (Beljaars, 1995)
- **Почвенный слой:** Noah Land Surface Model (Chen, и др., 2001)
- **Химический блок:** Перенос пассивной примеси (SO₂, CO, NO, ALD, HCHO, ORA2)

Первый домен (D1) 54.35 - 55.59 ° с.ш. 81.96 - 84.14 ° в.д. (100 x 100 ячейка) по горизонтали 1380 м. , 30 вертикальных уровня до уровня 50 гПа

Второй вложенный домен (D2) 54.75 - 55.16 ° с.ш. 82.66 - 83.37 ° в.д. (99 x 99 ячеек) , по горизонтали 460 м., 30 вертикальных уровня до уровня 50 гПа

Цикл моделирования с усвоением данных (SO2)

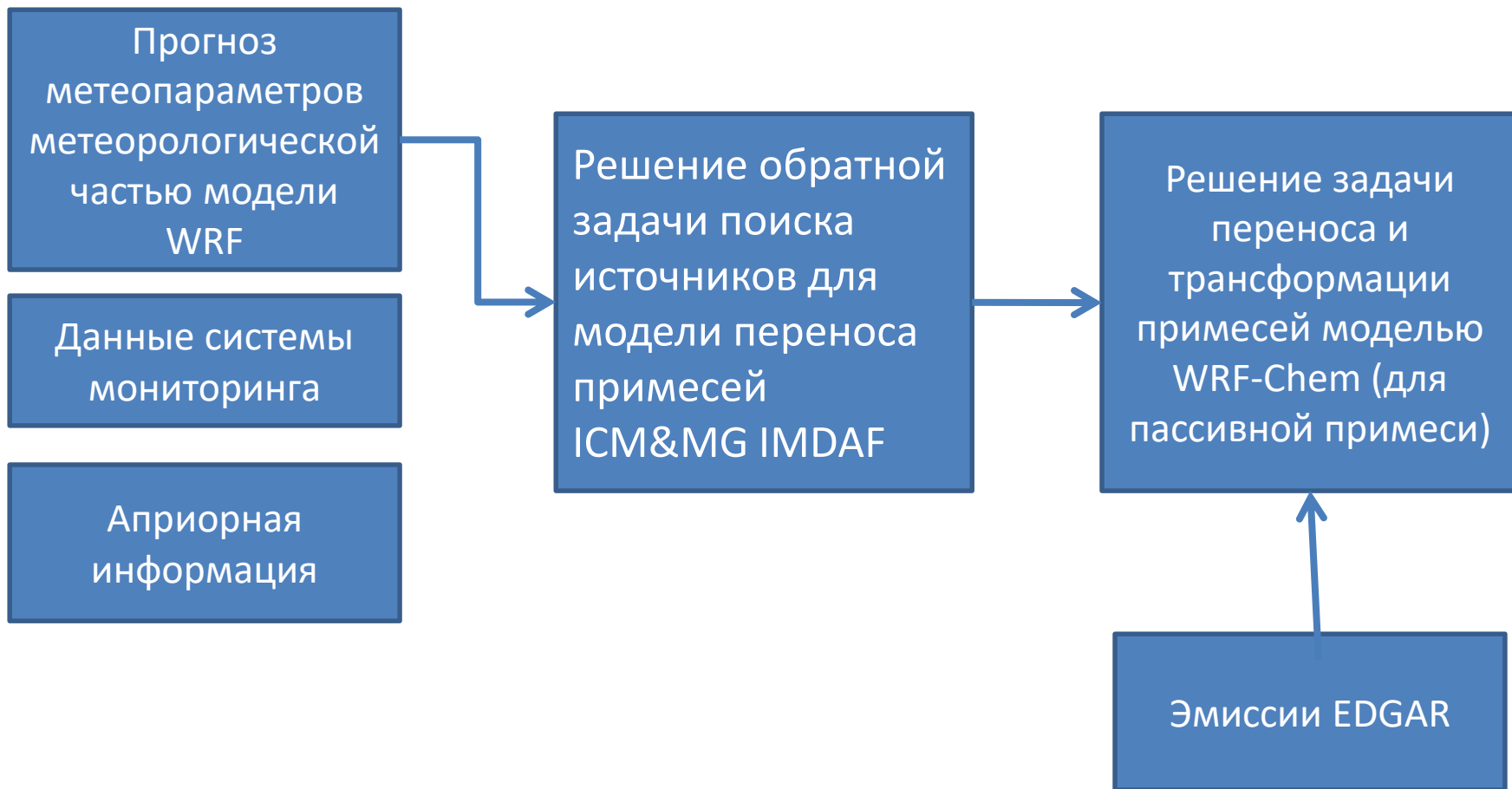
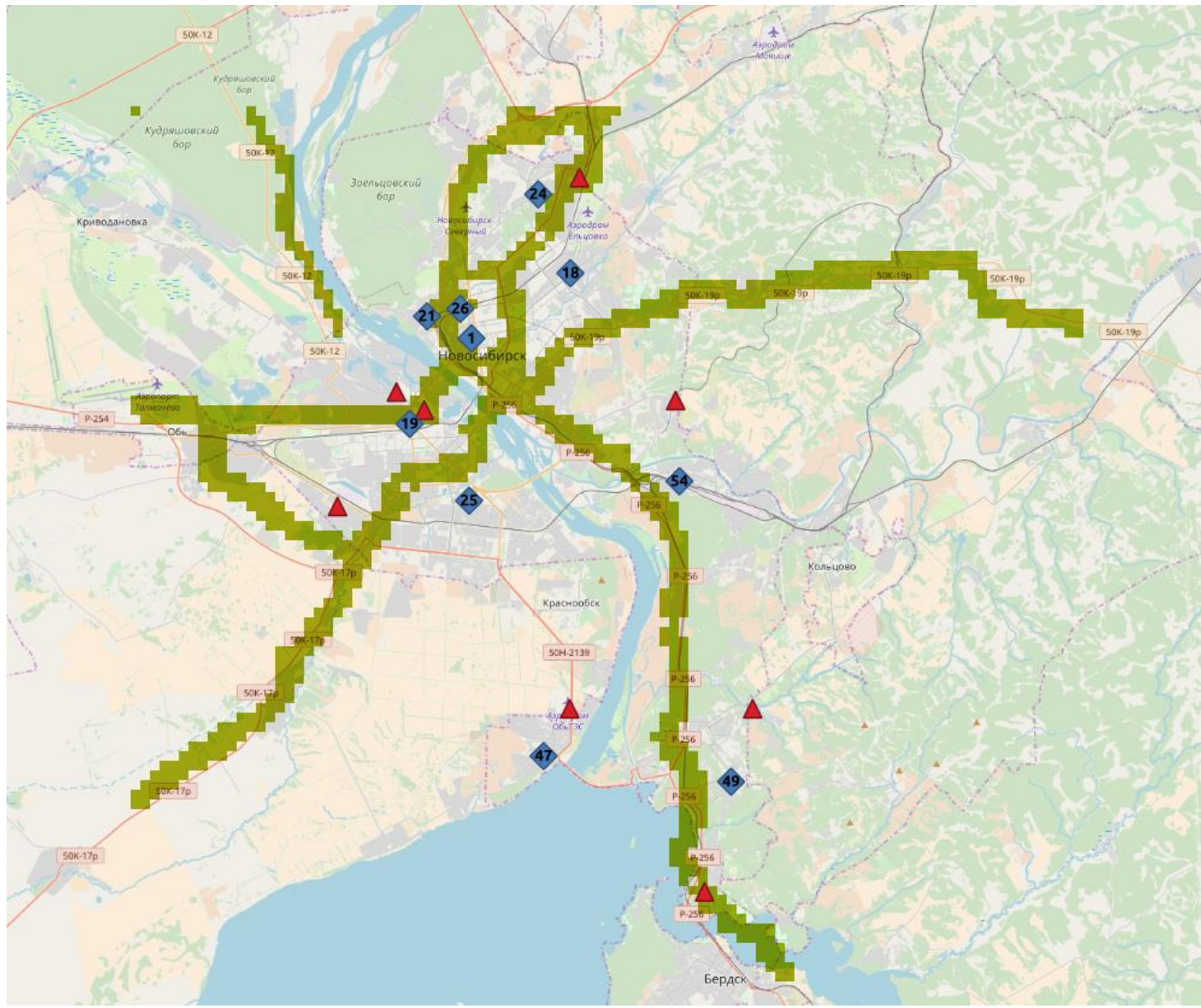


Схема источников, домен D02

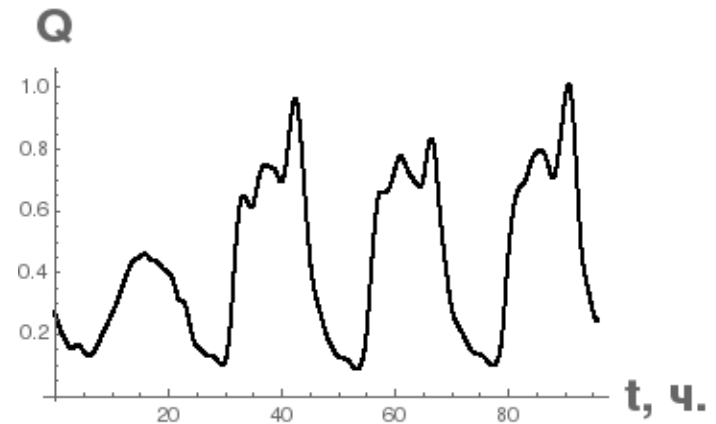


- ▲ ТЭЦ
- Транспорт
- ◆ Посты

Всего 345
ИСТОЧНИКОВ

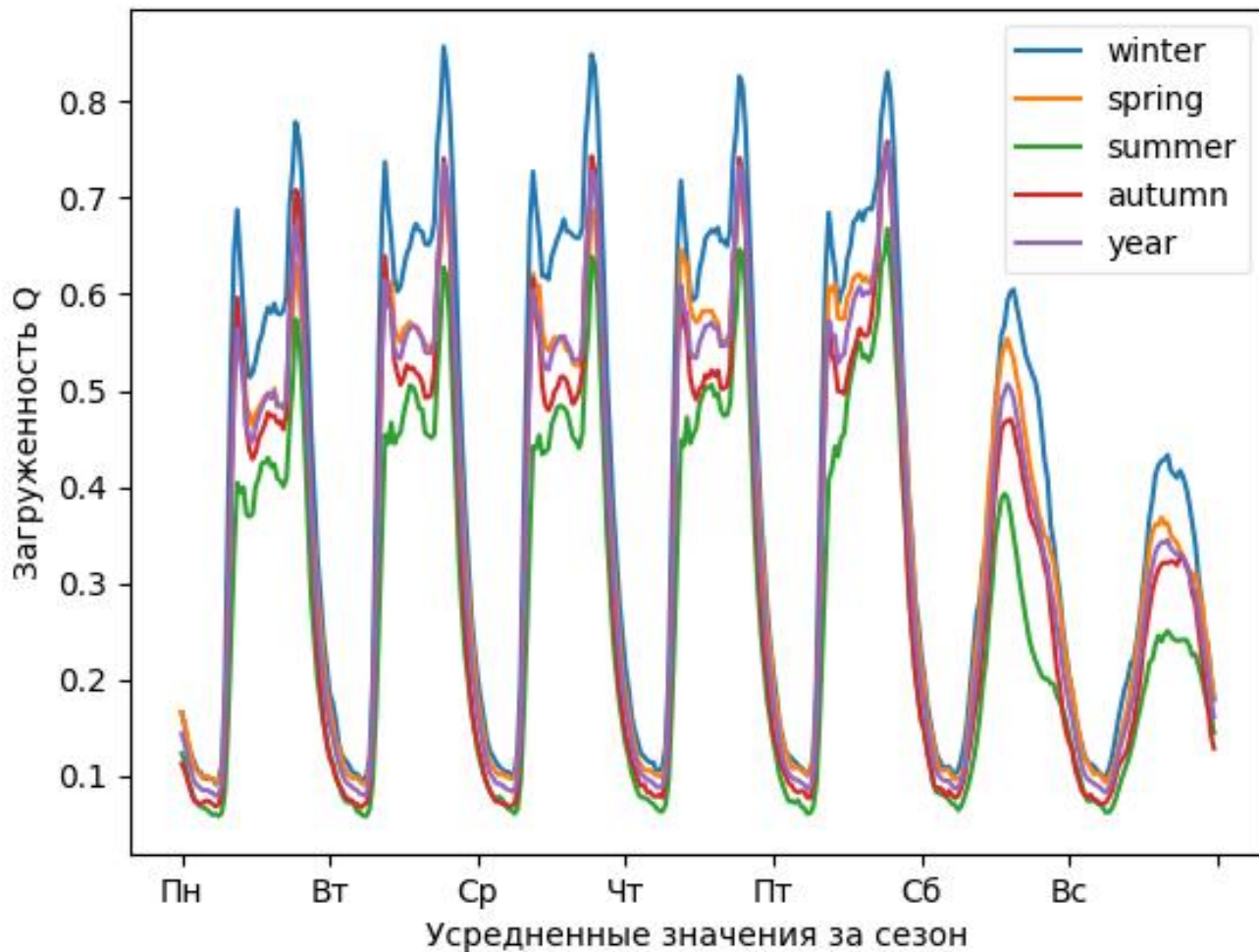
Характеристики источников «Транспорт»

- Архив информации, накопленный с использованием сервиса Яндекс Static API
 - Известны географические координаты границ области, а также цветовое распределение участков дорог, где цветами (красный, желтый, зеленый) характеризуется интенсивность движения
 - Маска пикселей красного, желтого и зеленого цвета, приведенная к размерности сетки домена
 - Привязка координат полученной маски дорог к координатам границы области изображения, в соответствии с доменом D2
 - Средние значения относительного количества пикселей «загруженные дороги» из ряда получасовых данных, соответствующие воскресенью, понедельнику, вторнику и среде каждой недели июля - усредненной информации об интенсивности движения за 2015-2018 гг
- $Q(t) \quad \Delta t = 2 \text{ min}$



Загруженность крупных автодорог по данным сервиса «Яндекс. Пробки» по сезонам

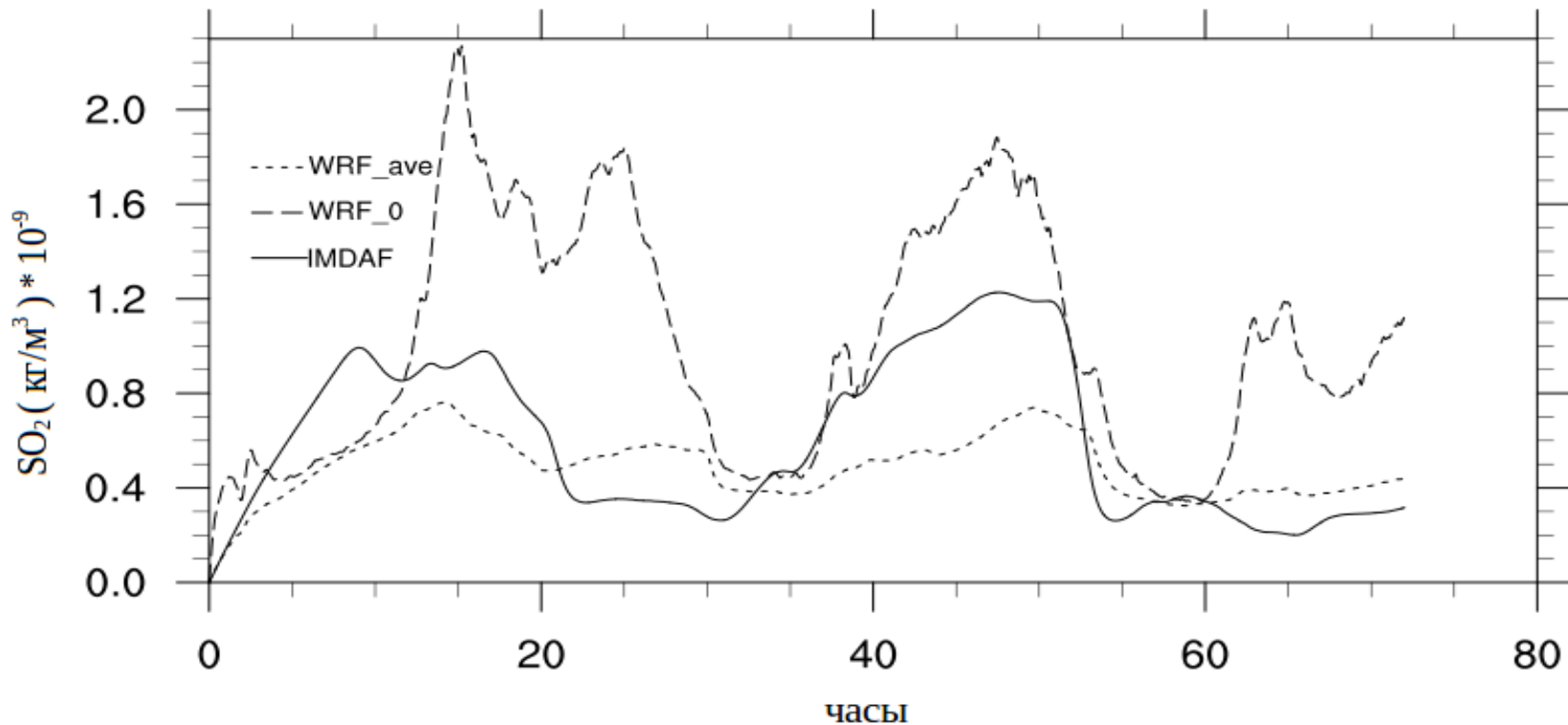
Загруженность автодорог, 2015-2018 гг.



Прямые задачи IMDAF и WRF-Chem, коэффициенты

- Домен D02
- Горизонтальные компоненты ветра
- Коэффициент диффузии
- Усреднение коэффициентов по 8 уровням, интерполяция по горизонтали и вертикали смещенных величин

Сравнение моделей IMDAF, WRF



Средняя концентрация SO₂ по расчетной области в зависимости от времени.

Прямые задачи IMDAF и WRF-Chem

Таблица: Относительное отклонение между решениями, полученными рассматриваемыми моделями на разных временных интервалах

Часы от начала расчета	0-6	6-12	12-18	18-24	24-30	30-36	36-42	42-48	48-54	54-60	60-66	66-72	0-72
средние WRF-Chem	0.34	0.38	0.26	0.32	0.69	0.29	0.42	0.48	0.39	0.21	0.56	0.42	0.39
0 уровень WRF-Chem	0.41	0.32	0.90	1.83	03.03	0.40	0.21	0.44	0.38	0.47	2.75	2.23	0.86
1 уровень WRF-Chem	0.35	0.31	0.33	0.72	2.14	0.37	0.22	0.12	0.36	0.24	0.81	1.32	0.47

Восстановление мощности источников выбросов

- Результаты 43 измерений, собранных за 14-17 июля 2008 г на 5 постах
- Восстановления по расчету WRF 13-14 июля 2008 для сценариев:
 - Только **Транспорт (крупные магистрали)**
 - Только **ТЭЦ**
 - **Транспорт и ТЭЦ**
- Подготовка эмиссий PREPCHEM, глобальная база EDGAR
- Замена соответствующих значений источников IMDAF (мощность источника равномерно распределена по пространству ячейки и постоянна по времени в течение одного часа)

Переход к эмиссиям WRF-Chem :

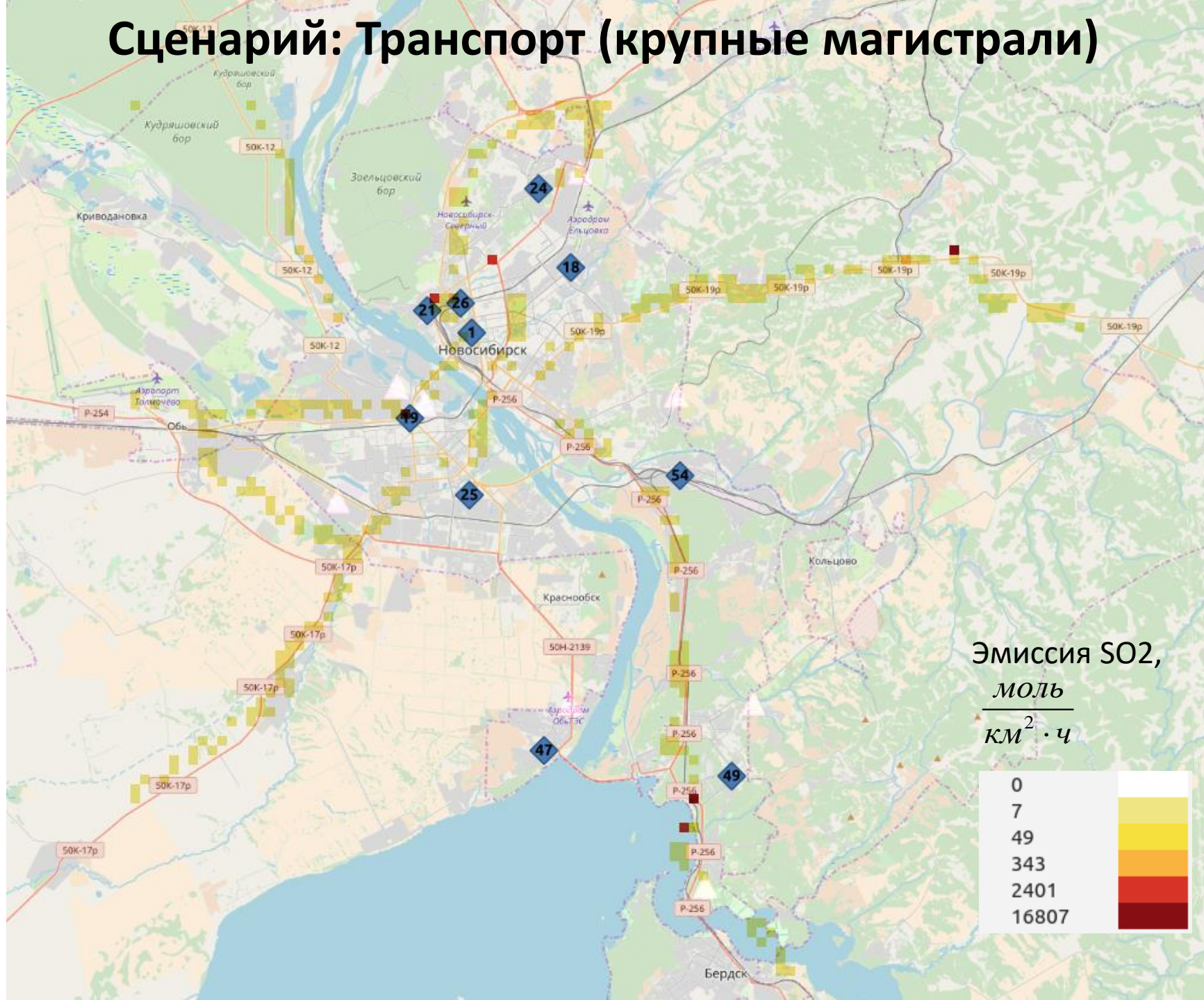
$$c = 10^6 \cdot 3600 / M \quad M = 64.066 \text{ г / моль}$$

Приведение расчетных концентраций WRF к кг/м³

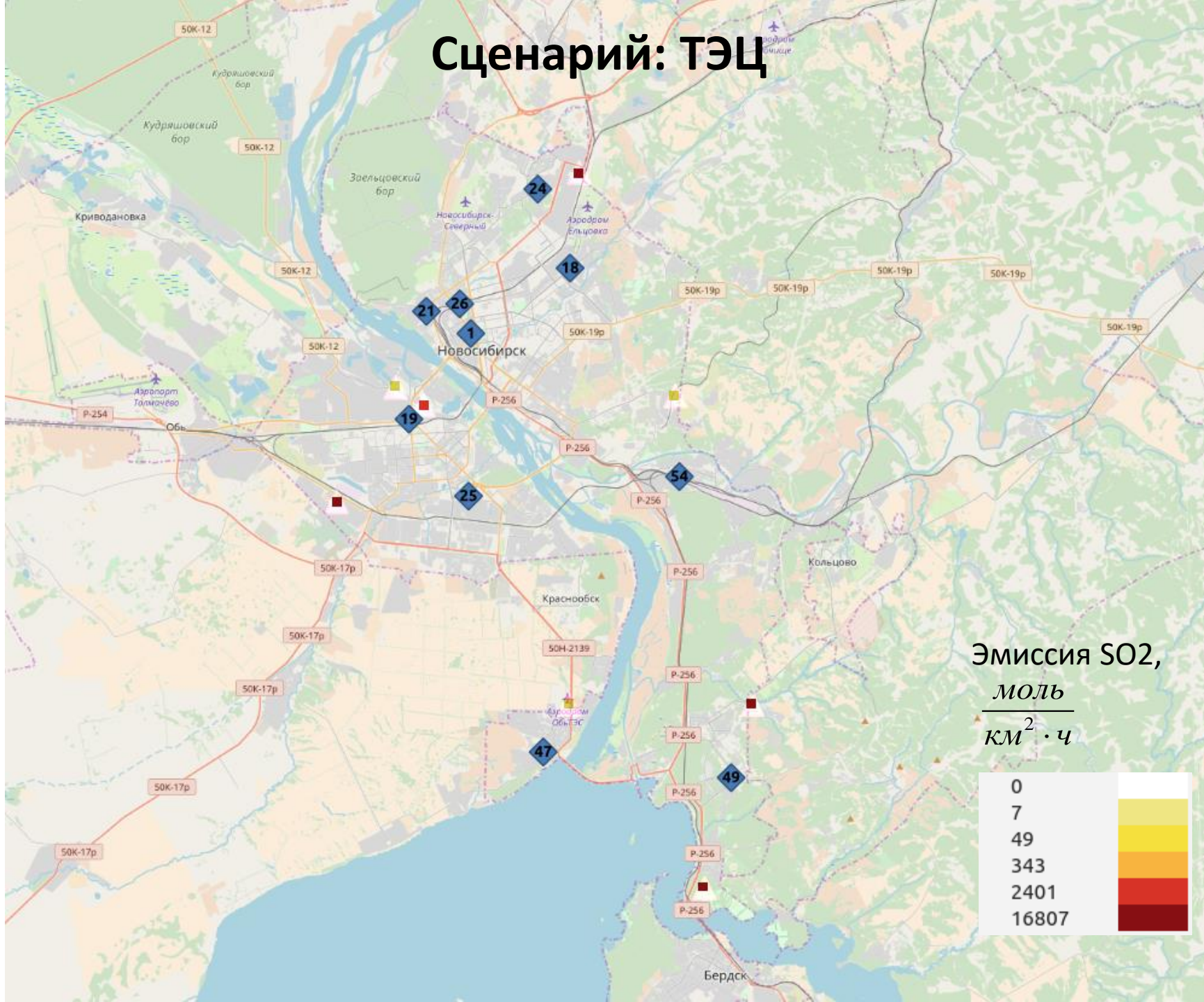
$$C_{\text{kg/m}^3} = C_{\text{ppm}} \cdot \frac{24.45}{M} \cdot 10^{-9}$$

24.45 - количество литров, которое занимает один грамм-моль газа при стандартных температуре и давлении

Сценарий: Транспорт (крупные магистрали)



Сценарий: ТЭЦ



Сценарий: Транспорт и ТЭЦ

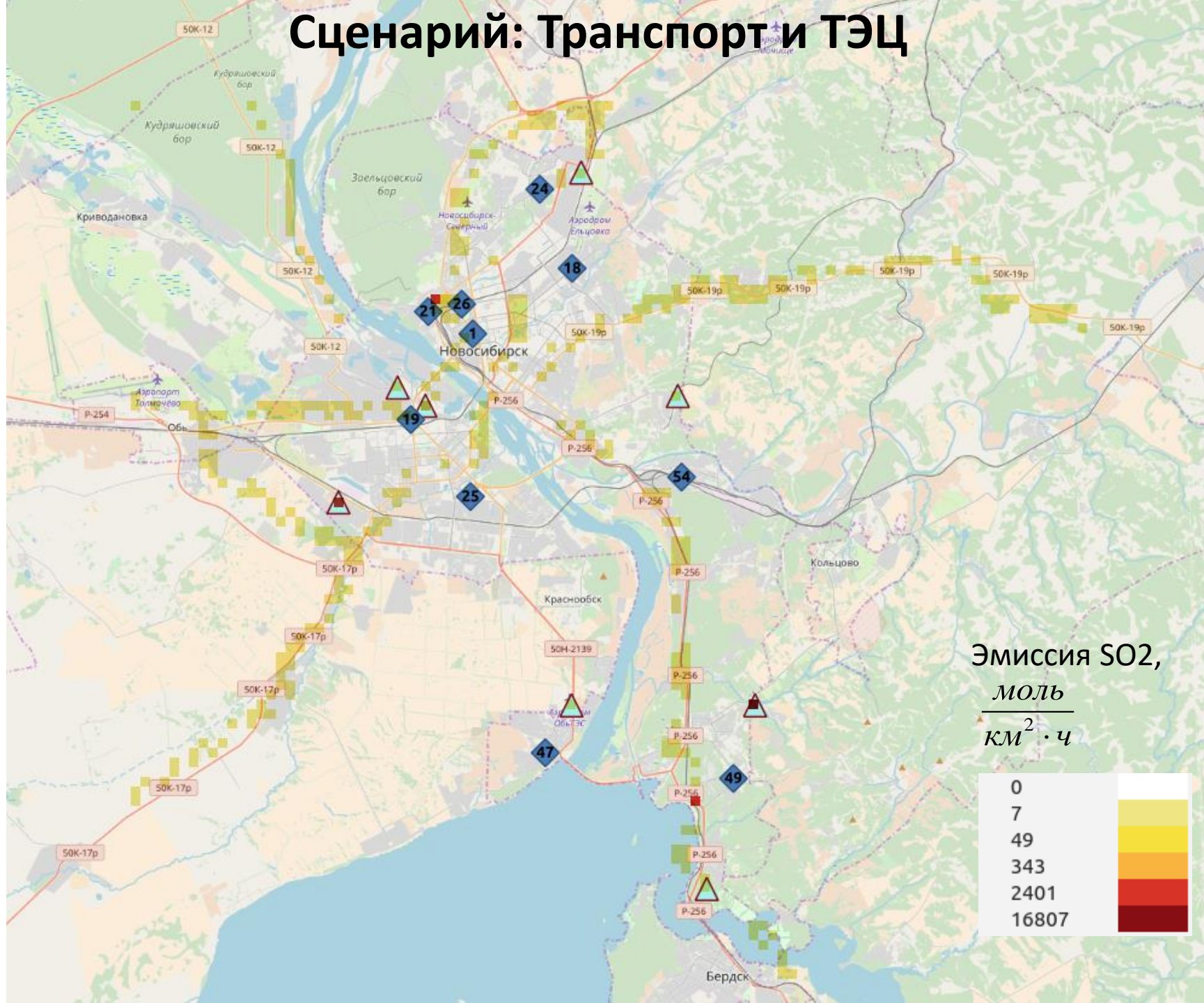


Диаграмма: относительная ошибка, WRF-Chem

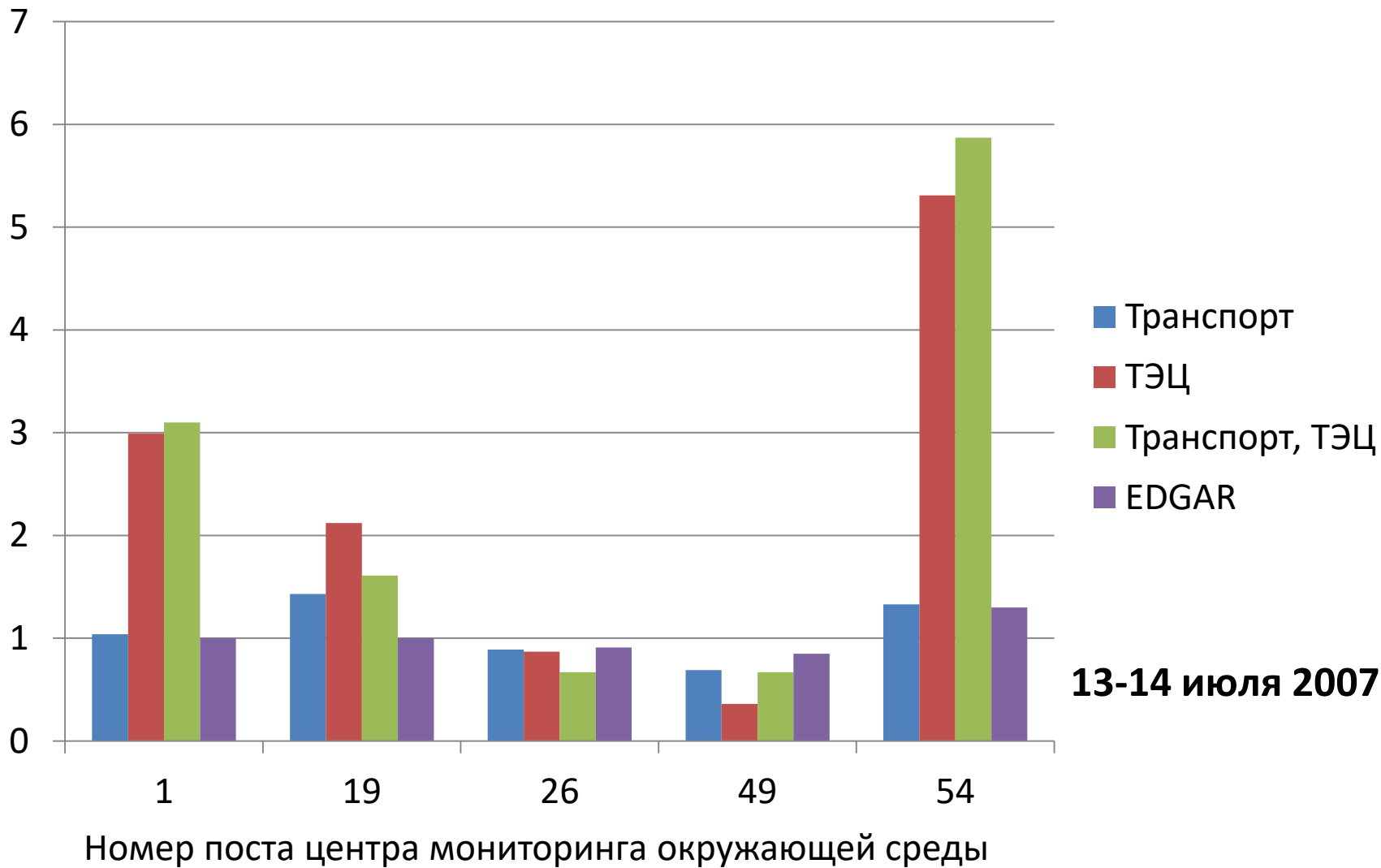


Диаграмма: относительная ошибка, WRF-Chem

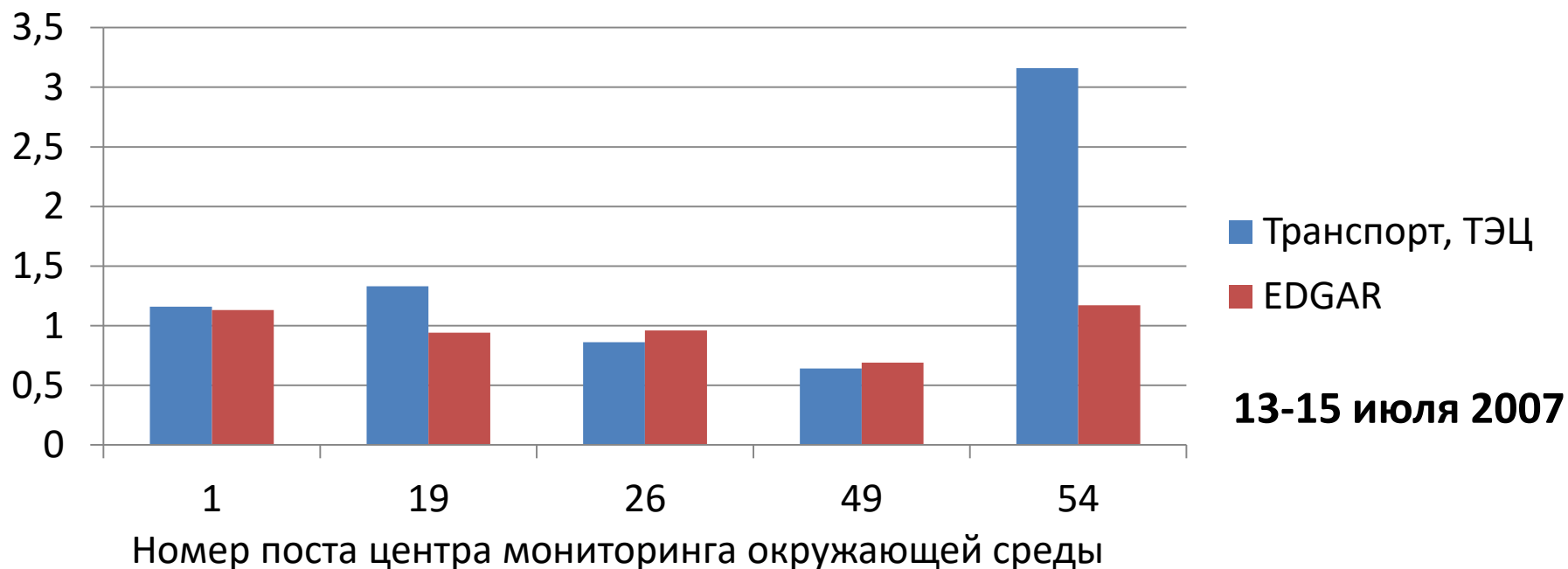


Таблица: Обратная задача IMDAF с синтетическими данными при различном числе измерений

Количество измерений	45	60	70	75	90
Относительная ошибка	0.82	0.82	0.65	0.66	0.65

Конфигурация 2 WRF-Chem, обновление категорий

землепользования

- WRF v3.5.1 (Fast, и др., 2006), **WPS v3.9.1**

- **Начальные и граничные условия:**

Метеорологические начальные и граничные условия для полей метеорологических величин задавались с использованием данных модели FNL (NCEP)

Химические - задавались нулевыми.

Подготовка файлов эмиссий: утилита PREPCHEM и глобальная база EDGAR

- **Микрофизика облачности:** **WSM 6-class scheme** (Hong, и др., 2006)
- **Длинноволновая радиация:** RRTM scheme (Iacono, и др., 2008)
- **Коротковолновая радиация:** Dudhia scheme (Dudhia, 1989)
- **Пограничный слой:** **Mellor-Yamada-Janjic scheme** (Melor, и др., 1982)
- **Приземный слой:** MYJ Monin-Obukhov similarity theory (Melor, и др., 1982)
- **Почвенный слой:** Noah Land Surface Model (Chen, и др., 2001)
- **Химический блок:** Перенос пассивной примеси (SO₂, CO, NO, ALD, HCHO, ORA2)
- **Городская параметризация:** **Single-layer, Noah UCM (Kusaka, 2004)**

Первый домен (D1) 54.35 - 55.59 ° с.ш. 81.96 - 84.14 ° в.д. (100 x 100 ячейка) по горизонтали 1380 м. , 30 вертикальных уровня до уровня 50 гПа

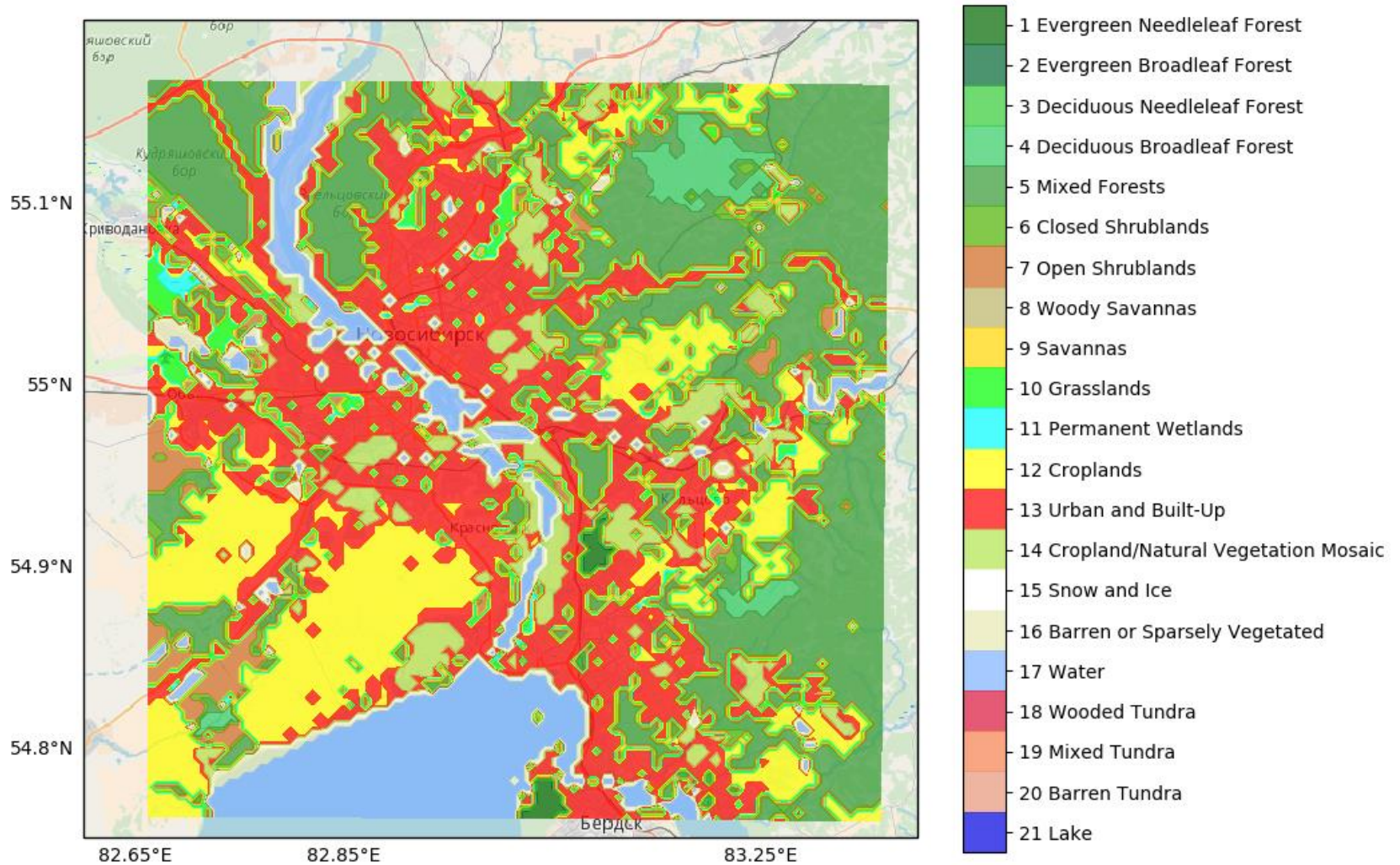
Второй вложенный домен (D2) 54.75 - 55.16 ° с.ш. 82.66 - 83.37 ° в.д. (99 x 99 ячеек) , по горизонтали 460 м., 30 вертикальных уровня до уровня 50 гПа

OPENSTREETMAP.ORG

- Содержит открытые геопривязанные данные о геометрических объектах, в том числе:
- Категории землепользования
- Здания и дороги
- Этажность зданий, классификация некоторых урбанизированных территорий
- Данные природной растительности

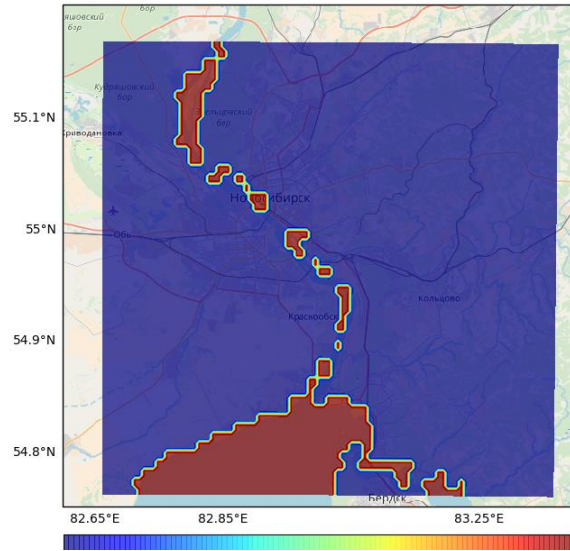
Категории землепользования, данные OSM

Land use OSM

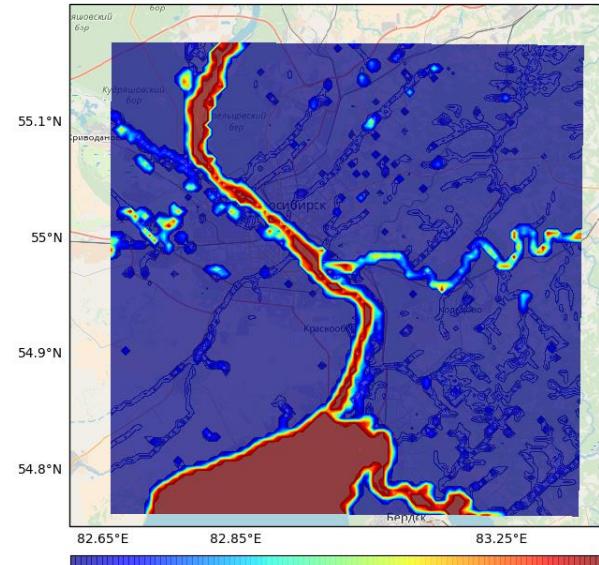


Анализ гео-объектов, процентная фракция категорий

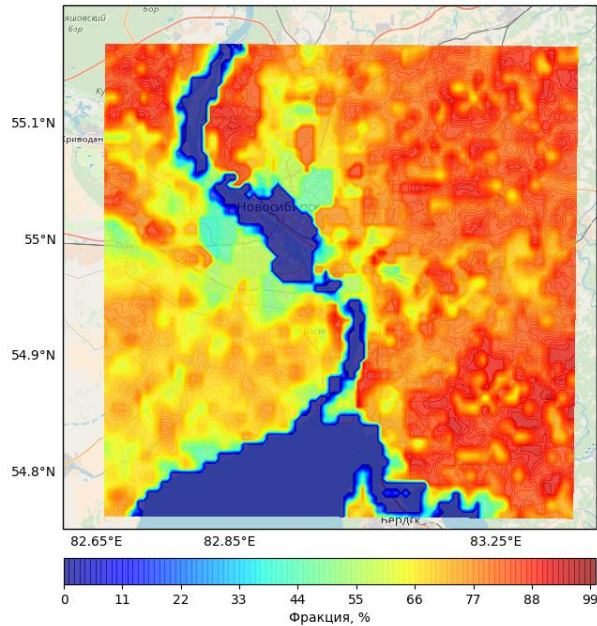
LANDUSEF, LEVEL: 17



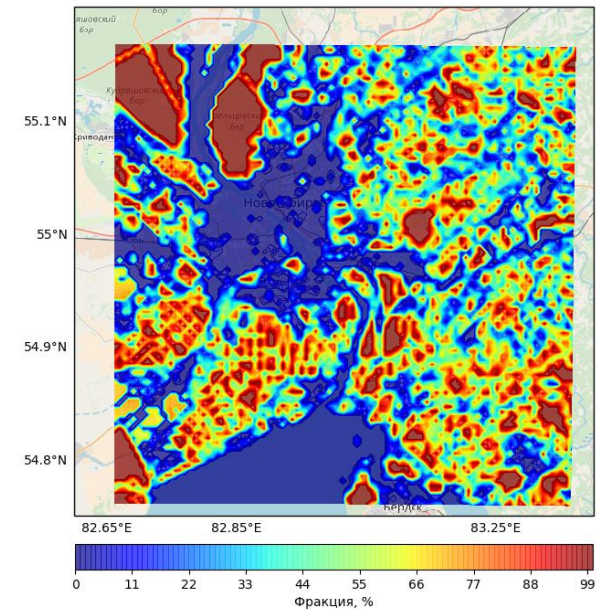
LANDUSEF, LEVEL: 17



VEGFRA

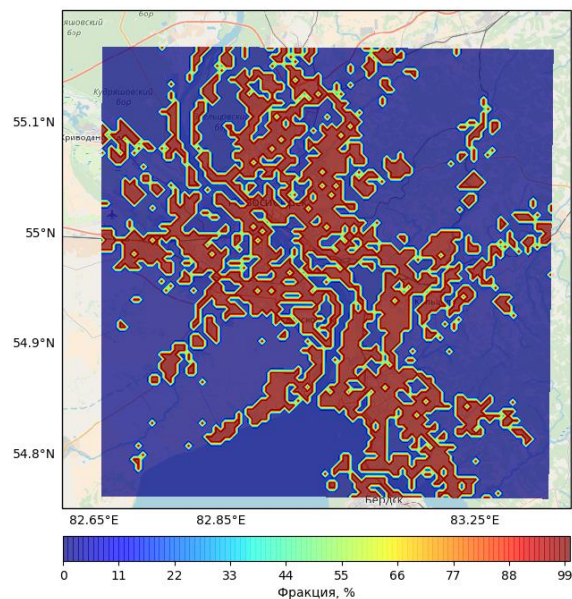


VEGFRA

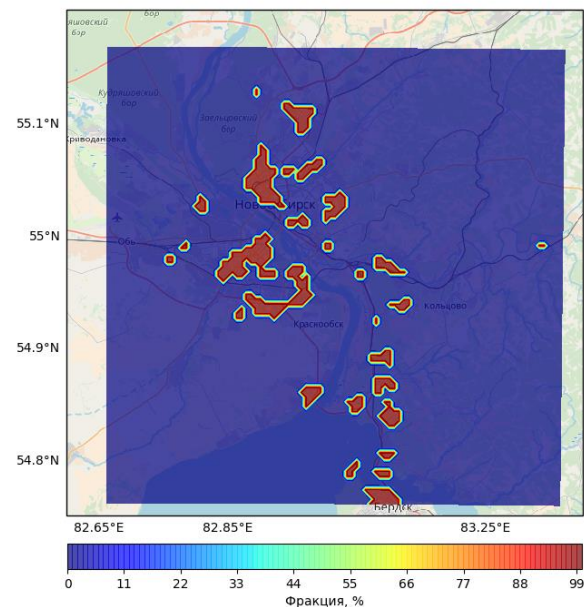


Категории городской застройки

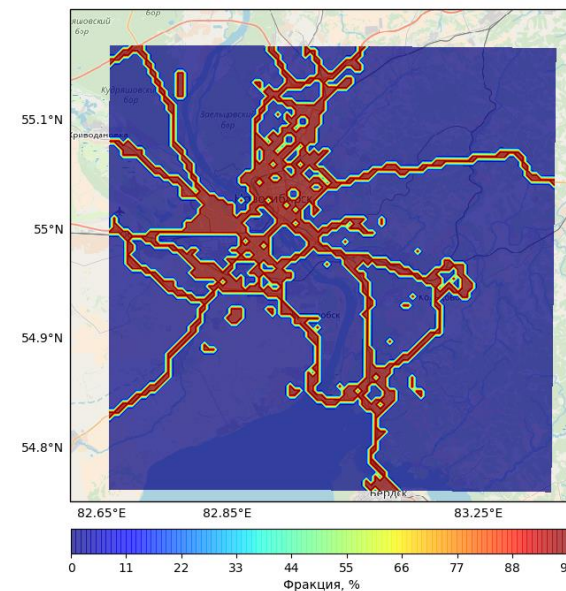
LANDUSEF, LEVEL: 31



LANDUSEF, LEVEL: 32



LANDUSEF, LEVEL: 33



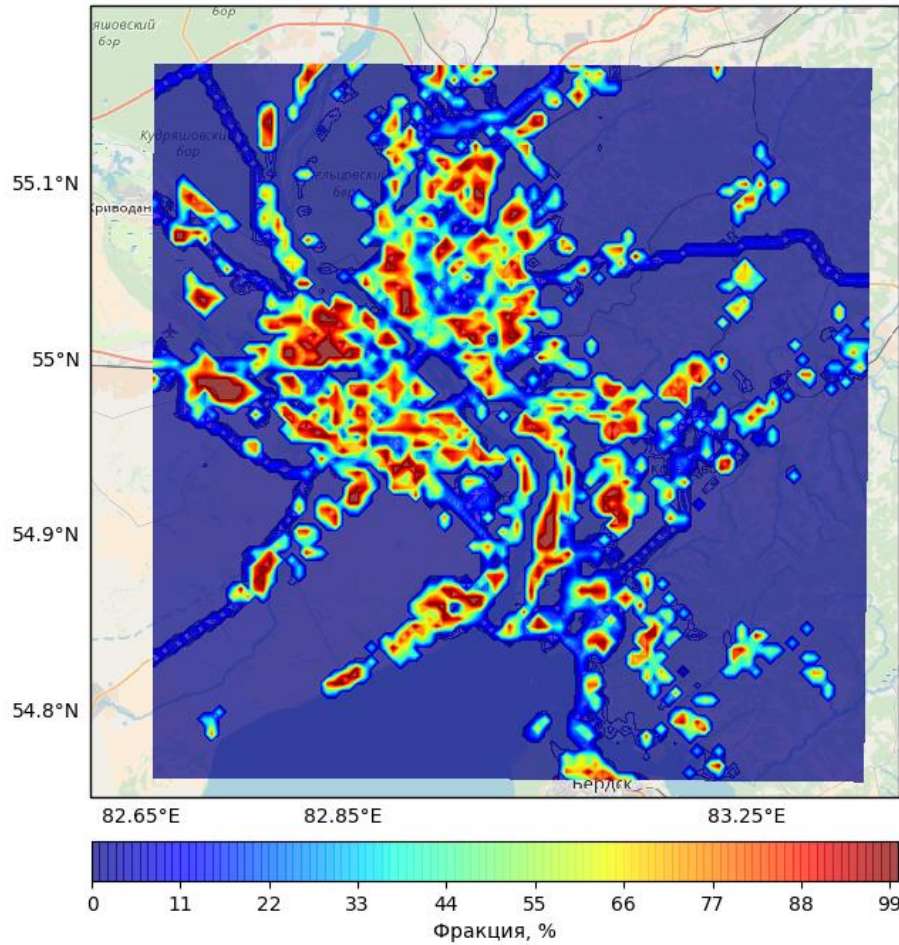
31: Категория застройки низкой интенсивности, где искусственные постройки занимают от 30 до 80 %, растительность от 20 до 70 %

32: Категория застройки высокой интенсивности, где менее 20 % растительности при плотности застройки от 80 до 100 %

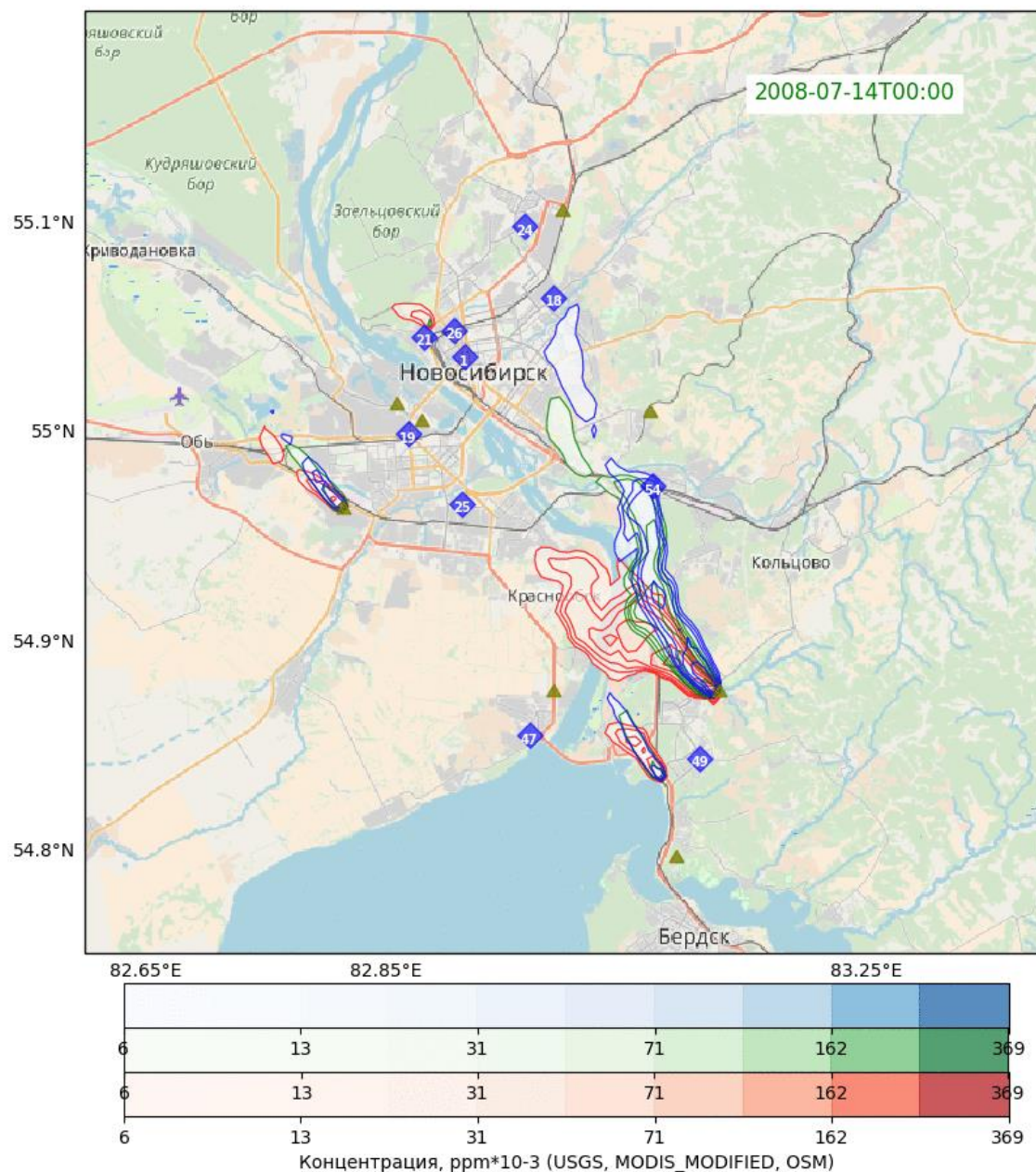
33: Коммерческая/Промышленная/Транспорт, включая дороги и ж/д пути

Фракция городской застройки

FRC_URB2D



Сценарии прогноза для Конфигурации 1 и 2 для эмиссий, восстановленных с использованием Конфигурации 1



Оценки температуры для расчета, соответствующего 13-17 июля 2008 года, BIAS(°C)

	ап. Толмаче во	ап. Северный	Огурцово	Обская ГМО	Учебная
Конфигурация 1	0,80	0,73	0,73	2,69	0,47
Конфигурация 2 Данные: modis_modified	-0,21	0,15	0,08	1,3	0,1
Конфигурация 2 Данные: osm + urban	-0,14	0,19	0,4	1,86	1,74

В конфигурации модели коэффициенты городской параметризации (зданий, поверхности) не изменялись, относительно представленных по умолчанию значений

Заключение

- Разработана система прогнозирования загрязнения атмосферы города с усвоением данных системы мониторинга.
- Использование априорной информации о расположении основных источников позволяет понизить неопределенность задачи.
- Использование имеющихся реальных данных измерений и решения обратной задачи для задания источников приводит к менее однородному решению (с учетом локальных особенностей распределения источников), по сравнению с решением на основе общедоступных баз данных эмиссий.
- Численные эксперименты с синтетическими данными показали, что доступный объем данных измерений позволяет восстанавливать источники с существенным ошибкам.
- Использование более детальных данных о подстилающей поверхности и городской параметризации существенно влияет на распространение SO₂
- Коэффициенты городской параметризации требуют уточнения с учетом региональных особенностей области моделирования



Спасибо за внимание!

Проект РФФИ и Администрации Новосибирской области № [17-41-543309](#): Разработка и адаптация прямых и сопряженных моделей к условиям города, а также проведение численных экспериментов.

Литература

1. WHO Regional Office for Europe. Air Quality Guidelines Global Update 2005: Particulate Matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide (A EURO Publication). World Health Organization, 2006.
2. Markakis K., Valari M., Perrussel O., Sanchez O., Honore C. Climate-forced air-quality modeling at the urban scale: sensitivity to model resolution, emissions and meteorology // *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 15, Jul 2015. pp. 7703-7723.
3. Holnicki P., Nahorski Z. Emission Data Uncertainty in Urban Air Quality Modeling—Case Study // *Environmental Modeling & Assessment*, Vol. 20, Feb 2015. pp. 583-597.
4. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Наука, 1982.
6. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985.
7. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. Москва: Наука, 1971.
8. Pudykiewicz J.A. Application of adjoint tracer transport equations for evaluating source parameters // *Atmospheric Environment*, Vol. 32, Sep 1998. pp. 3039-3050.
9. Penenko V., Baklanov A., Tsvetova E. Methods of sensitivity theory and inverse modeling for estimation of source parameters // *Future Generation Computer Systems*, Vol. 18, Apr 2002. pp. 661-671.
10. Issartel J.P. Rebuilding sources of linear tracers after atmospheric concentration measurements // *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 3, Dec 2003. pp. 2111-2125.
11. Пененко А. В. Обнаружение источников загрязнений с помощью вариационных методов // *Вычислительные технологии*, 2008 , Т. 13 , pp. 44-50
12. Yandex Static API URL: https://tech.yandex.ru/maps/doc/staticapi/1.x/dg/concepts/input_params-docpage/
13. Hong S.Y., Dudhia J., Chen S.H. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation // *Monthly Weather Review*, Vol. 132, Jan 2004. pp. 103-120.
14. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models // *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, Jul 2008.
15. Dudhia J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model // *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 46, Oct 1989. pp. 3077-3107.
16. Hong S.Y., Noh Y., Dudhia J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes // *Monthly Weather Review*, Vol. 134, Sep 2006. pp. 2318-2341.
17. Beljaars A.C.M. The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 121, Jan 1995. pp. 255-270.
18. Chen F., Dudhia J. Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity // *Monthly Weather Review*, Vol. 129, Apr 2001. pp. 569-585.
19. Hong S.Y., Lim J-O.J. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // *Journal Of The Korean Meteorological Society*, Vol. 42, 2006, p. 129-151
20. Mellor, G. L., and T. Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // *Rev. Geophys.*, 20 , 1982, pp 851–875.
21. Kusaka, H., and F. Kimura. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case // *J. Appl. Meteor.*, Vol 43, 2004, pp 1899-1910.
22. Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E. Mesoscale modelling of the summer climate response of Moscow metropolitan area to urban expansion // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol 96 (2017)