

Влияние городов на погоду и климат: наблюдения, моделирование и прогноз

Михаил Иванович Варенцов ^{1,2,3,4*}

с использованием материалов многих коллег и соавторов

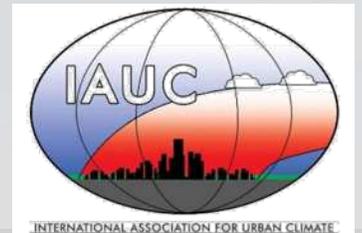
¹ МГУ имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр

² Институт физики атмосферы имени А.В. Обухова РАН

³ Гидрометцентр России

⁴ Российский государственный гидрометеорологический университет

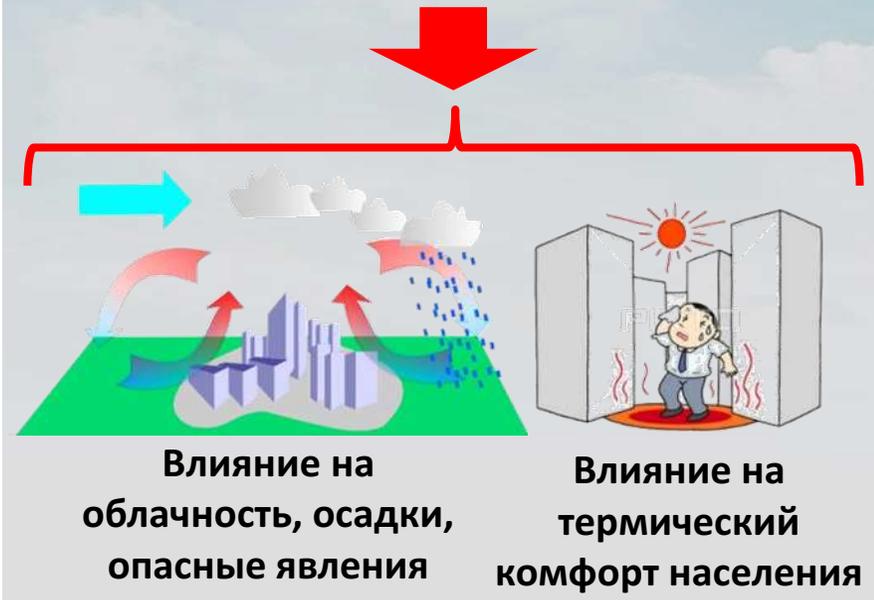
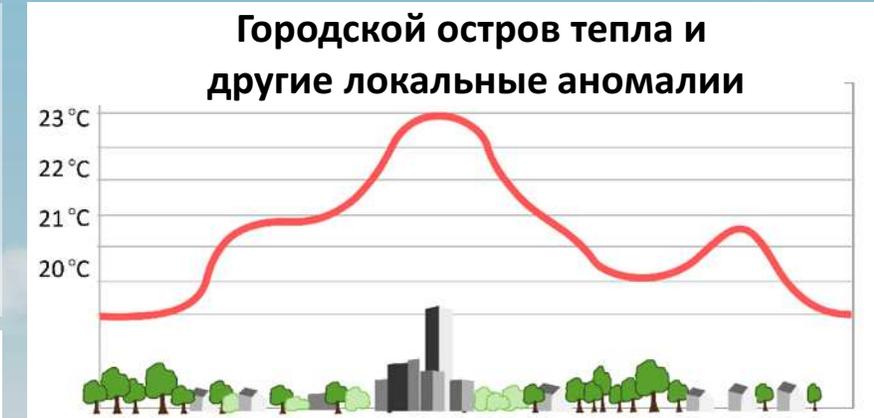
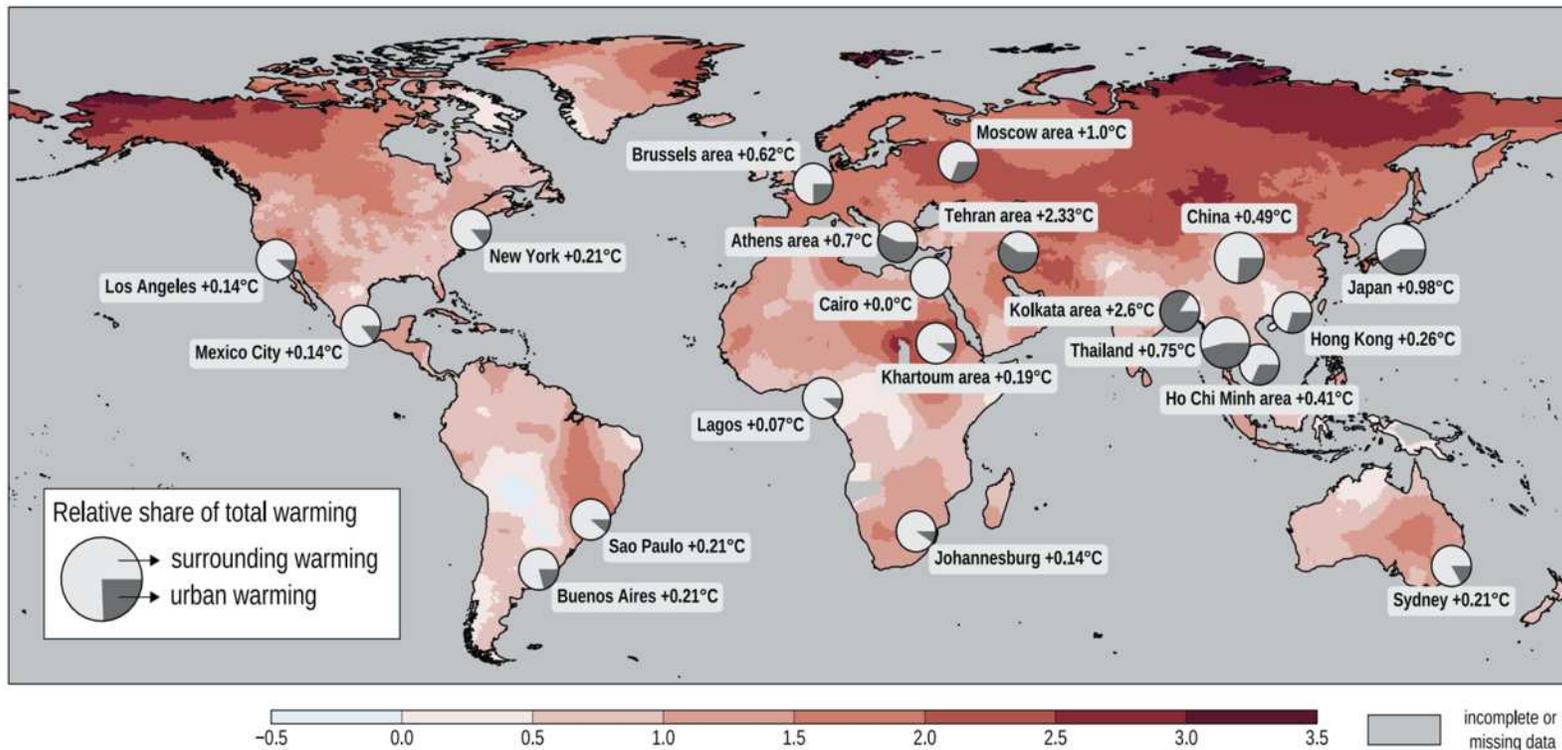
[*mikhail.varentsov@srcc.msu.ru](mailto:mikhail.varentsov@srcc.msu.ru)



Актуальность

- Города особо уязвимы к погоднo-климатическим экстремумам
- Города влияют на атмосферные процессы за счет изменения свойств поверхности и антропогенных эмиссий
- Города - «горячие точки» глобального потепления (IPCC AR6, 2021)

(a) Trend in global surface air temperature (CRU TS, 1950-2018)

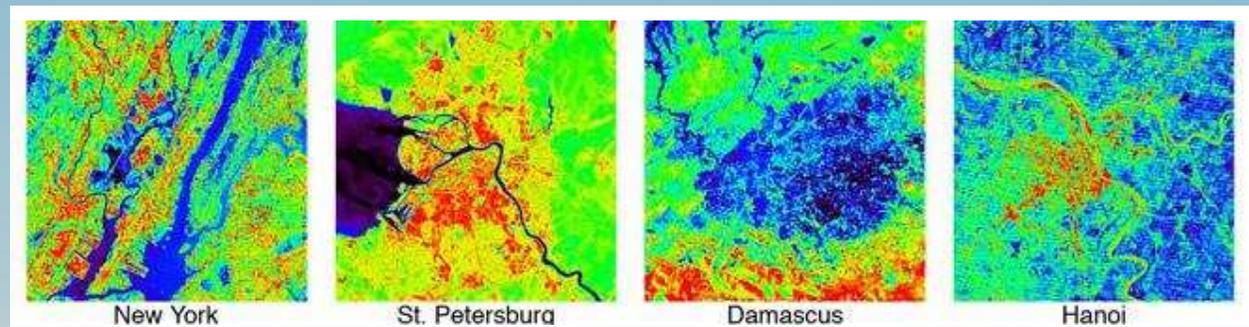


Проблемы и вызовы

Сложность физических процессов



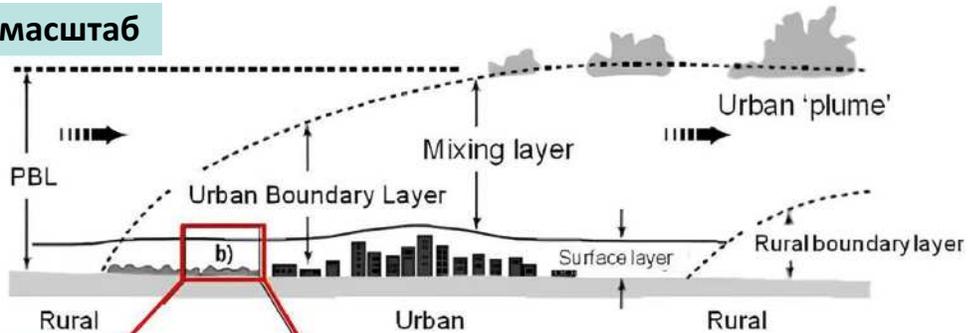
Пространственная неоднородность



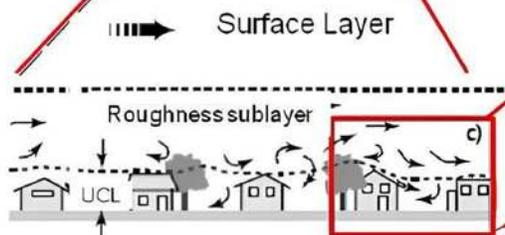
Дефицит репрезентативных наблюдений



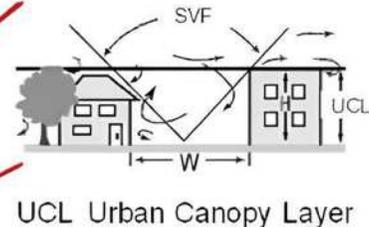
Мезо-масштаб



Локальный масштаб

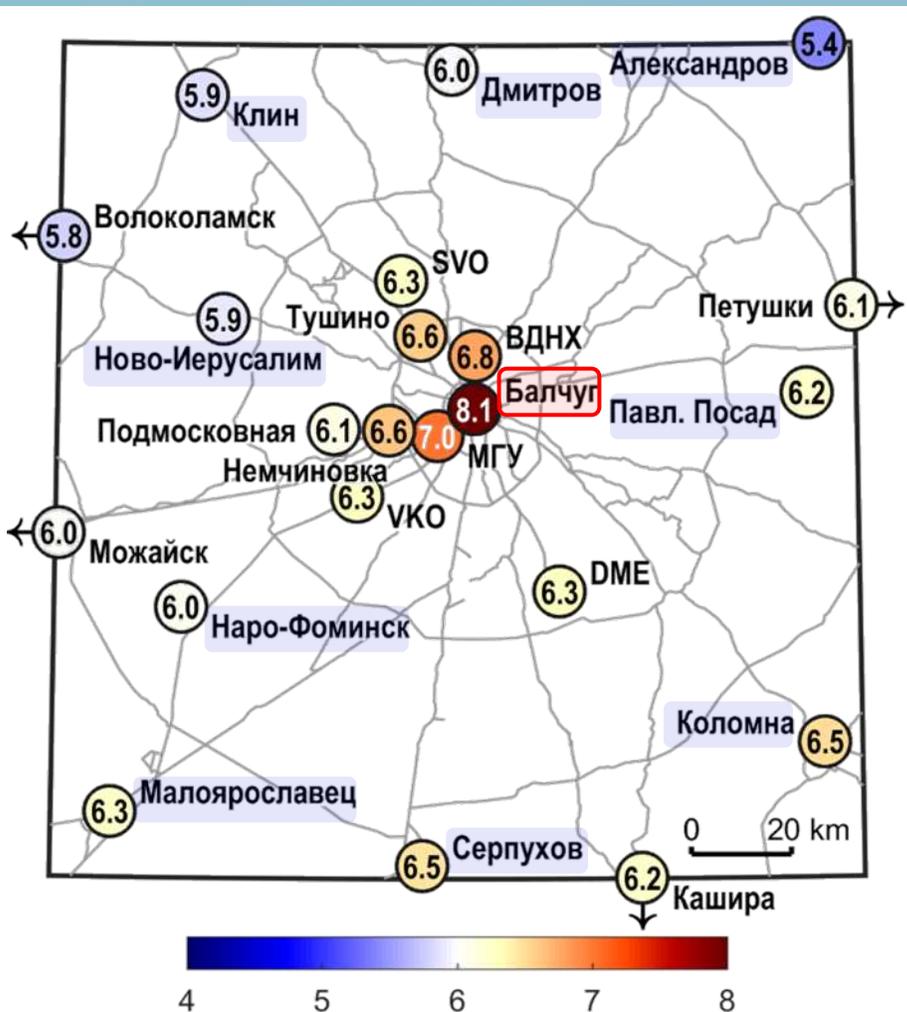


Микро-масштаб



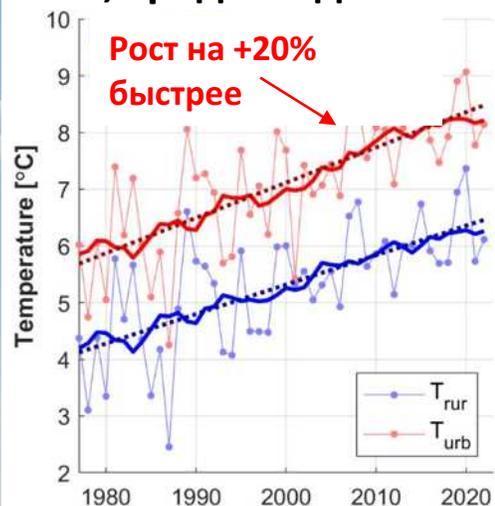
Только 15% крупных городов России освещено репрезентативными городскими метеоданными

Наблюдения: остров тепла Москвы



Средняя температура за 2007-2016 гг.

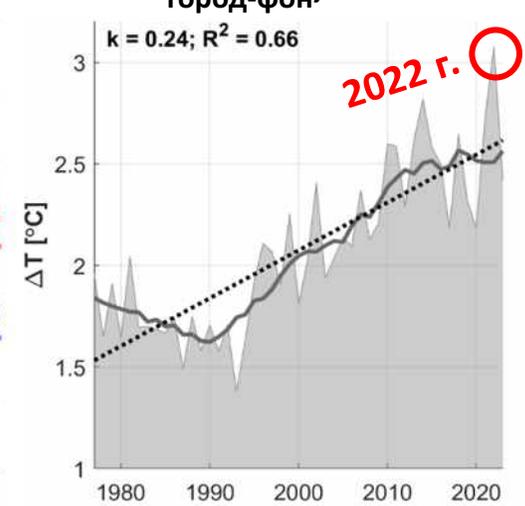
Т, среднегодовая



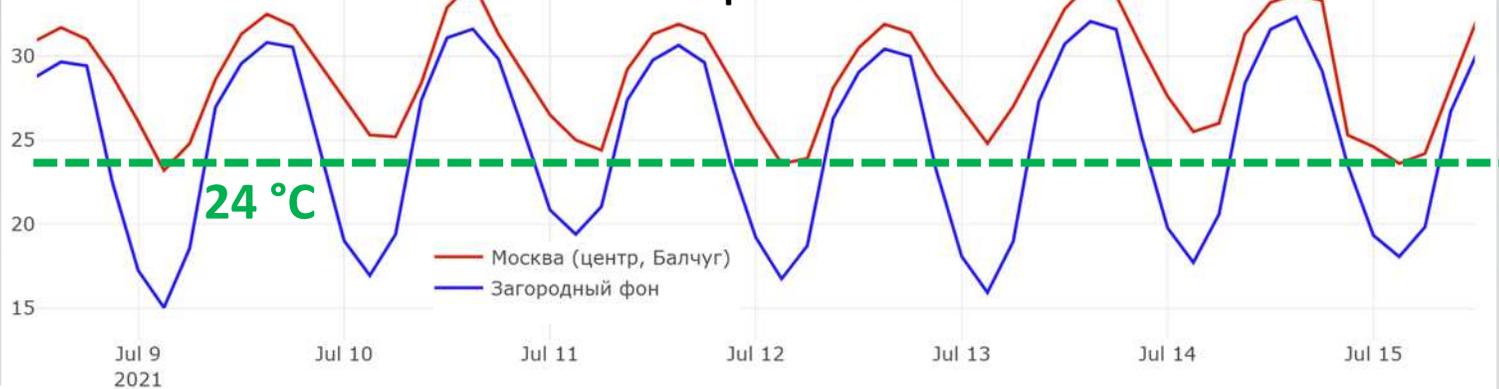
Т, лето



$\Delta T_{\text{город-фон, лето}}$



Волна жары в июле 2021 г.



Кислов и др. (2017). «Остров тепла» московской агломерации и урбанистическое усиление глобального...
 Климат Москвы в условиях глобального потепления (2017, монография, под ред. А.В. Кислова)
 Varentsov et al. (2023). Machine Learning for Simulation of Urban Heat Island Dynamics Based on Large-Scale....

Наблюдения: метео-краудсорсинг

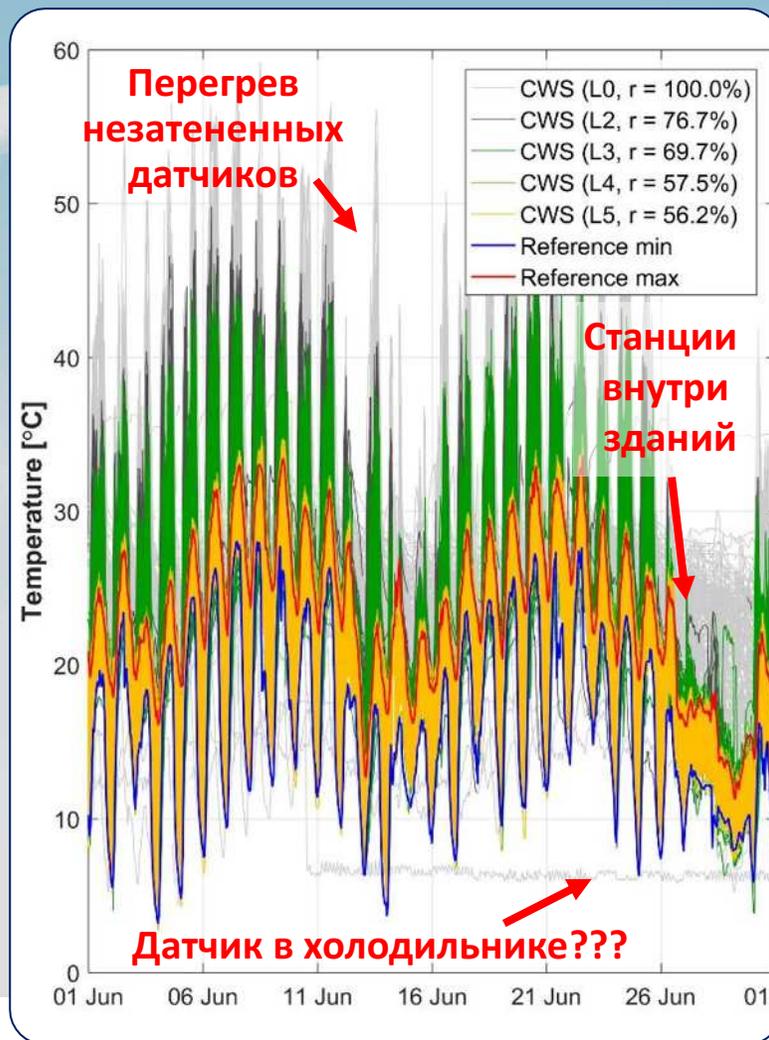
Метеостанции Netatmo

- ❑ IoT-гаджет вместо термометра
- ❑ Тысячи станций в крупных городах
- ❑ Доступ к данным через API
- ❑ Исследования городского климат (Chapman et al., 2017; Meier et al., 2017), уточнение прогноза погоды (Nippen et al., 2020)
- ❑ Частичная блокировка в РФ с 2023 г. ☹️

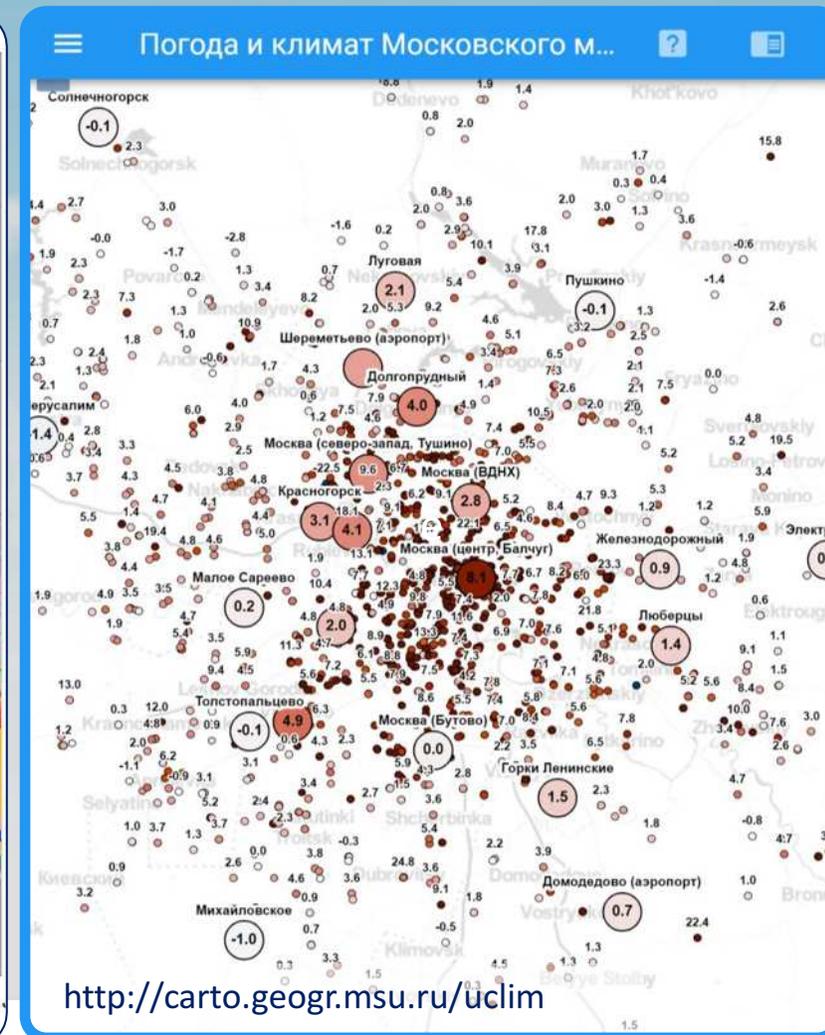


| City | # CWS June 2018 |
|----------|--------------------|
| Basel | 940 |
| Berlin | 2100 |
| Bern | 650 |
| Göteborg | 410 |
| Hamburg | 1190 |
| Lisbon | 150 |
| London | 830 |
| Moscow | 730 |
| Paris | 6380 |
| Toulouse | 720 |

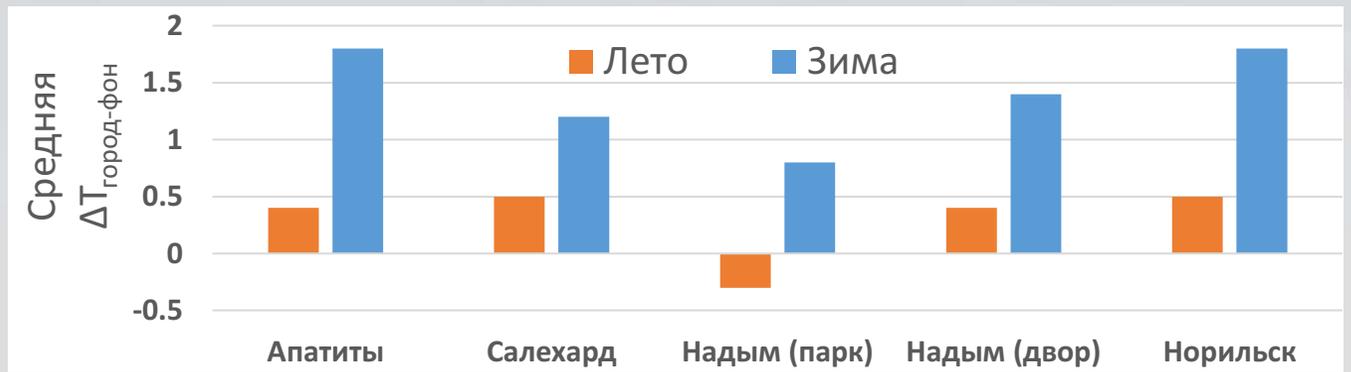
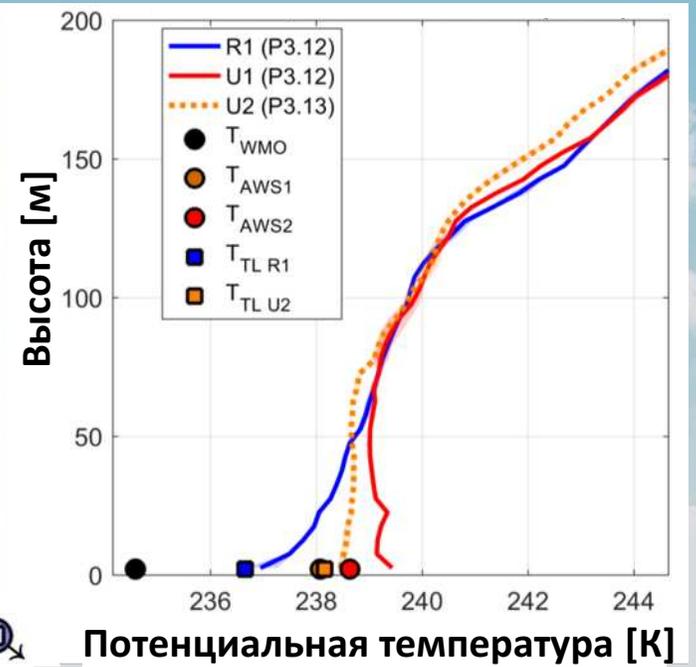
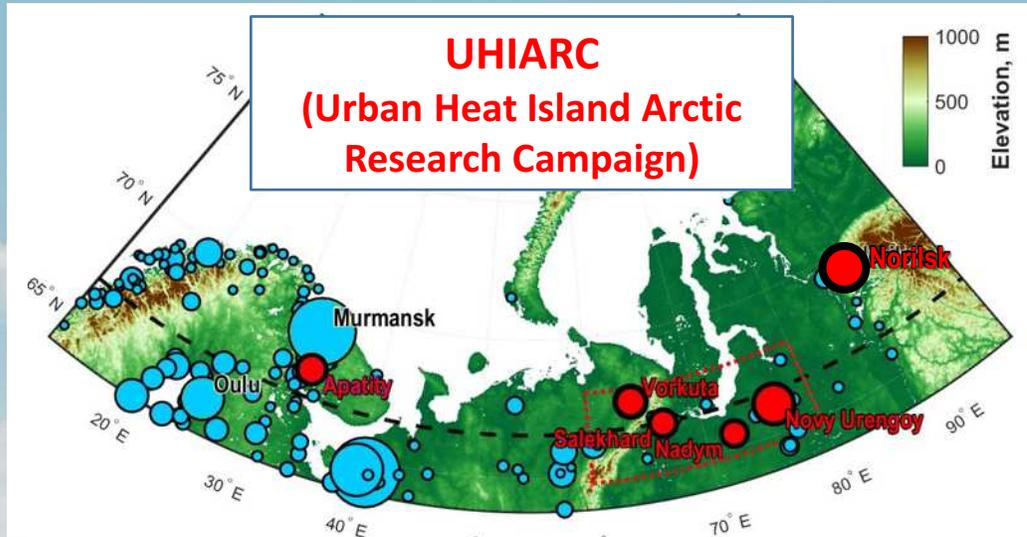
Качество данных?



Пример для Москвы



Наблюдения: экспериментальные измерения

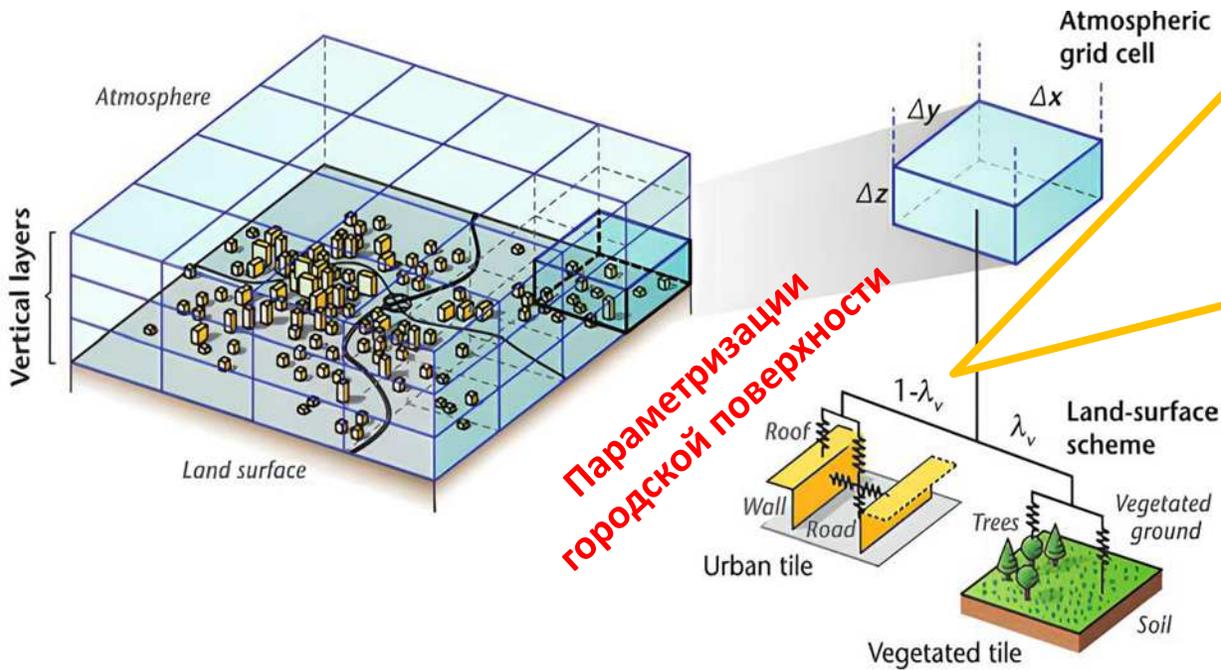


Konstantinov et al. (2018, ERL). A high density urban temperature network ... in several cities of Eurasian Arctic.
 Varentsov et al. (2018, ACP). Anthropogenic and natural drivers of ... urban heat island in a typical Arctic city.
 Varentsov et al. (2023, Urban Climate). Observations of the urban boundary layer in a cold climate city.

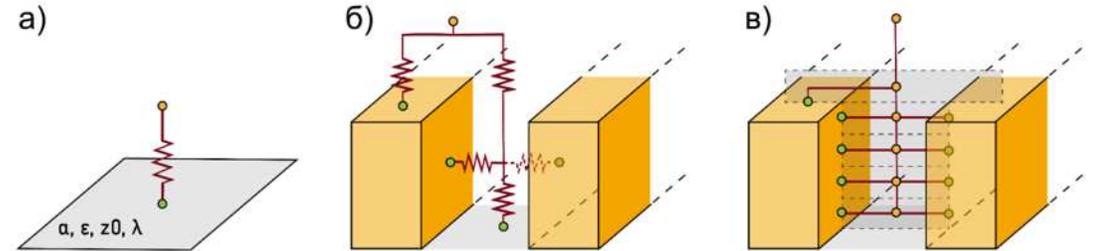
Моделирование: городские параметризации

Мезомасштабные модели

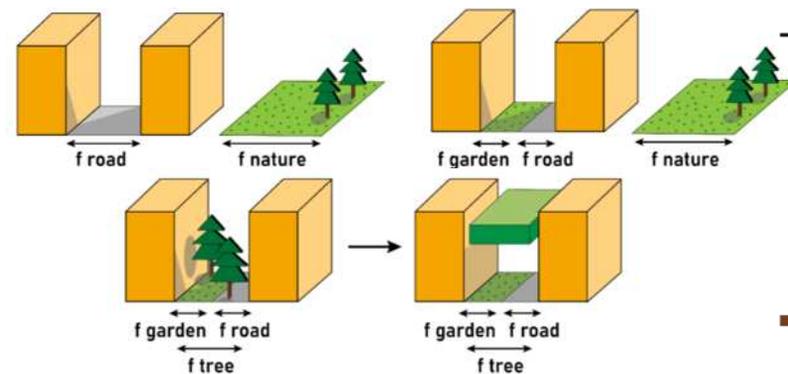
(шаг сетки: первые сотни метров – километры)



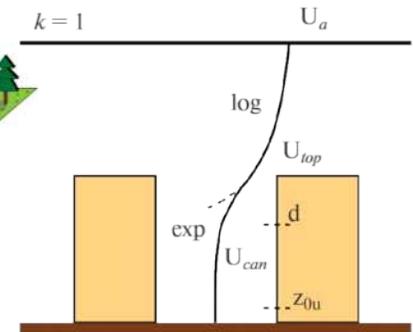
Подходы к описанию городской застройки



Подходы к описанию городской растительности



Параметризация ветра в застройке



Тарасова и др. (2023, ФАО) Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития.



Моделирование: входные параметры

Микро-масштаб

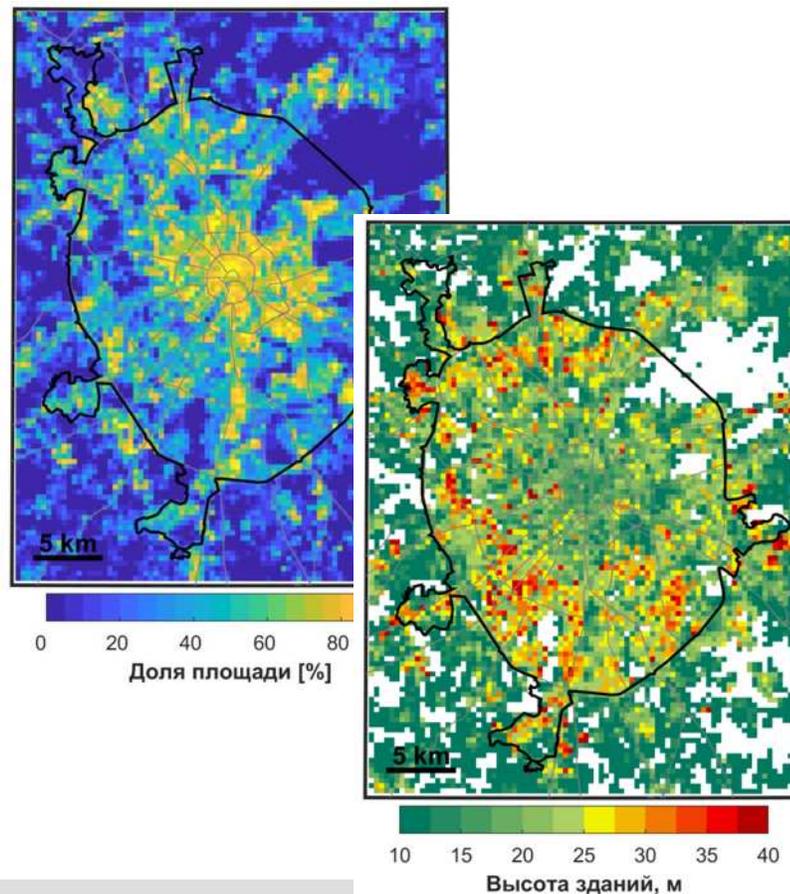
исходные картографические данные



- Здания
- Дороги
- Деревья (маскированные)
- Трава и кустарники (маскированные)
- Деревья
- Трава и кустарники

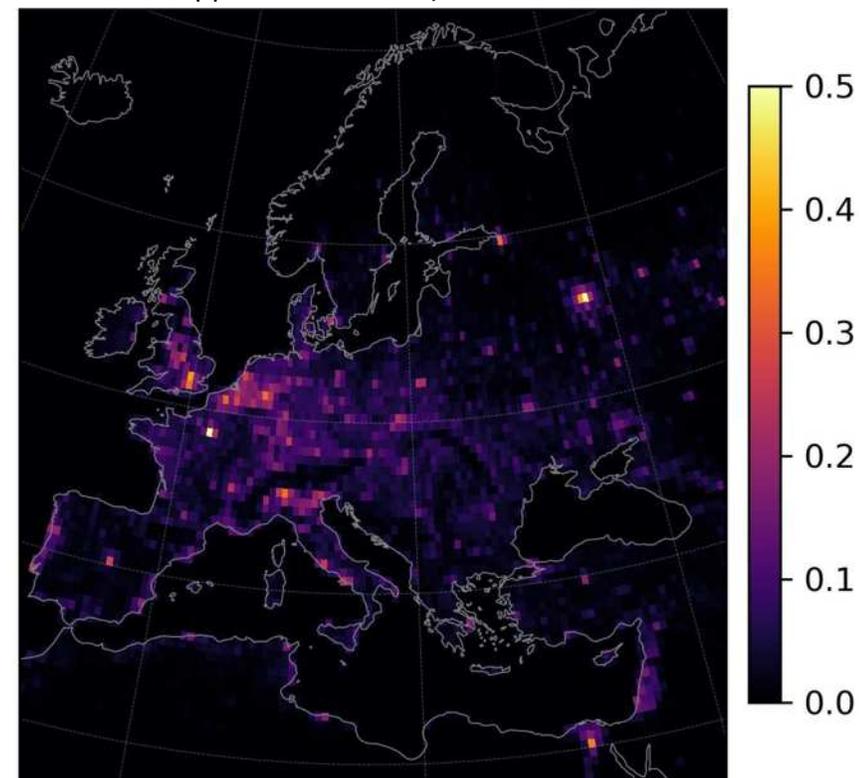
Мезо-масштаб

входные параметры для COSMO, сетка 500 м

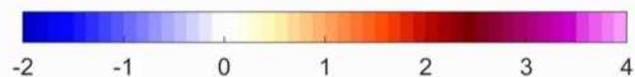
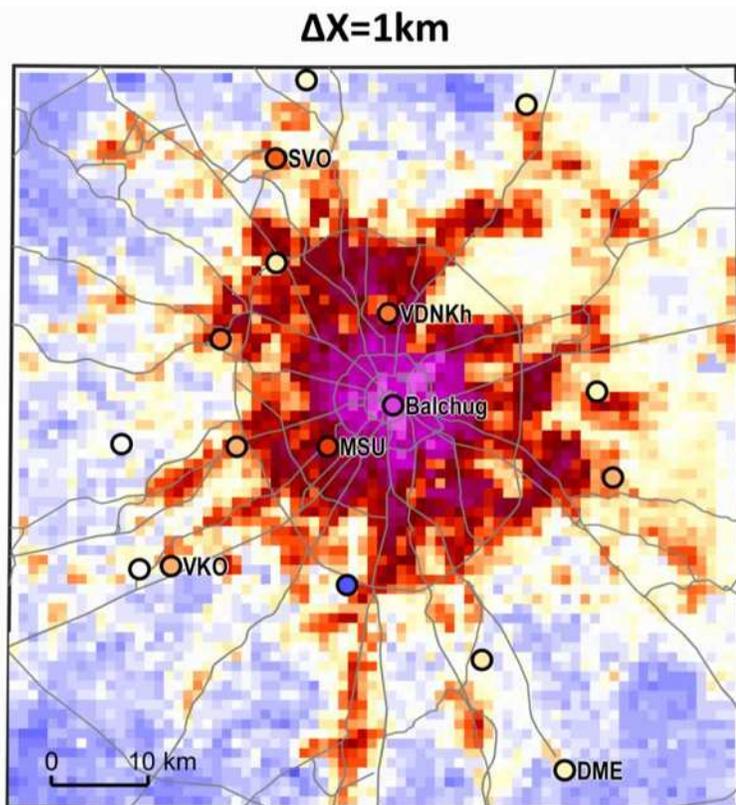


Макро-масштаб

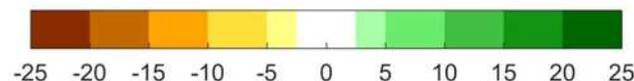
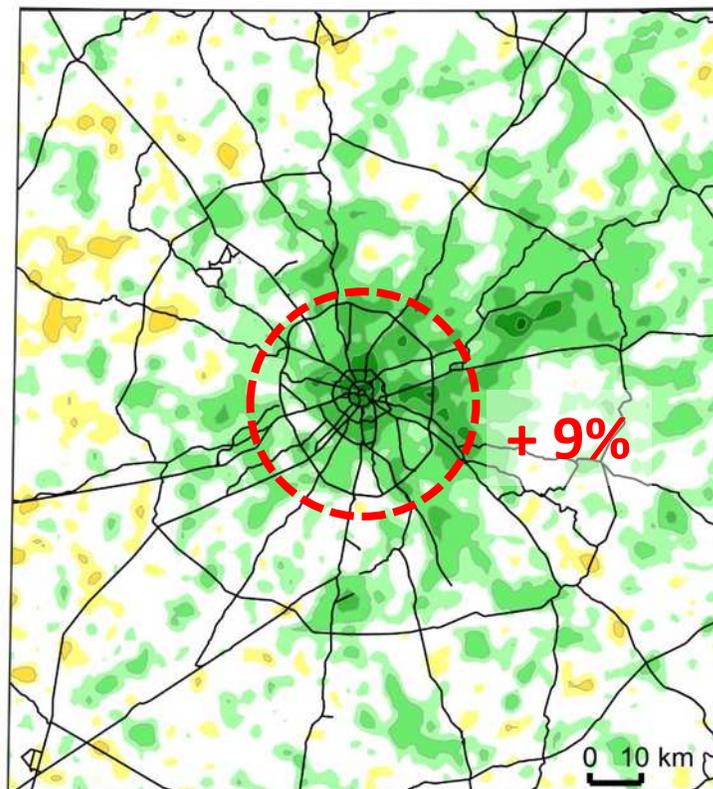
входные параметры для перспективного блока модели ИВМ-РАН, сетка 0.5x0.5°



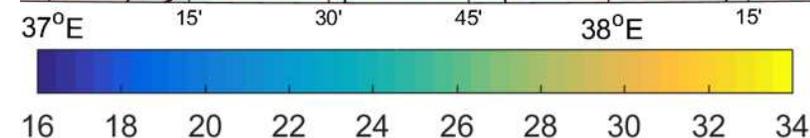
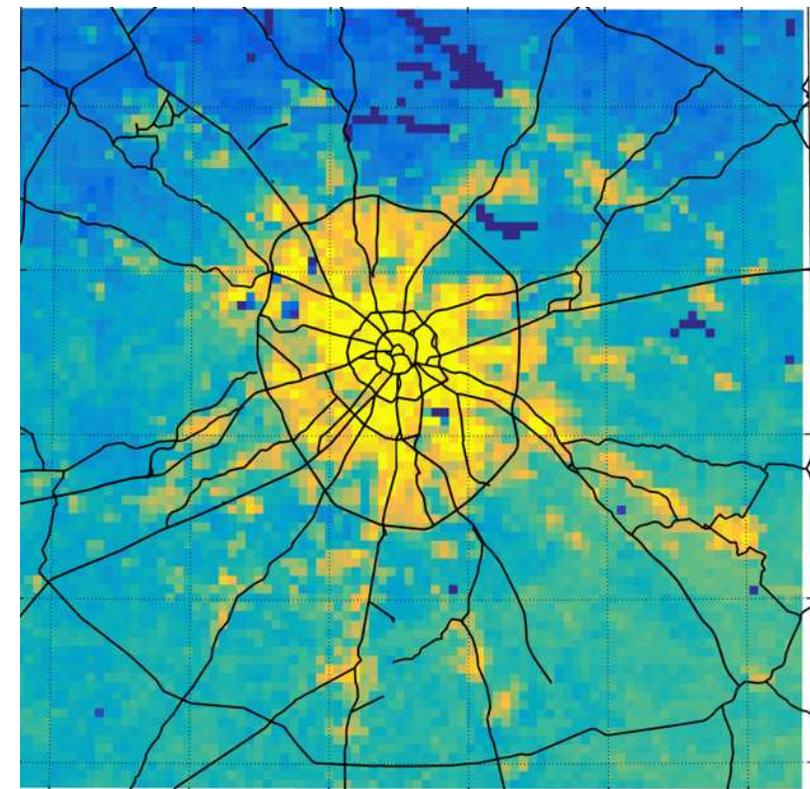
Моделирование: региональные исследования



Воспроизведение острова тепла
Москвы моделью COSMO с
параметризацией TERRA_URB
(Varentsov et al., 2018; 2020; 2023)

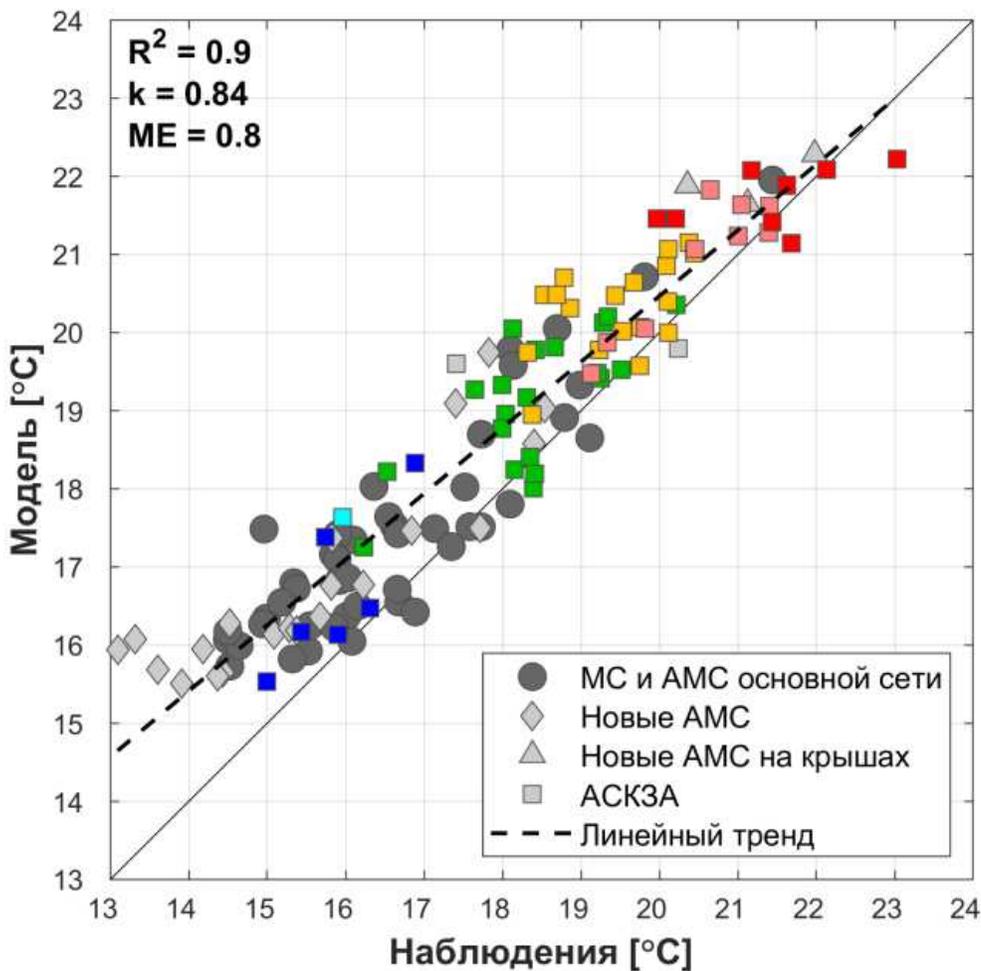
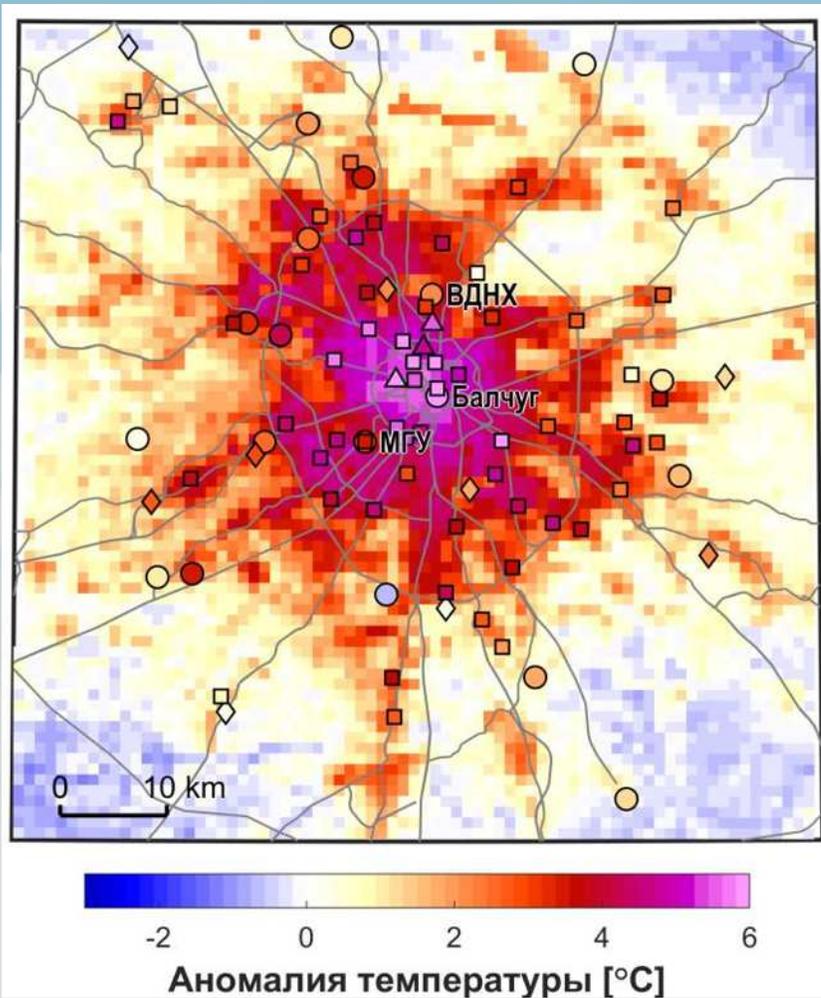


Влияние Москвы на летние суммы
осадков (в %) в среднем за 10 лет
(Varentsov et al., 2018;
Platonov et al., 2024)



Повторяемость теплового стресса в
Москве во время волны жары 2010 г.
(Zemtsov et al., 2020)

Моделирование: верификация



Базовая сеть Росгидромета



АСКЗА Мосэкомониторинга



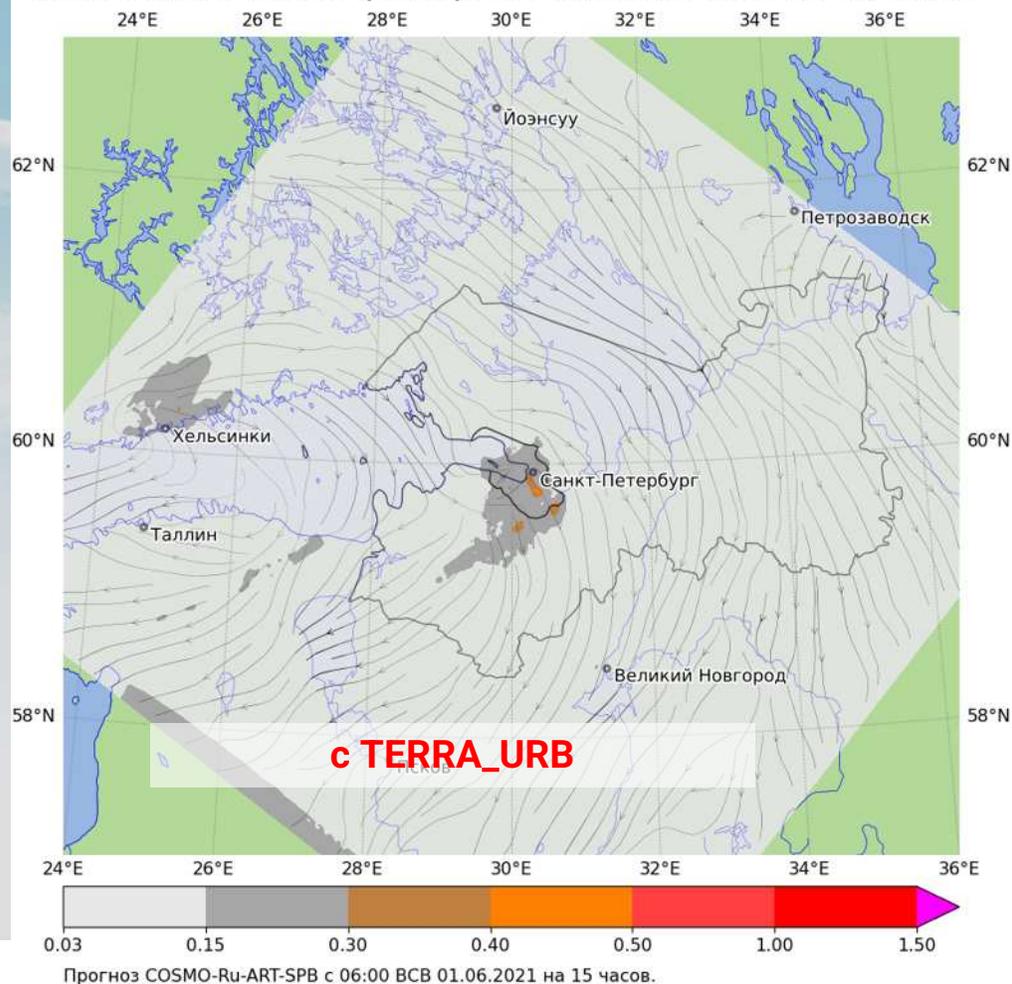
АМС экспериментальной сети

Кузнецова и др. (2024, МиГ). Характеристики городского острова тепла в Москве и верификация модели COSMO-RU1-MSK с шагом сетки 1 км по данным наблюдений на сети «Мосэкомониторинг»

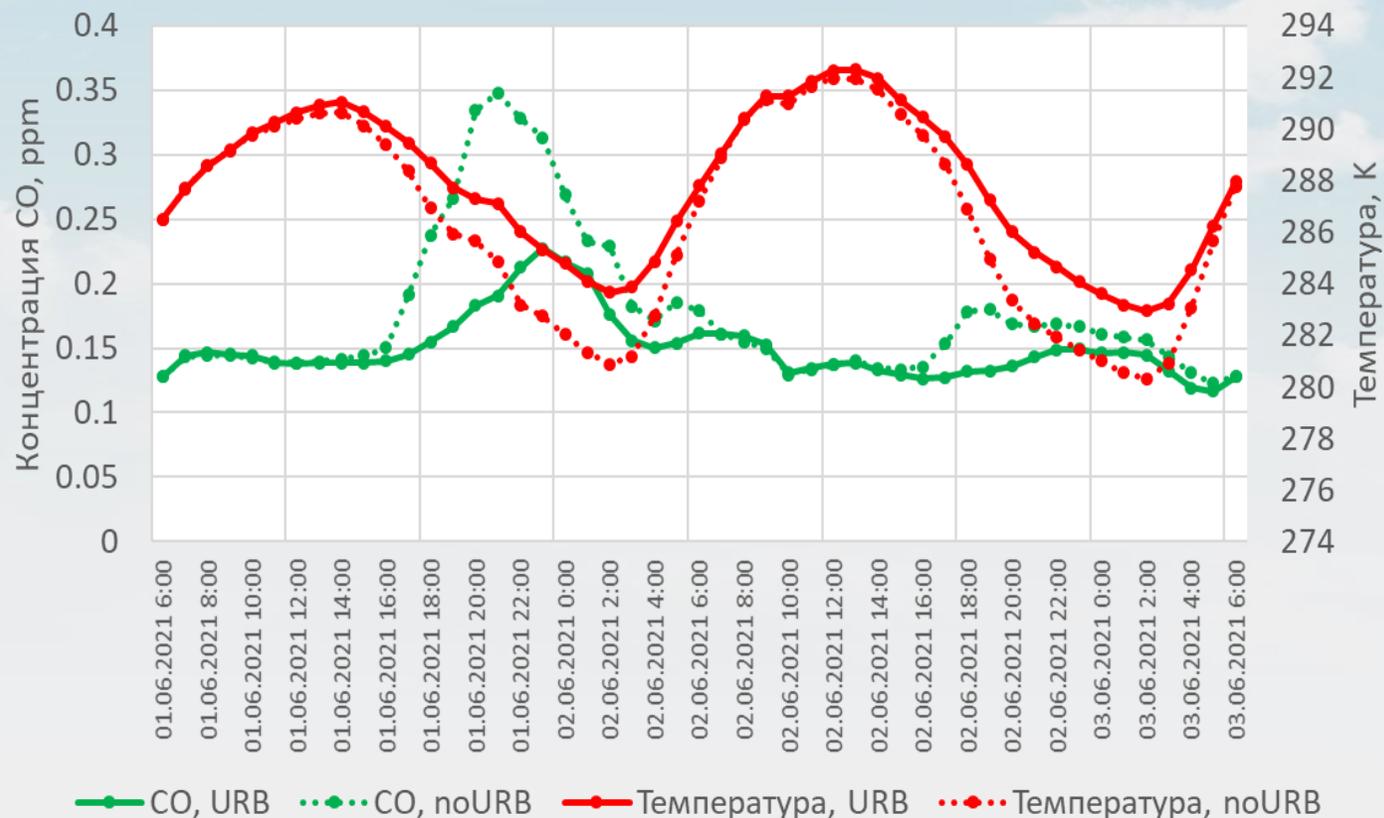
Моделирование: загрязнение атмосферы

Результаты расчетов интегрированной химико-транспортной модели COSMO-ART

02.06.2021 00:00 (МСК): CO на высоте 0-10 м, мг/м³

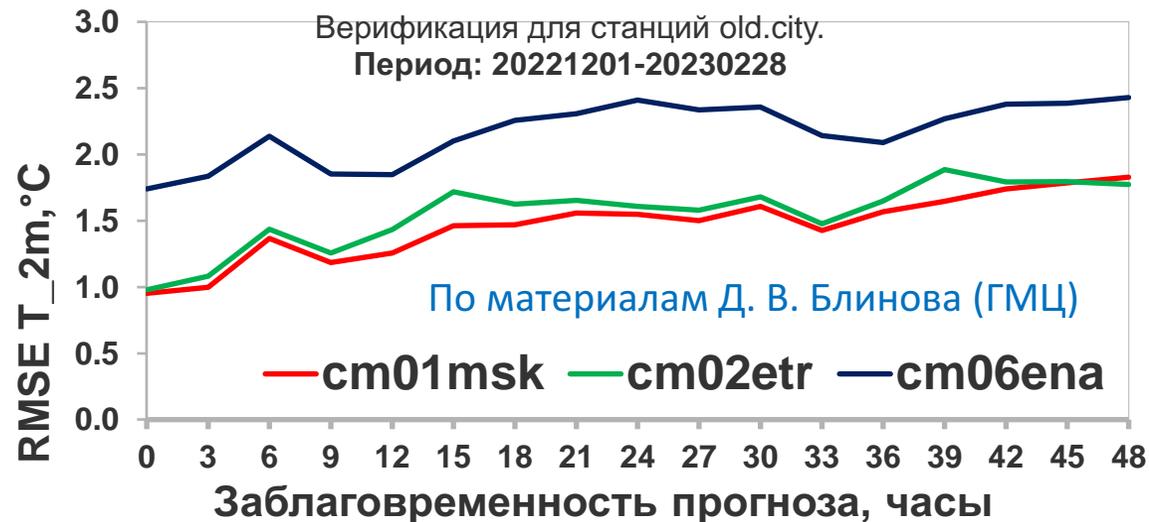
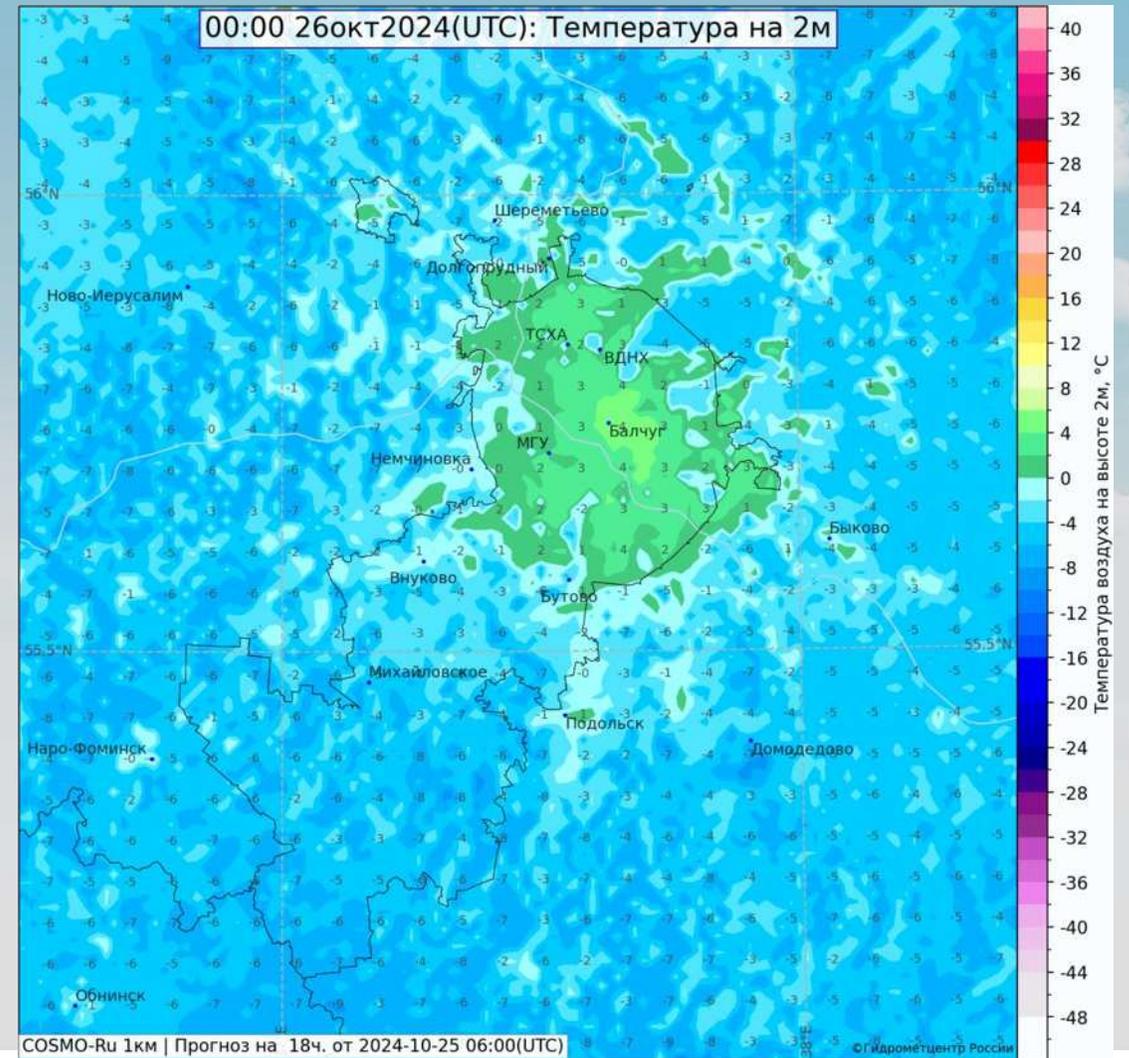
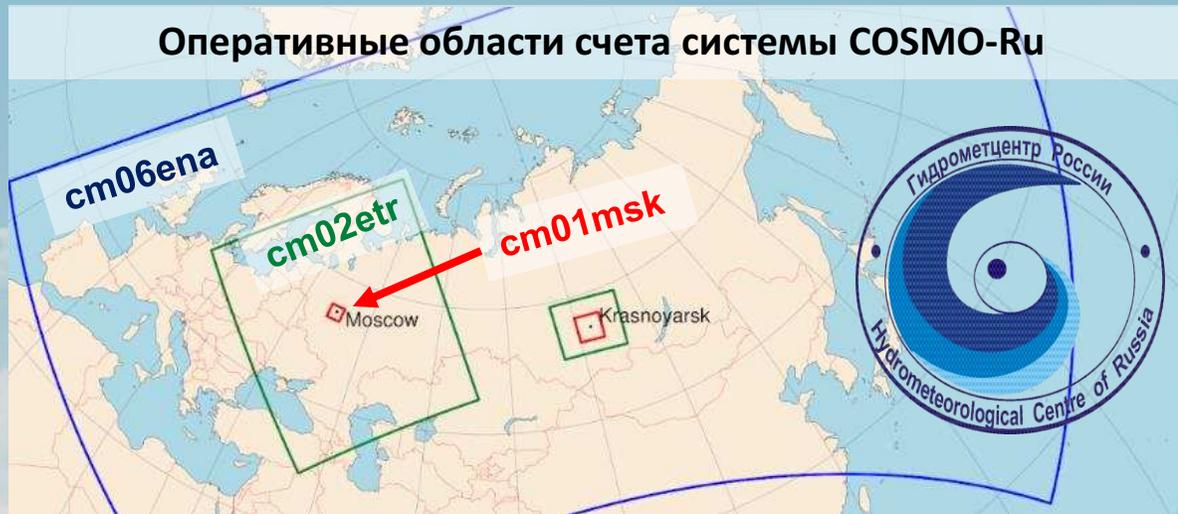


Концентрации угарного газа и температура на нижнем модельном уровне



Изменение стратификации атмосферы приводит к более интенсивному выносу загрязняющих веществ в вышележащие слои

Прогноз: города в системе COSMO-RU



Ривин и др. (2019, МиГ) Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа

Ривин и др. (2020, МиГ) Разработка оперативной системы численного прогноза погоды и метеоусловий опасных явлений с высокой детализацией для Московского мегаполиса

Прогноз: градостроительные сценарии

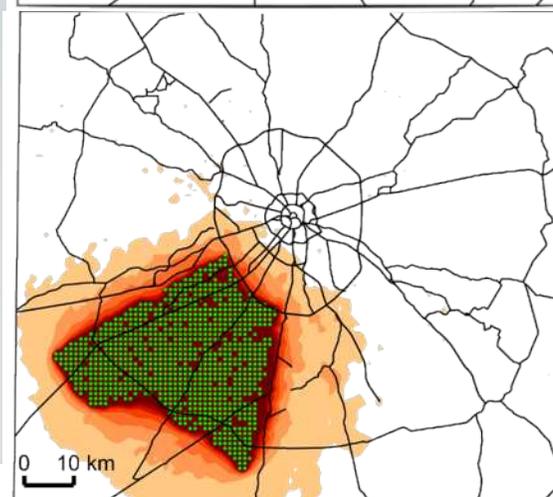
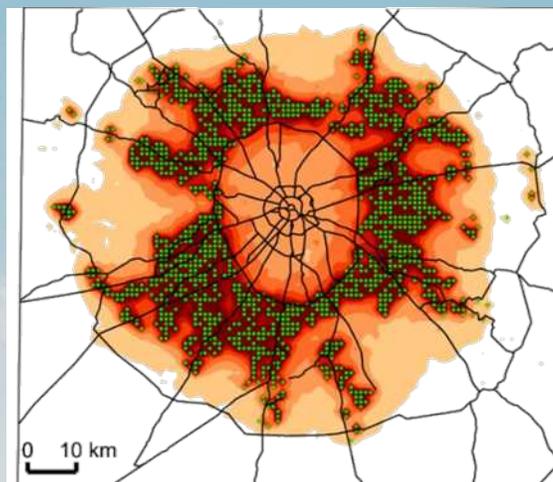
Гипотететические сценарии двукратного роста Москвы



0 5 20 40 60 80 100
Доля урбанизированной территории, %

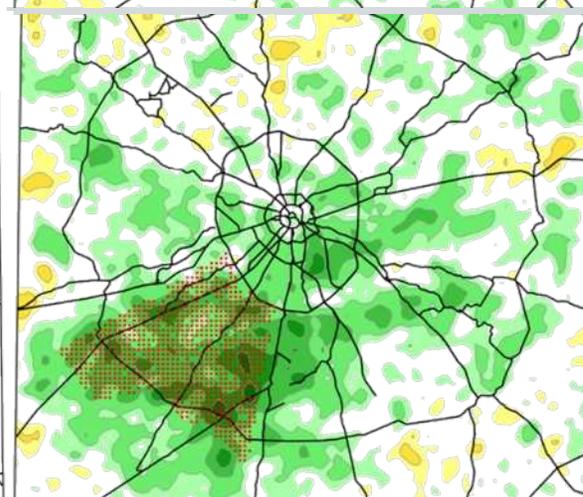
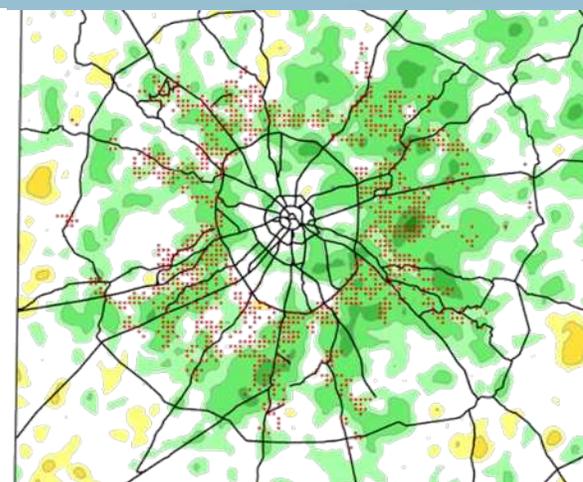
10 15 20 25 30 35 40
Высота зданий, м

Отклик средней летней температуры [°C]



-0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8
 $\Delta T, ^\circ C$

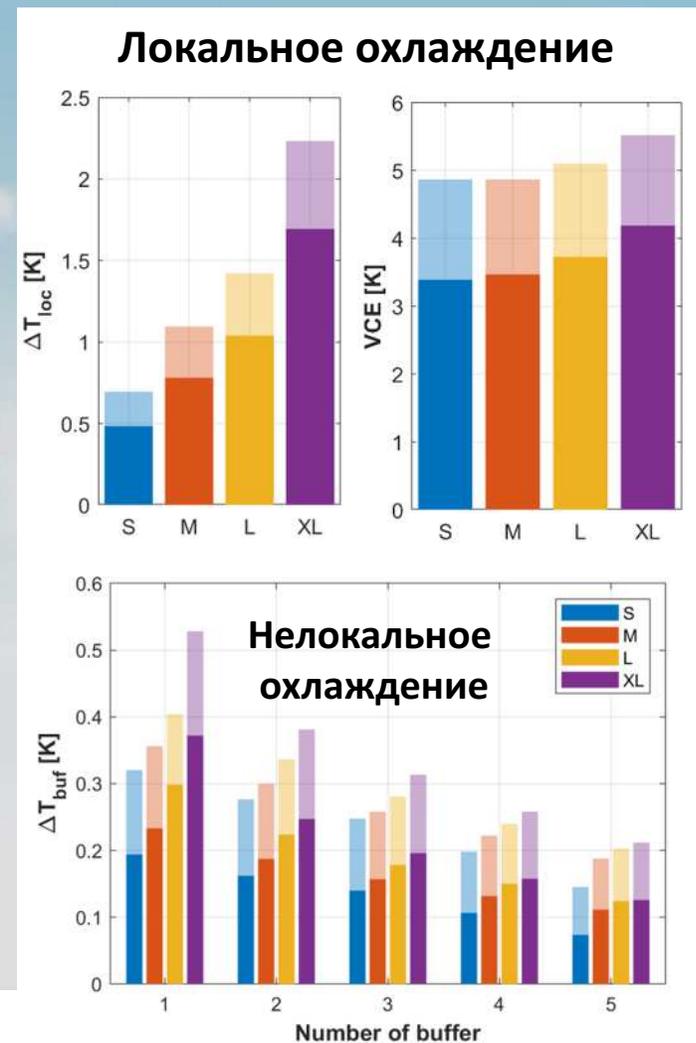
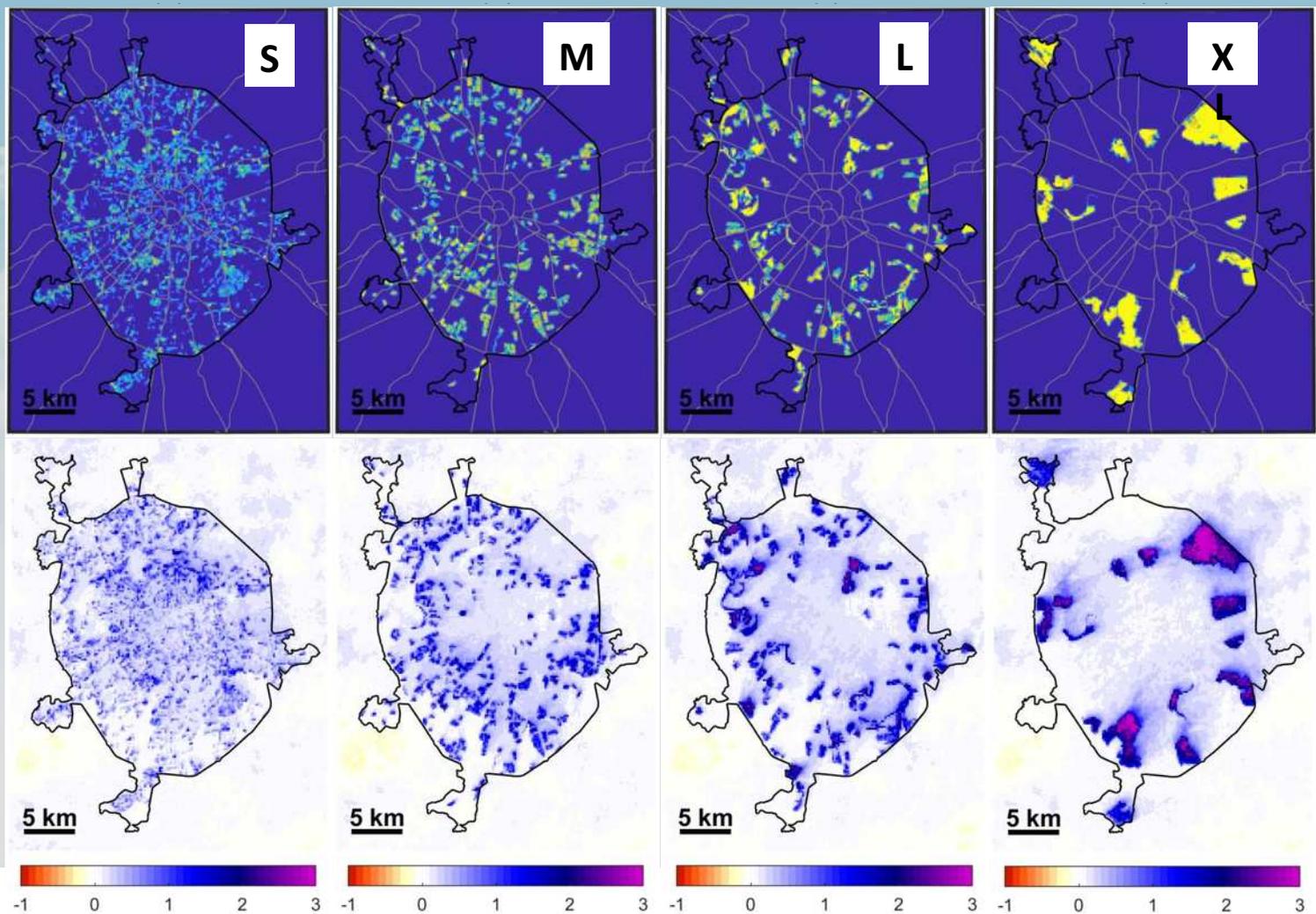
Отклик летней суммы осадков [%]



-25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25
 $\Delta P, \%$

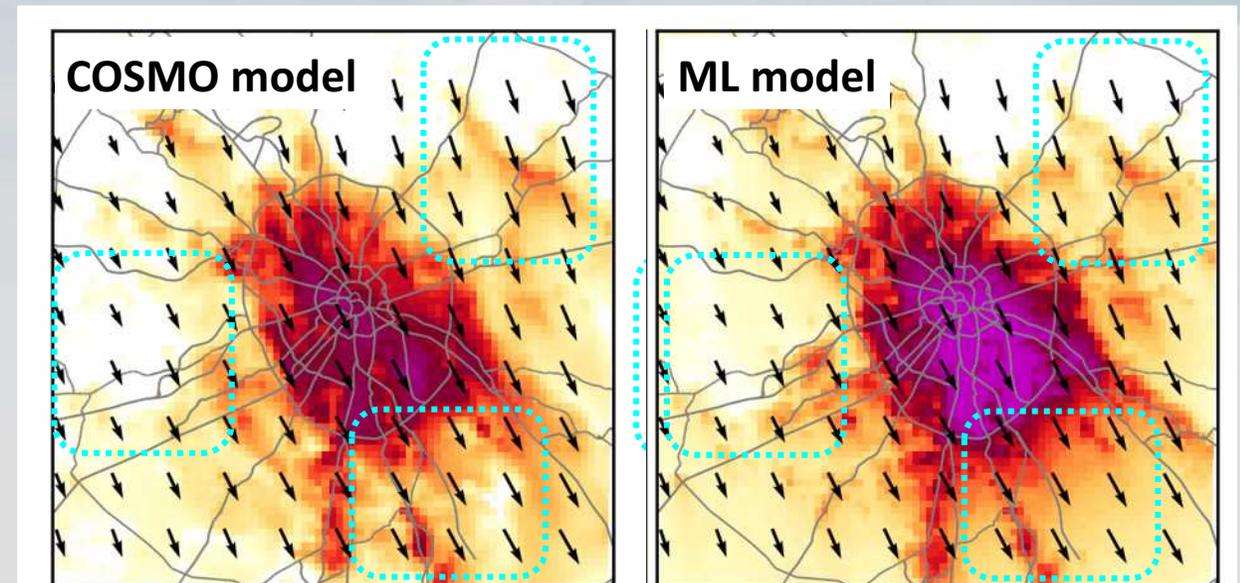
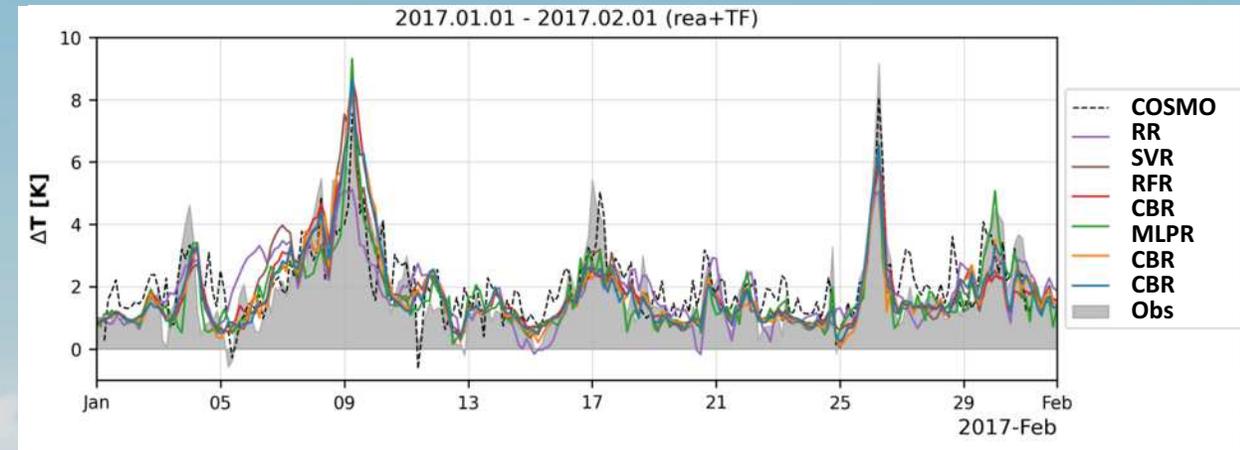
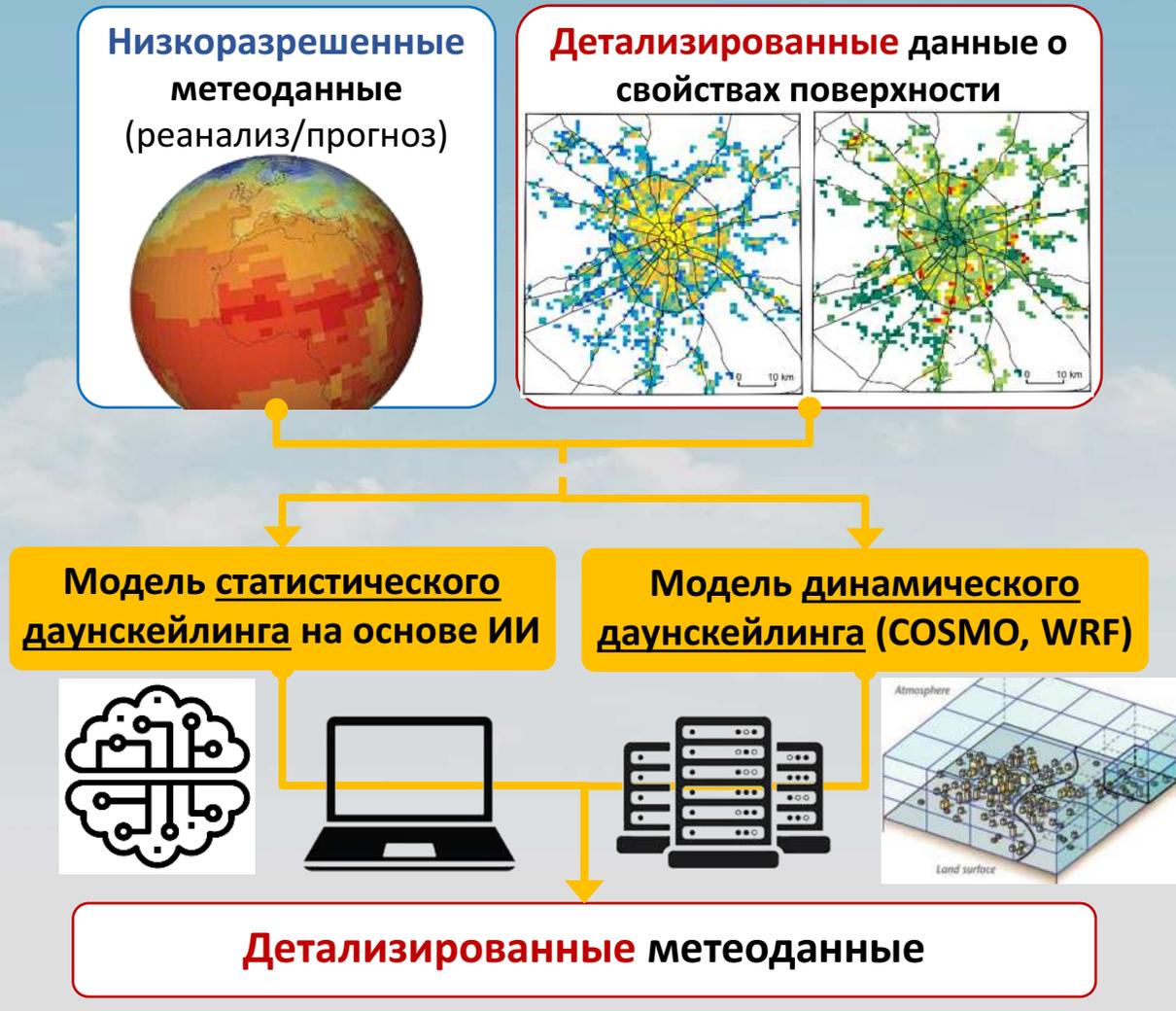
Прогноз: градостроительные сценарии

Охлаждающий эффект городских парков



Varentsov et al (2023, STotEn). Does size matter? Modelling the cooling effect of green infrastructures in a megacity during a heat wave.

Моделирование: искусственный интеллект



Выводы и рекомендации

- ❑ Города формируют **локальные аномалии** метеорологического режима:
 - Самый яркий пример – **городской остров тепла** – выражен как в мегаполисах, так и в небольших городах, в т.ч. в Арктике
 - Рост городов приводит к **урбанистическому усилению потепления климата**
 - Локальные метео-аномалии влияют на конвективные процессы и режим осадков, условия распространения загрязняющих примесей, термический комфорт и здоровье населения
- ❑ Важно **учитывать влияние городов** на атмосферные процессы в:
 - Прогнозе погоды и распространения загрязняющих примесей
 - Градостроительном планировании, в т.ч. при адаптации к изменениям климата
 - Метеорологических и климатических сервисах
- ❑ Остро стоит проблема **дефицита данных** метеорологических наблюдений в городах. В связи с этим **необходимо**:
 - Сохранение и развитие существующих систем метео-наблюдений в городах
 - Разработка и внедрение **национальных стандартов** организации специализированных систем **городского метео-мониторинга** в соответствии с рекомендациями ВМО
 - Межведомственный **обмен** всеми доступными данными наблюдений в городах

