



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Курс «Моделирование городского климата» 2026, лекция №1

Введение в городскую метеорологию и климатологию

Михаил Иванович Варенцов

mvarentsov@hse.ru



Давайте познакомимся

Коротко обо мне:

- Выпускник географического факультета МГУ, кафедры метеорологии и климатологии (2014)
- Кандидат географических наук (2018), тема диссертации «Анализ и моделирование мезоклиматических особенностей Московской агломерации» (научный руководитель – проф., д.г.н. А.В. Кислов)
- Старший научный сотрудник НИВЦ МГУ, ИФА РАН, Гидрометцентра РФ
- **Компетенции и интересы:**
 - Городская метеорология и климатология
 - Численное моделирование погоды и климата
 - Работа на суперкомпьютерах
 - Анализ данных и машинное обучение
 - Экспериментальные метеорологические исследования



Давайте познакомимся

Расскажите о себе:

- 1) Как Вас зовут?
- 2) Тема научного исследования?
- 3) Почему записались на этот курс и что хотите от него получить?

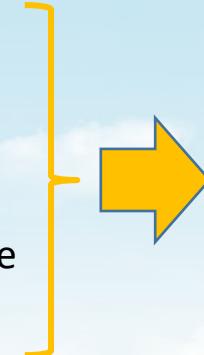
Информация о курсе

- Курс экспериментальный, проводится третий раз
- 22 ч. лекции, 22 ч. семинары
- **Формы контроля успеваемости:**
 - Экзамена не будет 😊
 - Будут домашние задания:
 - Эссе (2 шт.)
 - Практические работы (\approx 5 шт.)
 - В конце курса – защита мини-проект на основе материалов практических работ.

Практические работы

□ Примерные темы практических работ:

- Анализ данных мониторинга для городов
- Пространственные данные для моделирования городского климата
- Мезомасштабного моделирования городского климата
- Микромасштабное моделирование городского климата
- Моделирование биоклиматической комфортности в городской среде
- Моделирование градостроительных и архитектурных сценариев



Курсовой
проект

□ Практические работы выполняются:

- по данным для выбранного индивидуально города
- на языке программирования Python (альтернативные варианты обсуждаются индивидуально)
- сдача в формате Jupiter Notebook (код + графики + интерпретация), если не указано иного

□ Оценка за каждую практическую работу определяется:

- Результатом выполнения задания - графиками, картами и пр., и их интерпретацией
- Исходным кодом, использованным для анализа данных (если предполагается программирование)
- Ответами на вопросы по теме практической работы

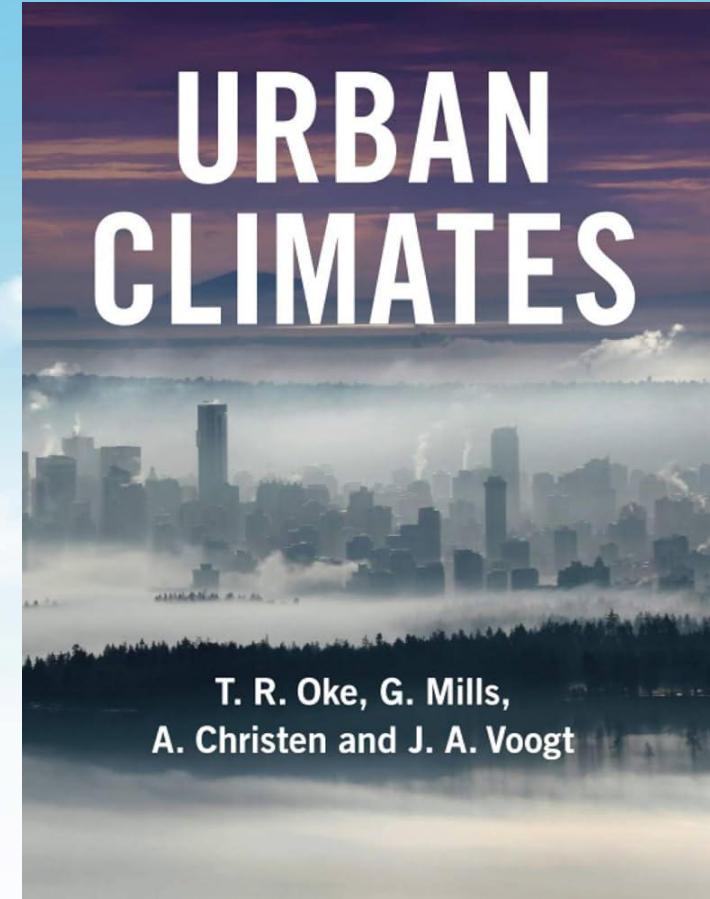
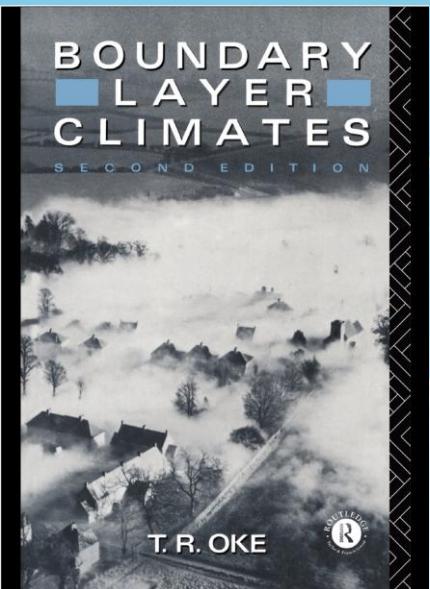


Организационные вопросы

- Главное правило: есть вопрос – спроси!
- Репозиторий на GitHub с материалами по курсу:
<https://github.com/mvarentsov/UCLim4HSE-2026>
- Коммуникация:
 - E-mail: e-mvarentsov@hse.ru
 - Telegram: https://t.me/mikhail_varentsoff
 - Группа в Telegram: <https://t.me/+E4pYHGfNRPxiMWly>



Рекомендованная литература

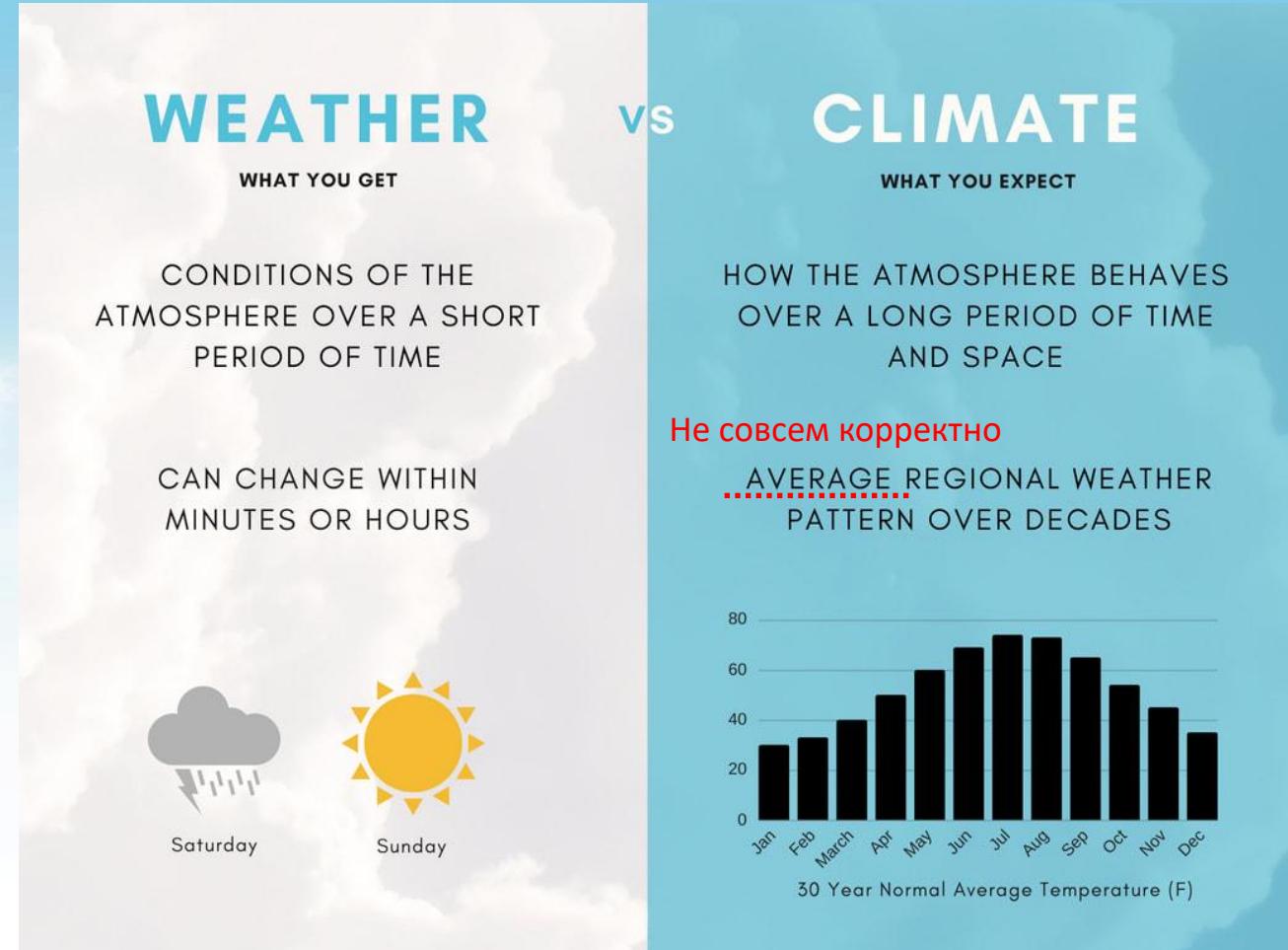




Немного повторения: погода, климат, атмосфера

Погода и климат

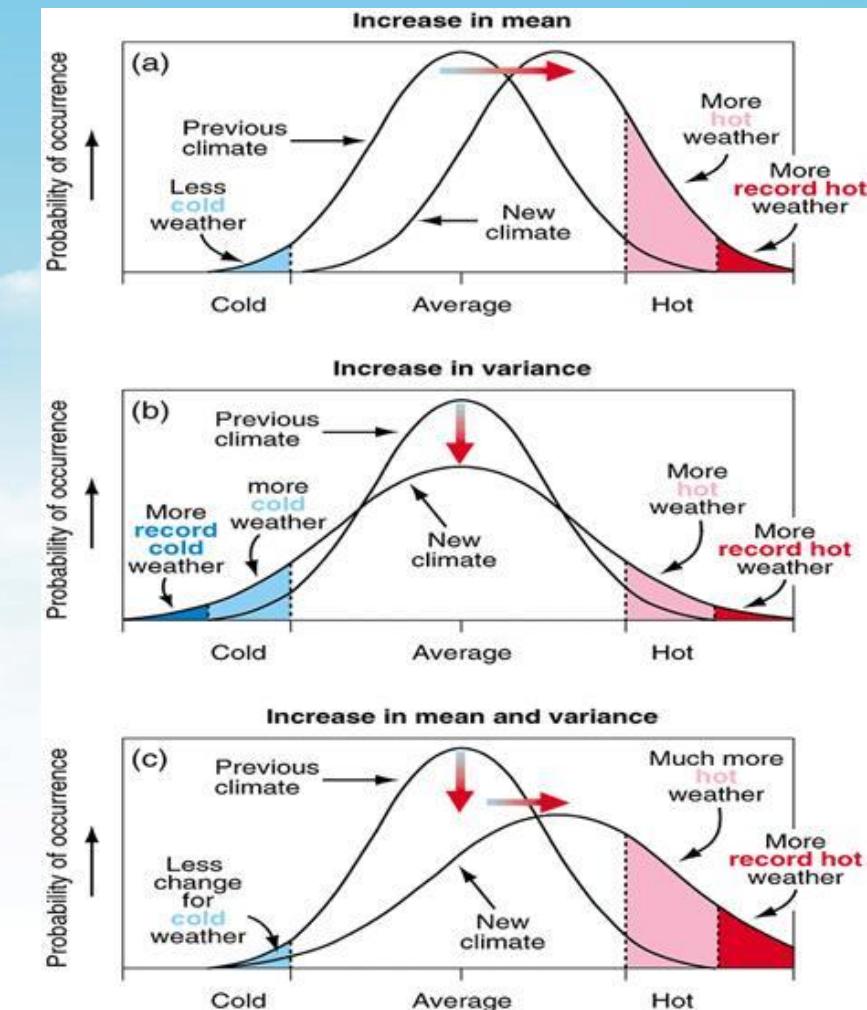
- «Климат – это то, что мы ожидаем, погода – то, что получаем» (Марк Твен)
- Метеорология – наука об атмосферных процессах
- Синоптика – раздел метеорологии, наука о прогнозе погоды



Погода и климат

Климат ≠ средние многолетние значения

Климат - статистический ансамбль состояний, принимаемый климатической системой за достаточно большой интервал времени



IPCC (2001) graph illustrating how a shift and/or widening of a probability distribution of temperatures affects the probability of extremes.

Климатообразующие факторы

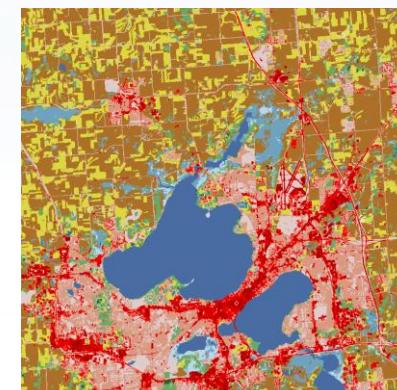
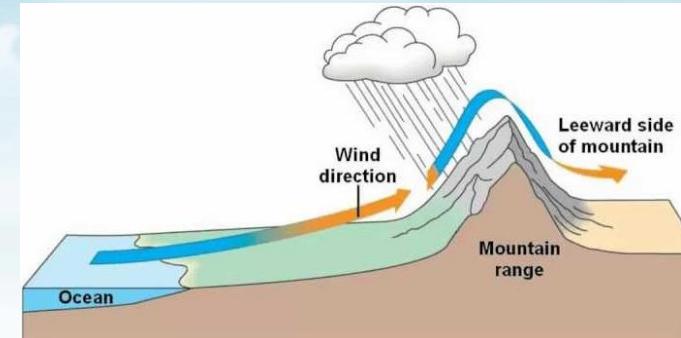
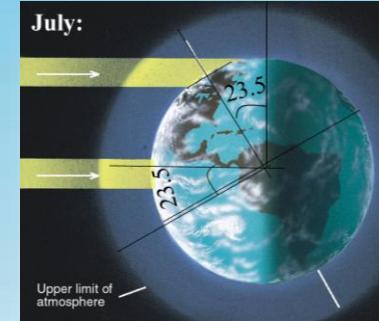
□ Внешние

- Светимость Солнца
 - Орбитальные параметры Земли
 - Геотермальное тепло Земли
- ...

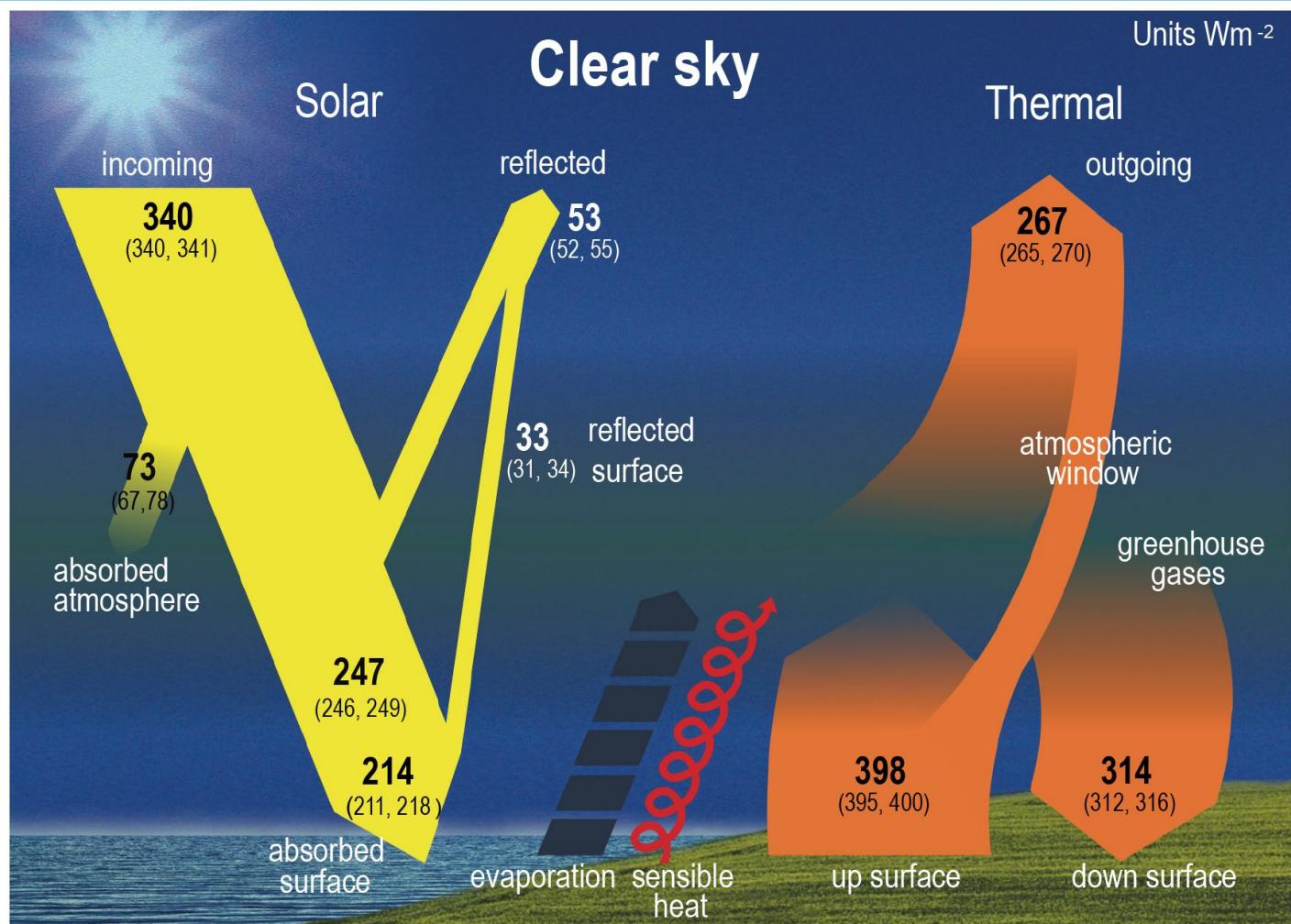
□ Внутренние

- Состав атмосферы
 - Распределение суши и океана
 - Рельеф
- ...

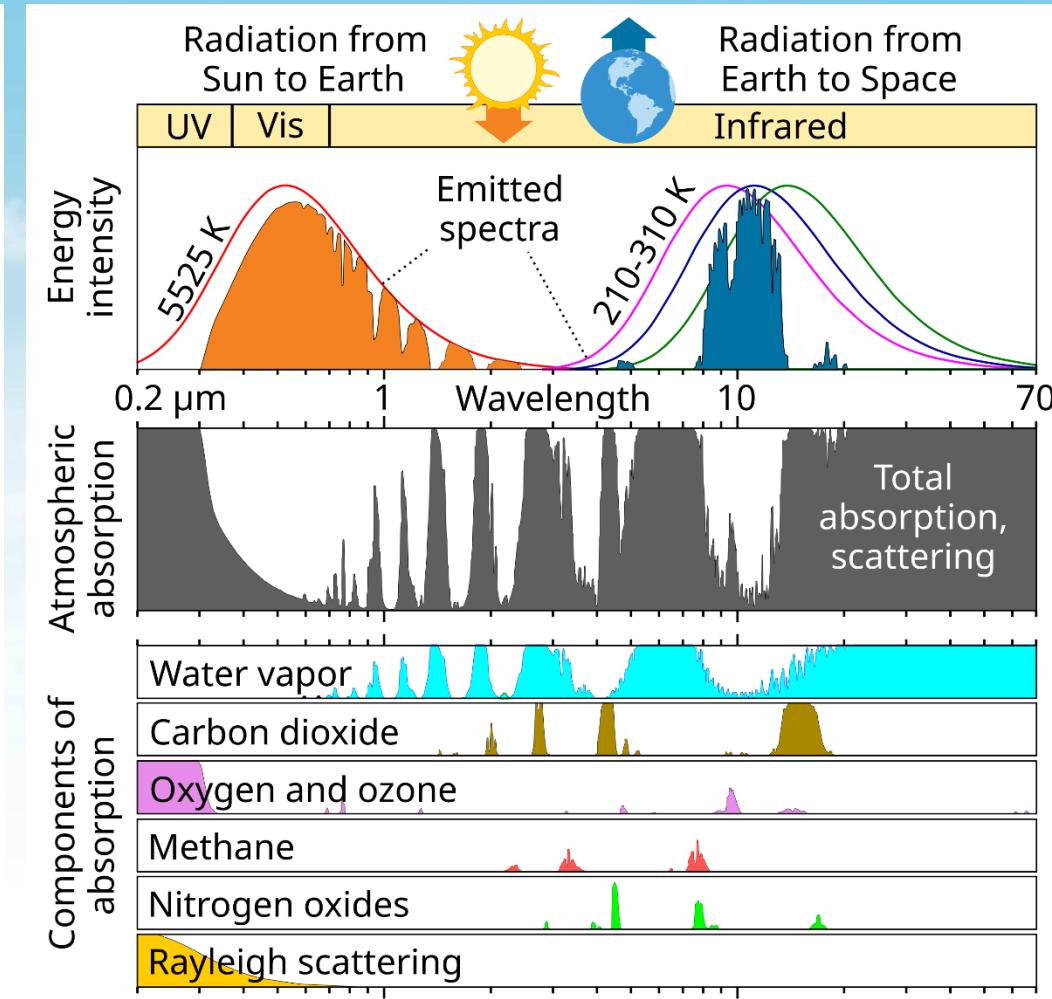
- Особенности подстилающей поверхности
- Антропогенная деятельность



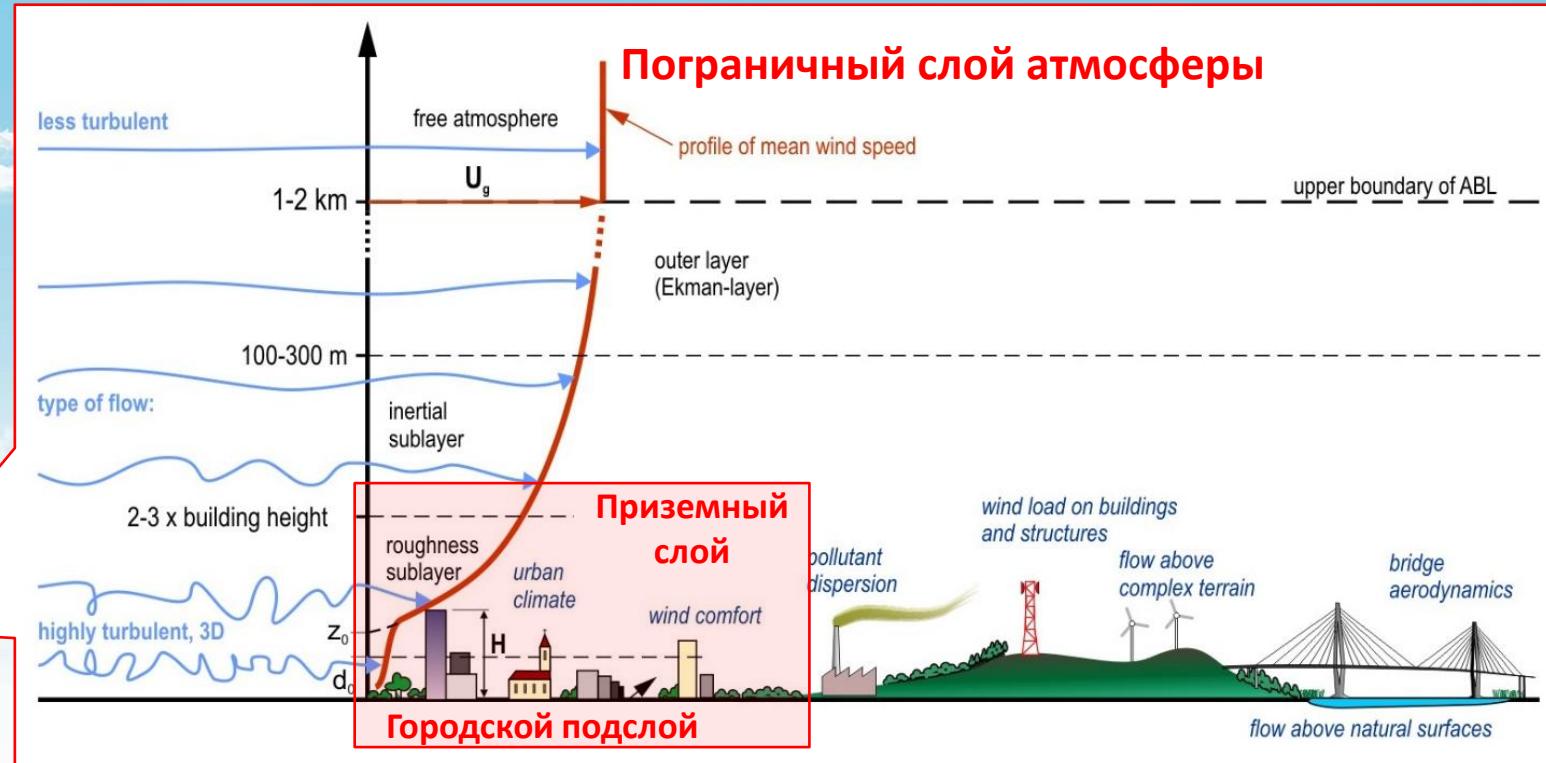
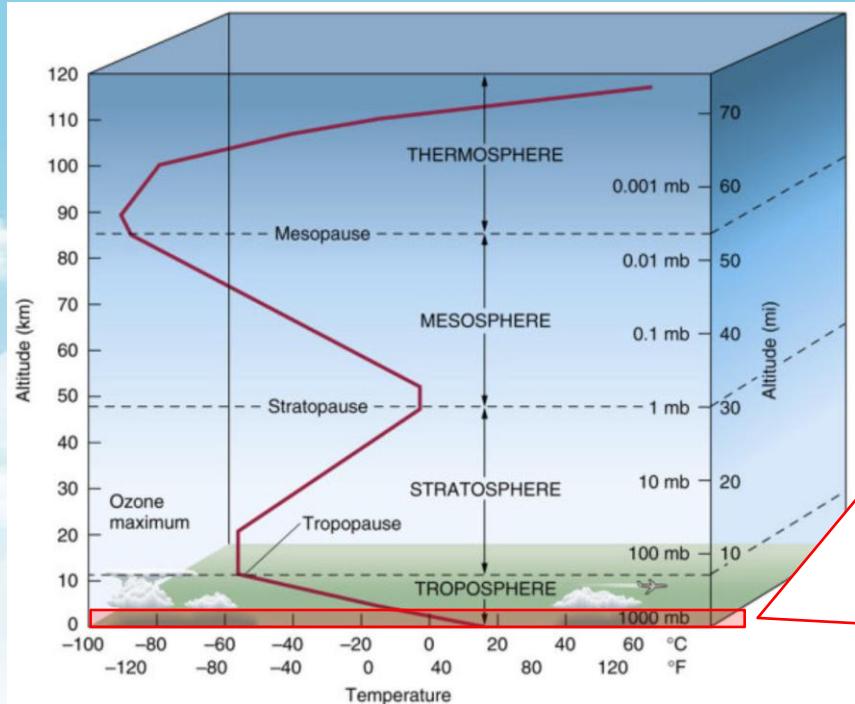
Радиация в атмосфере



Schematic representation of the global mean energy budget
of the Earth (IPCC, 2021)



Строение атмосферы



- **Атмосфера** – газовая оболочка Земли
- **Тропосфера** (8-12 км) – нижняя часть атмосферы, в которой температура понижается с высотой.
- **Пограничный слой атмосферы** (до 3 км) – нижний слой атмосферы, свойства которого в значительной степени определяются термическим и динамическим воздействием поверхности, с выраженным суточным ходом.
- **Приземный слой атмосферы** ($\approx 10\%$ от пограничного слоя, 10-100 м) – слой, непосредственно примыкающий к поверхности. Доминирующая роль взаимодействия с поверхностью. Слой постоянных потоков.

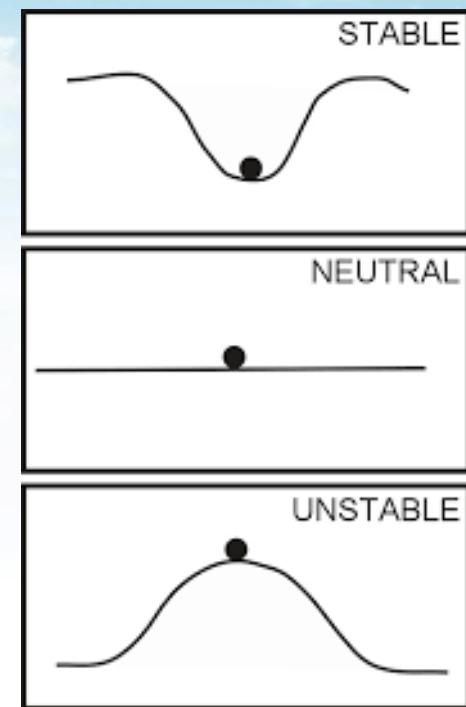
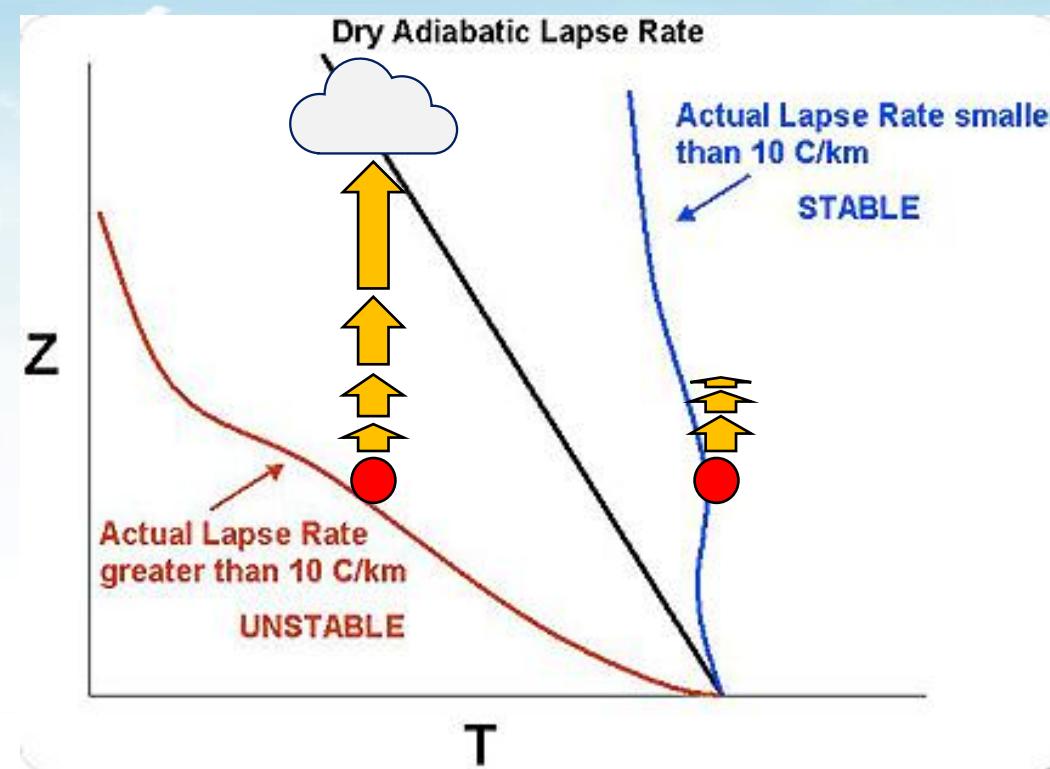
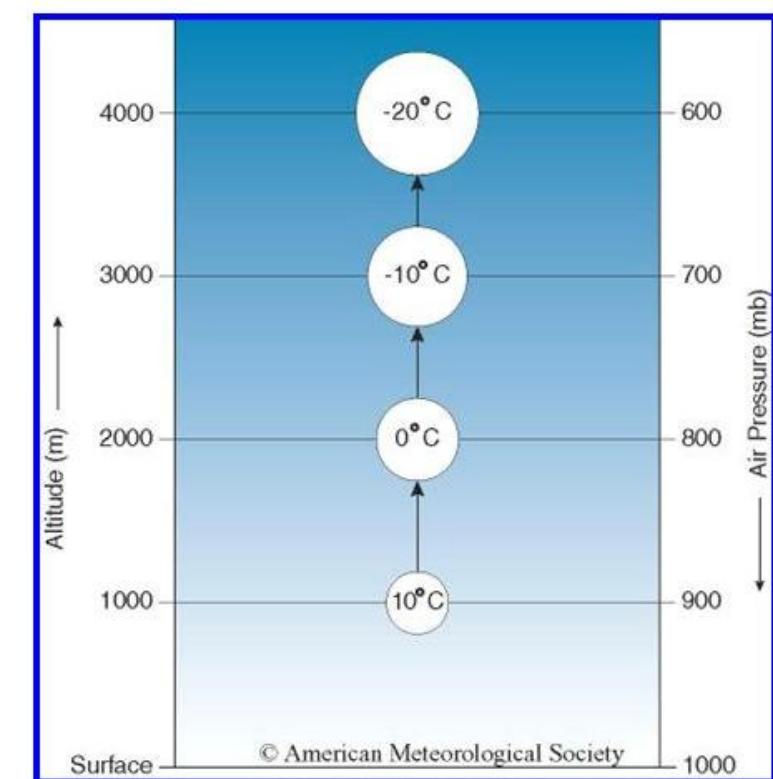
Стратификация атмосферы

Уравнение состояния атмосферы

$$p = \rho R T$$

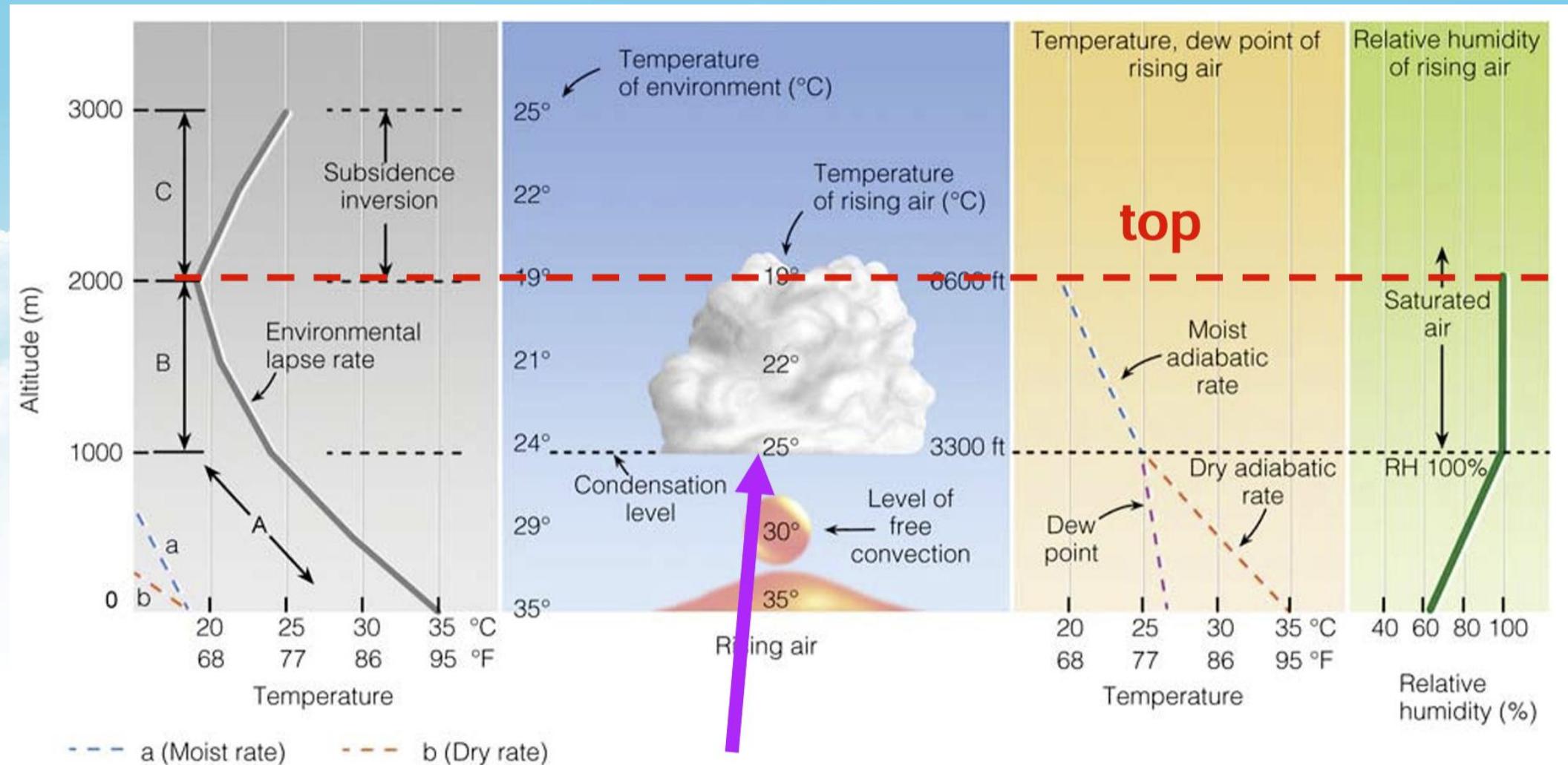
Сухоадиабатический градиент

$$\gamma_a = -\frac{dT_i}{dz} = \frac{g}{c_p} = \frac{0,98 \circ C}{100m} \approx 1 \circ C/100m$$



© 2002 Kendall/Hunt Publishing

Стратификация атмосферы

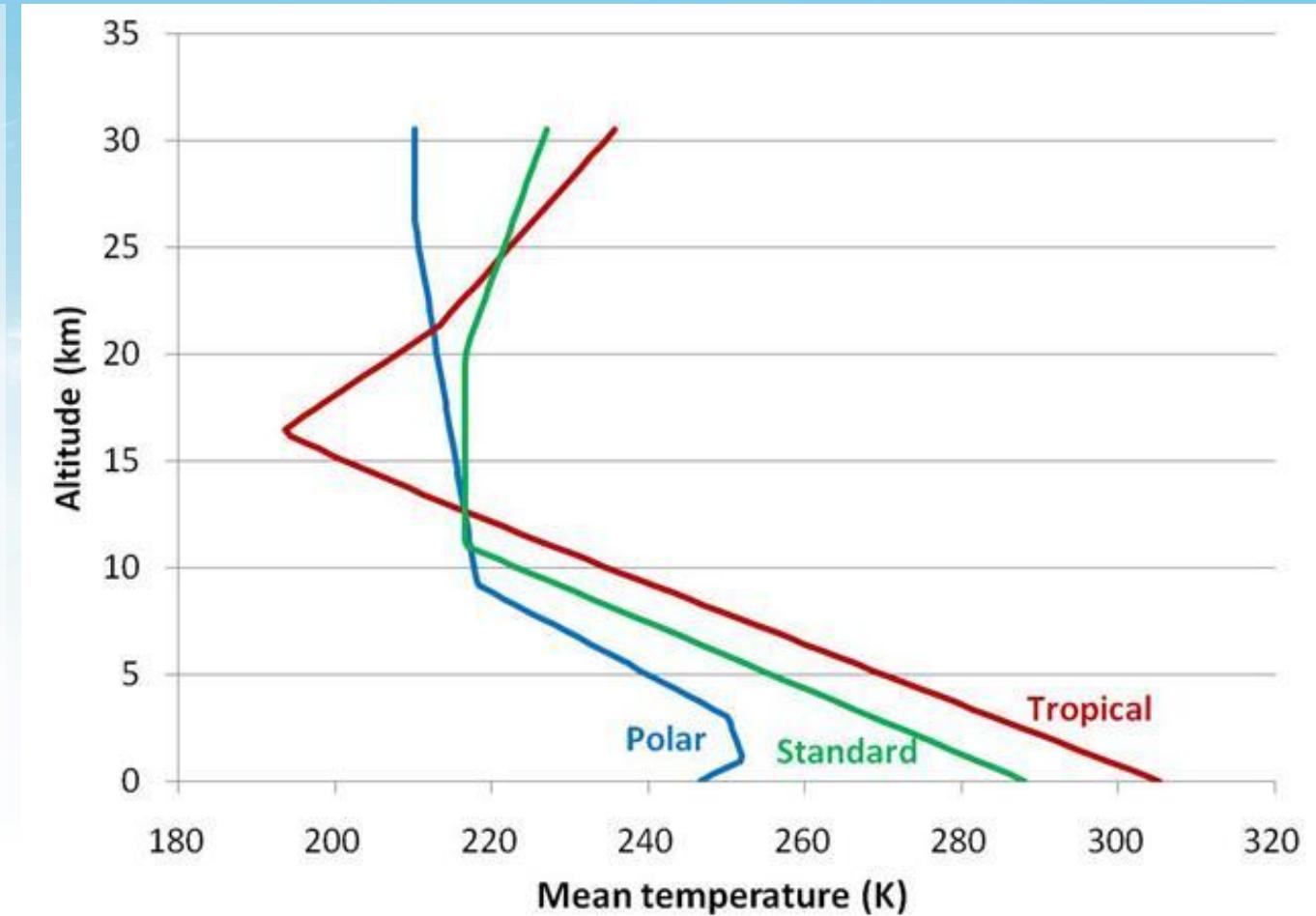


Стратификация атмосферы

- Вертикальный градиент температуры (environmental lapse rate) — изменение температуры воздуха с высотой, в тропосфере в среднем составляет 0.6°C на 100 м
- Инверсия температуры - повышение температуры воздуха с высотой в некотором слое атмосферы, вместо обычного её убывания.

Виды инверсий:

- Фронтальные
- Радиационные
- Инверсии оседания

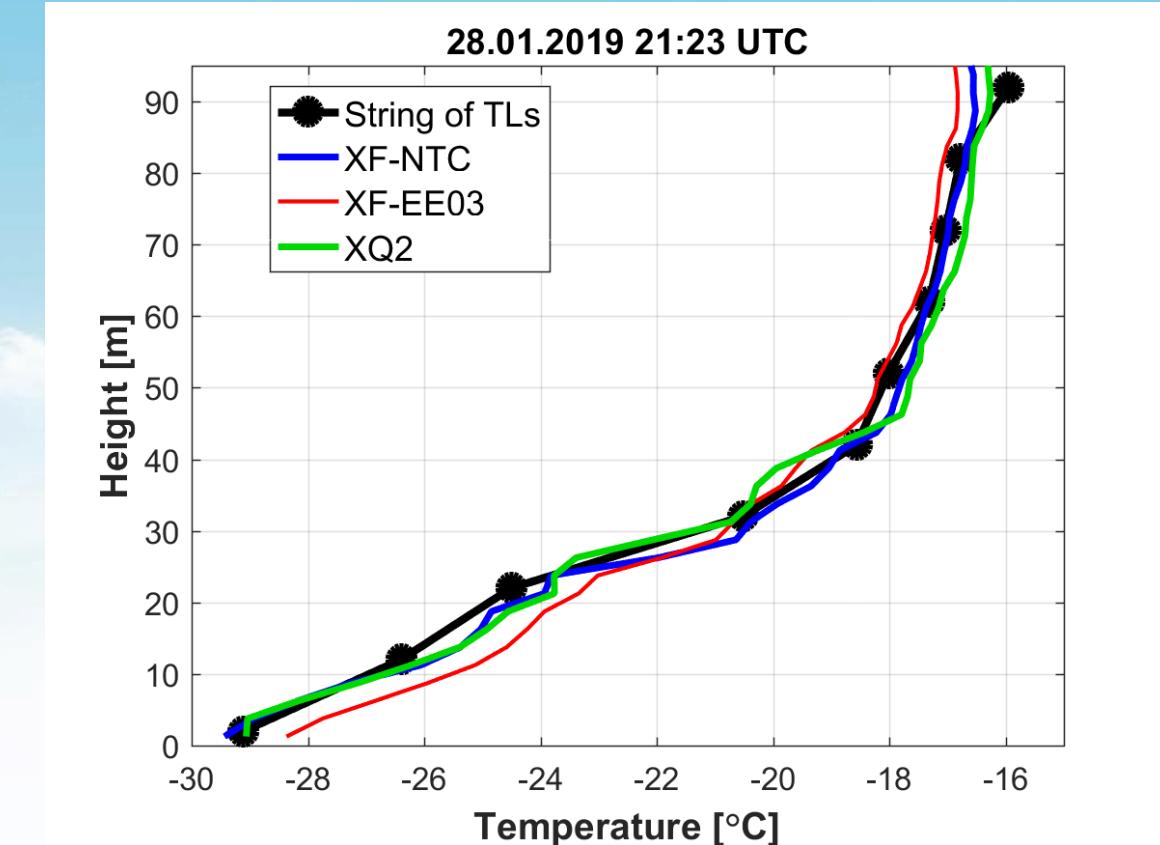


Стратификация атмосферы

- Вертикальный градиент температуры — изменение температуры воздуха с высотой, в тропосфере в среднем составляет 0.6°C на 100 м
- Инверсия температуры - повышение температуры воздуха с высотой в некотором слое атмосферы, вместо обычного её убывания.

Виды инверсий:

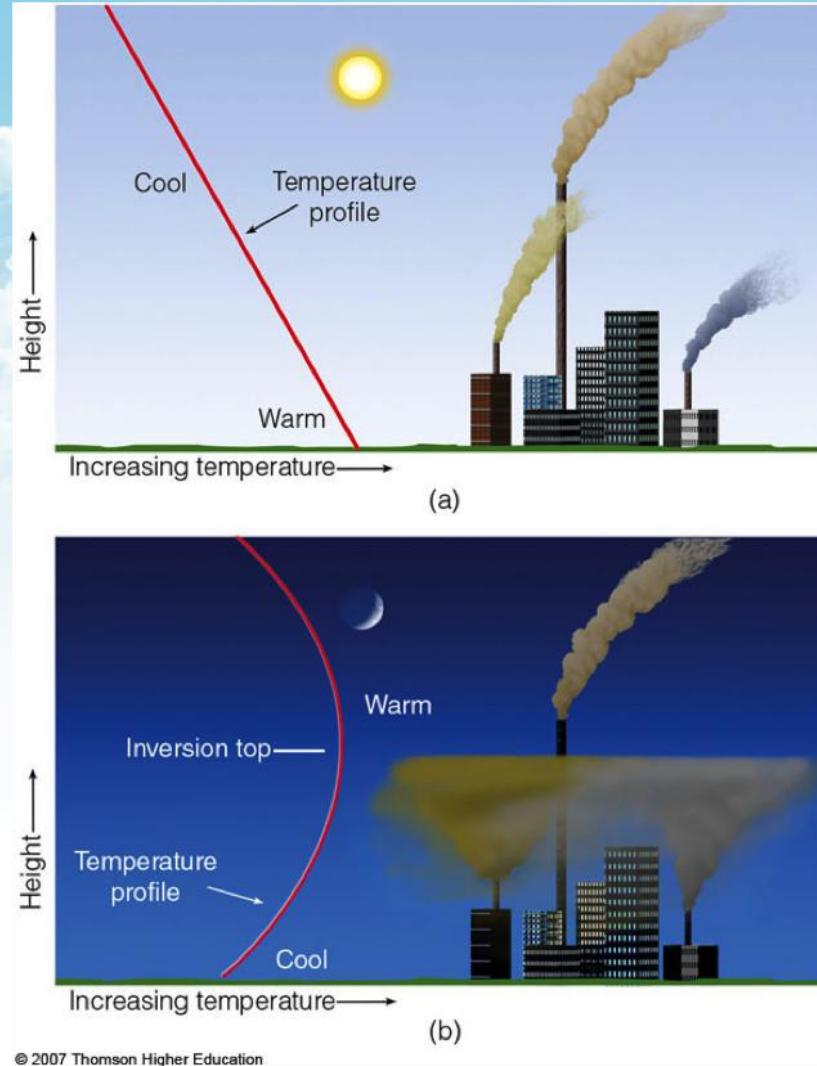
- Фронтальные
- Радиационные
- Инверсии оседания



Пример зимней инверсии в окрестностях г. Апатиты

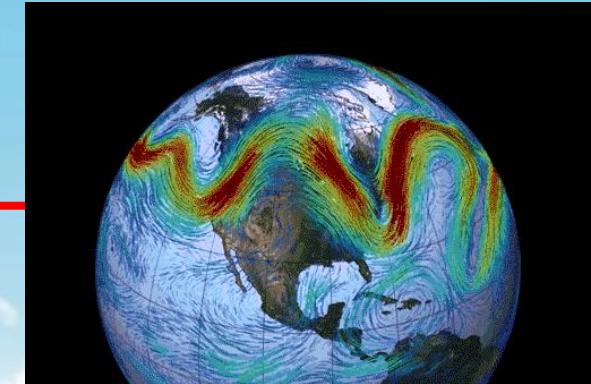
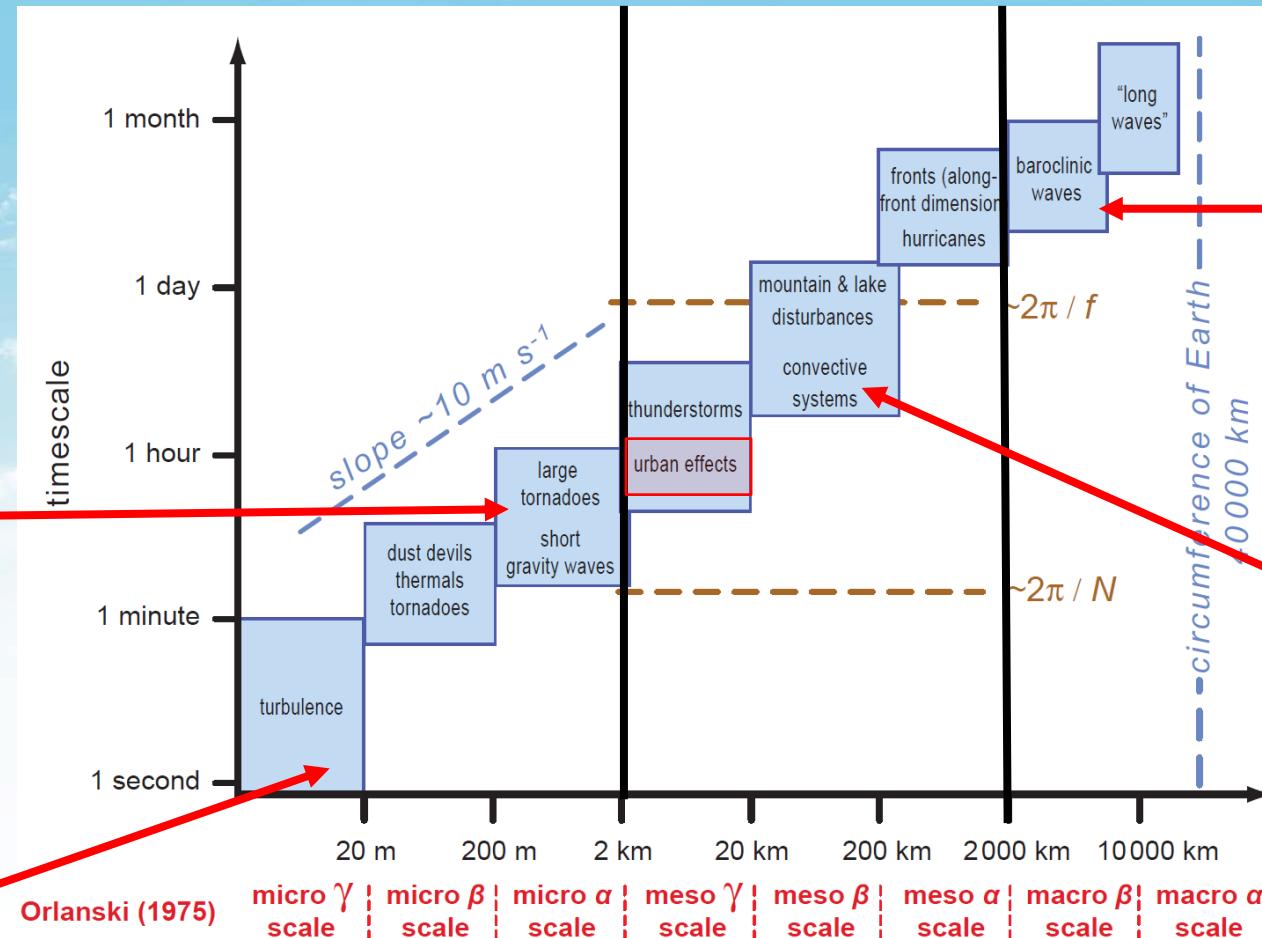
Стратификация атмосферы

Почему она особо актуально для городов?

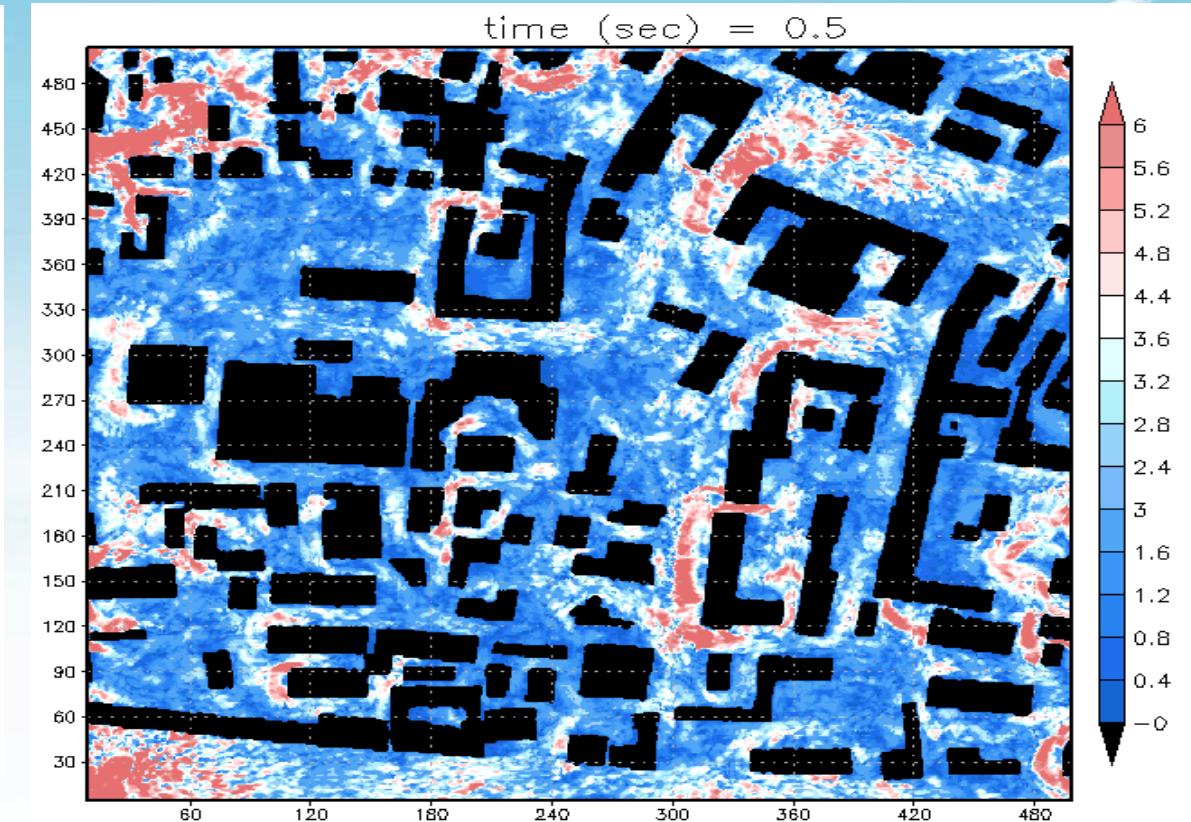
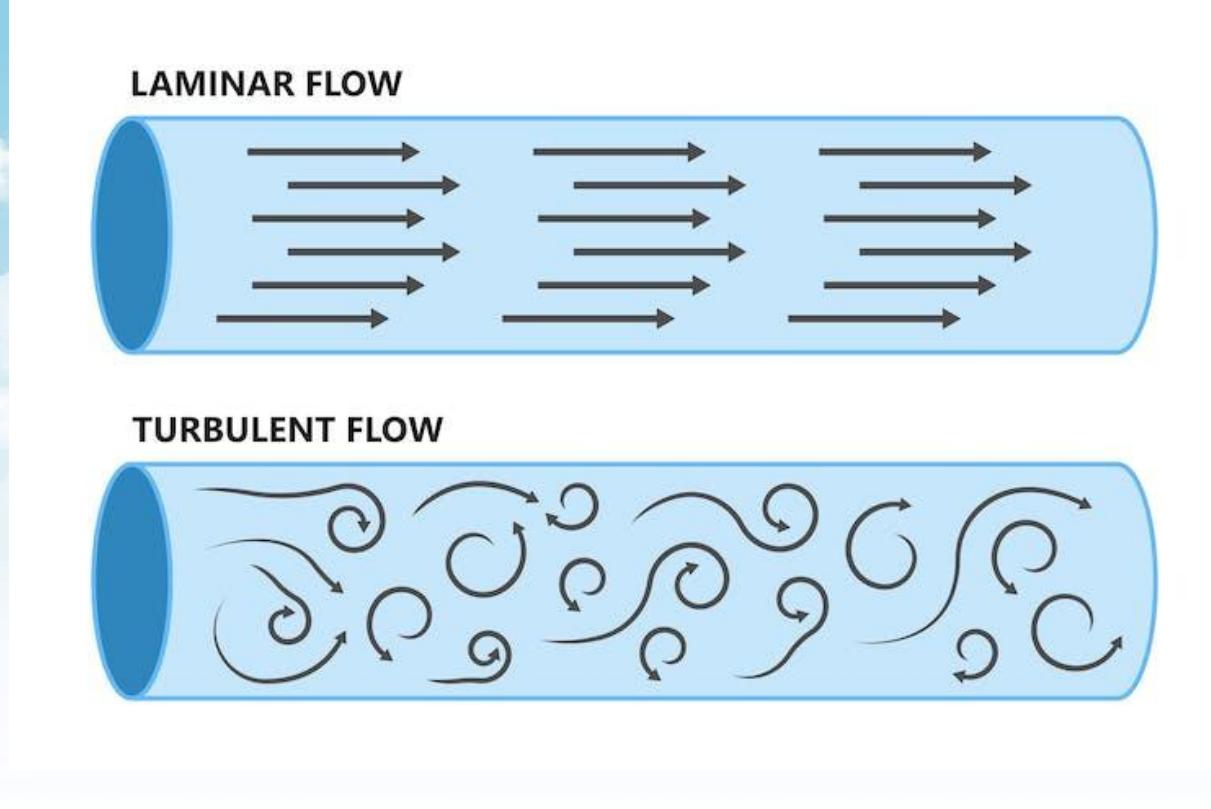


Температурные инверсии препятствуют вертикальным перемещениям воздуха и содействуют образованию застойных зон, в которых накапливаются загрязняющие вещества.

Масштабы атмосферных процессов

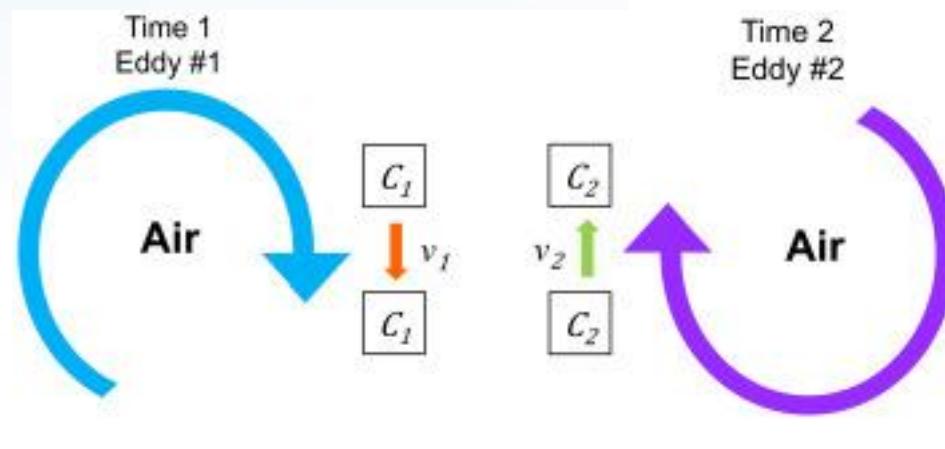
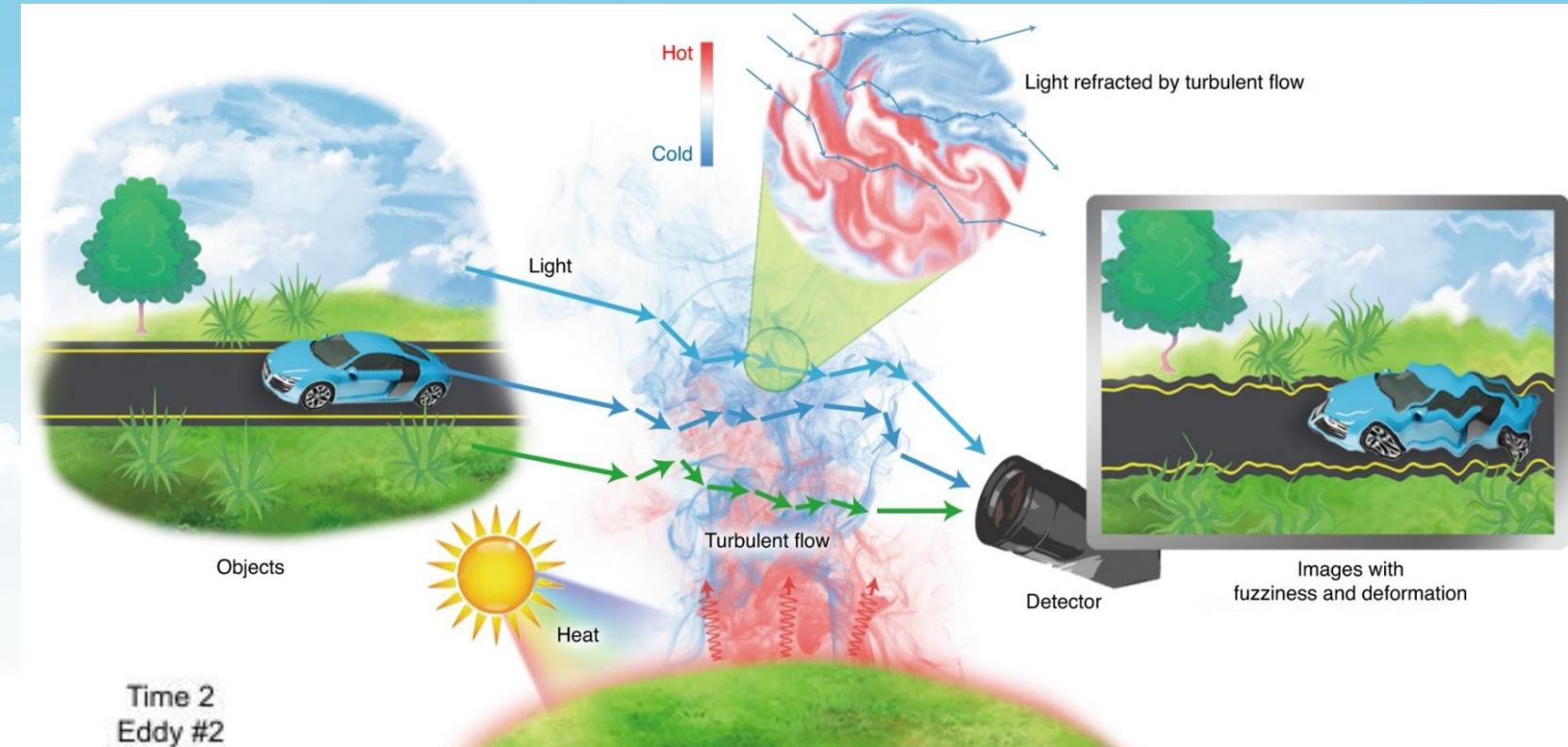
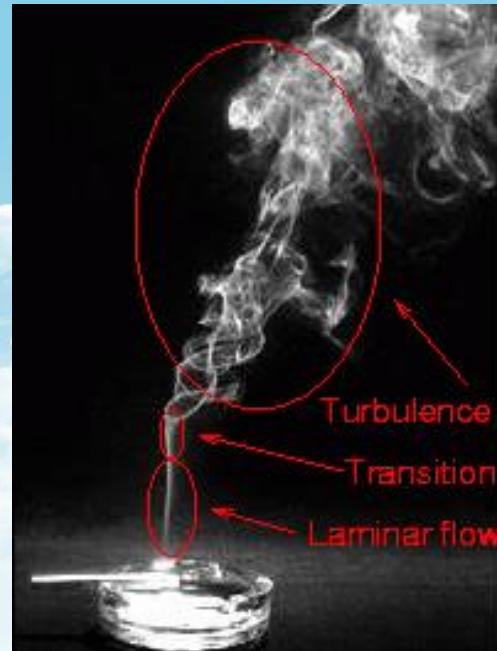


Микромасштабная турбулентность



Турбулентность в городской застройке (район м. Третьяковская)
по данным вихреразрешающего моделирования

Микромасштабная турбулентность



$$\tau = -\rho C_d U_h^2$$

$$[\frac{N}{m^2}]$$
 - поток импульса

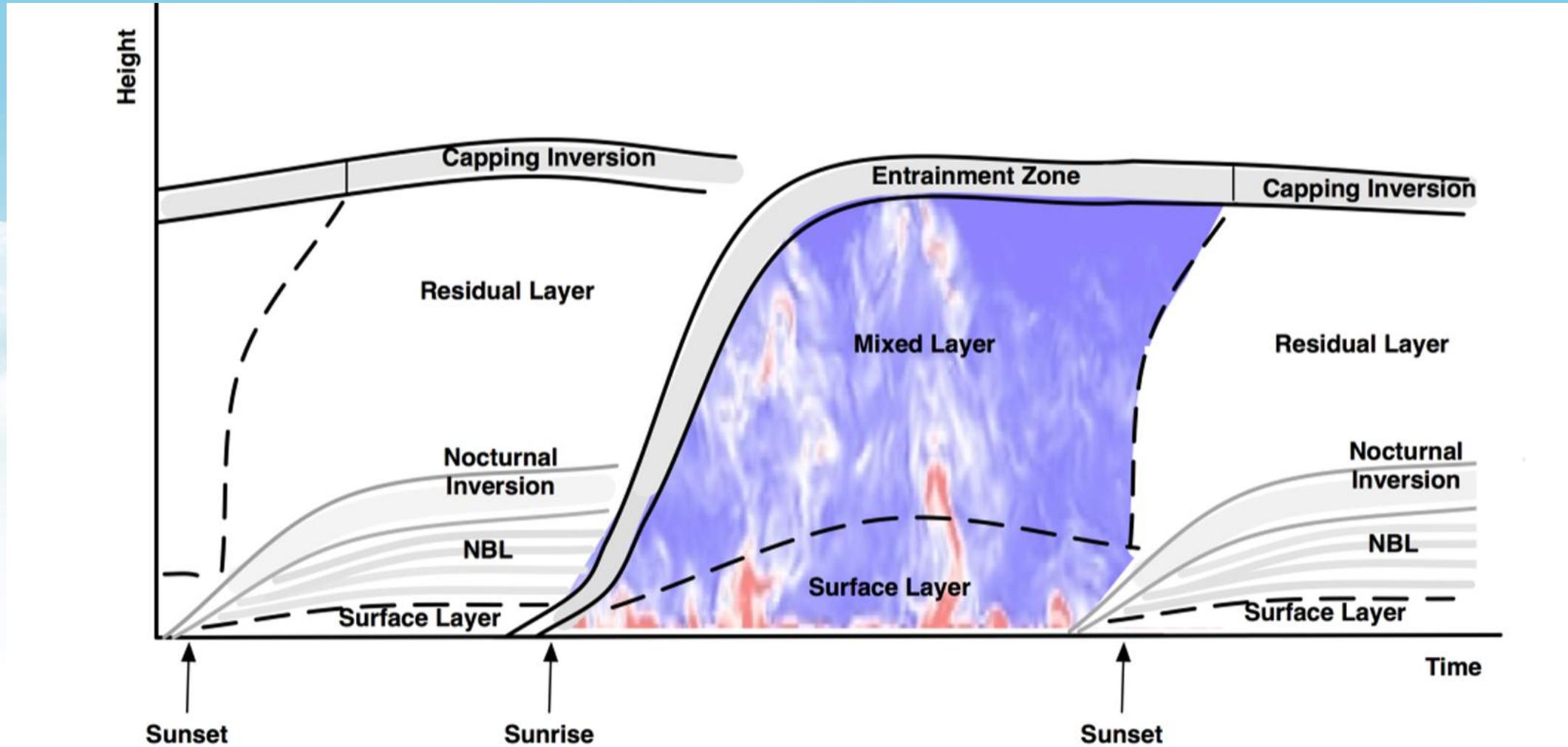
$$H = -C_p \rho C_h U_h (\Theta_h - \Theta_s)$$

$$[\frac{W}{m^2}]$$
 - поток явного тепла

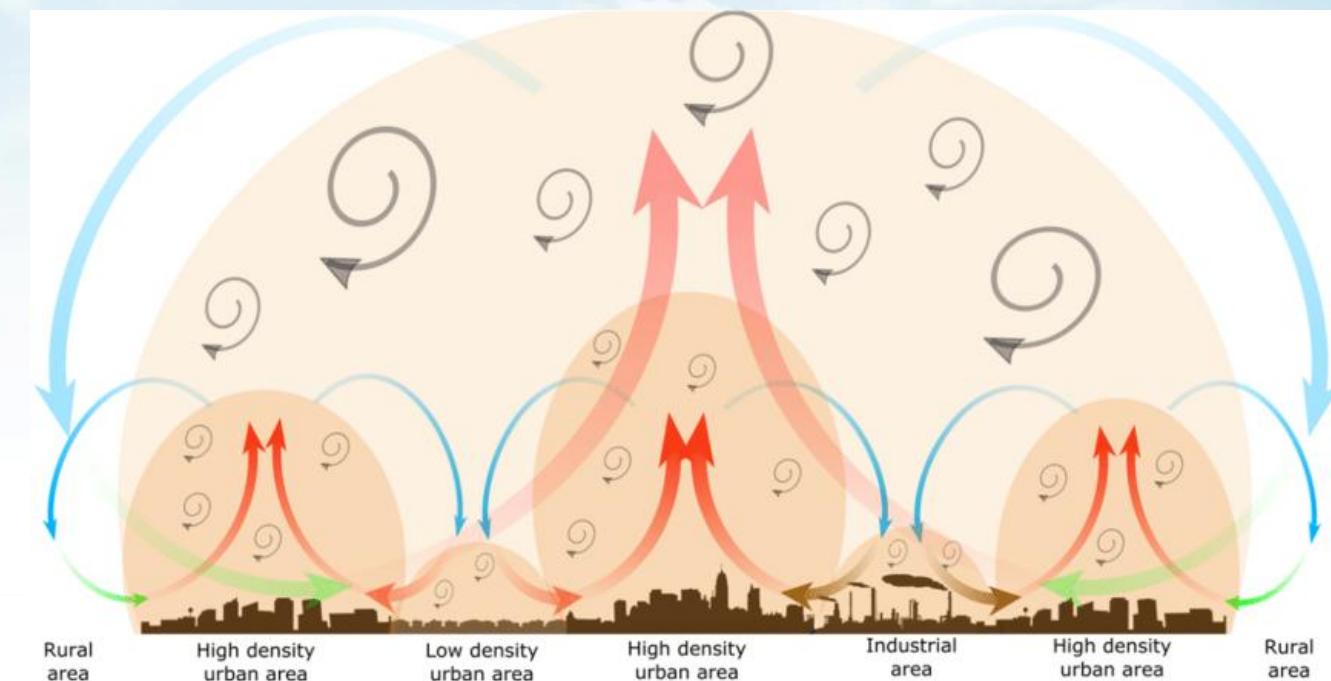
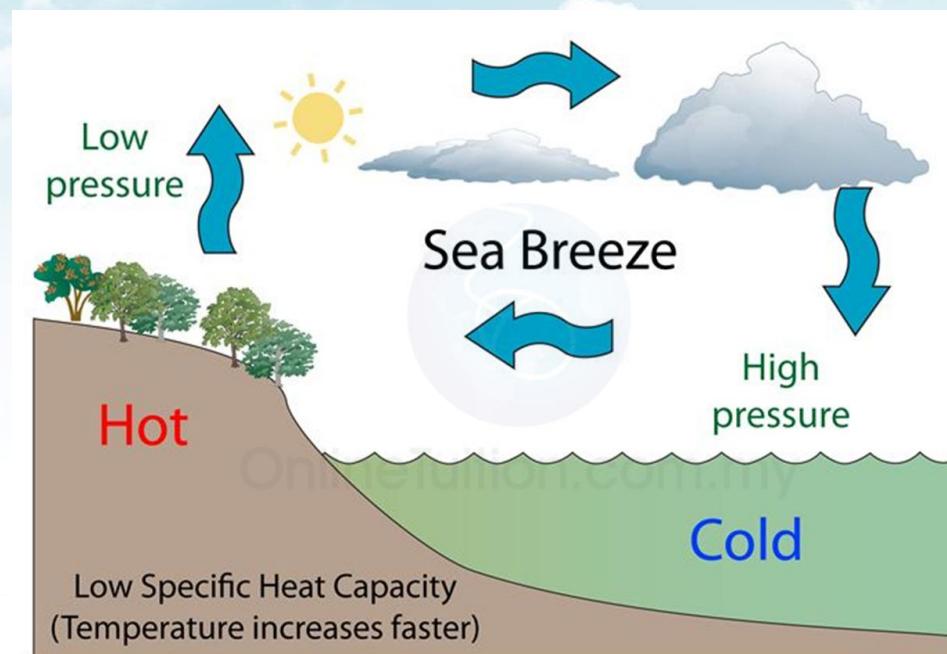
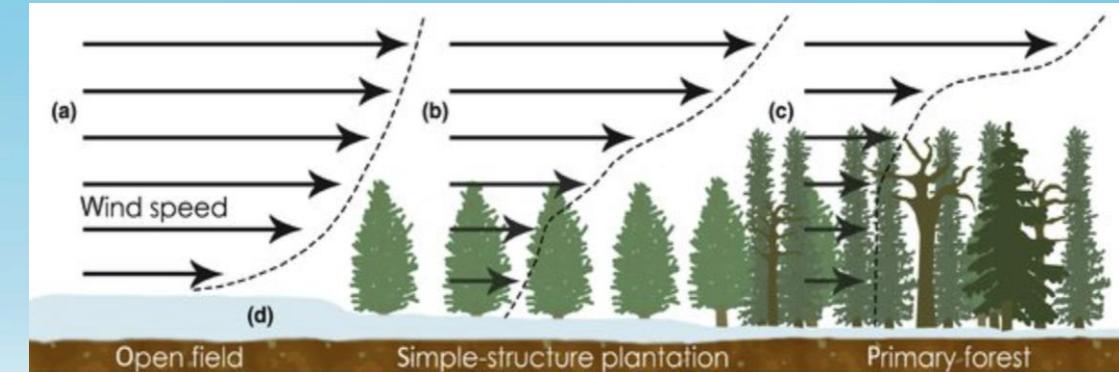
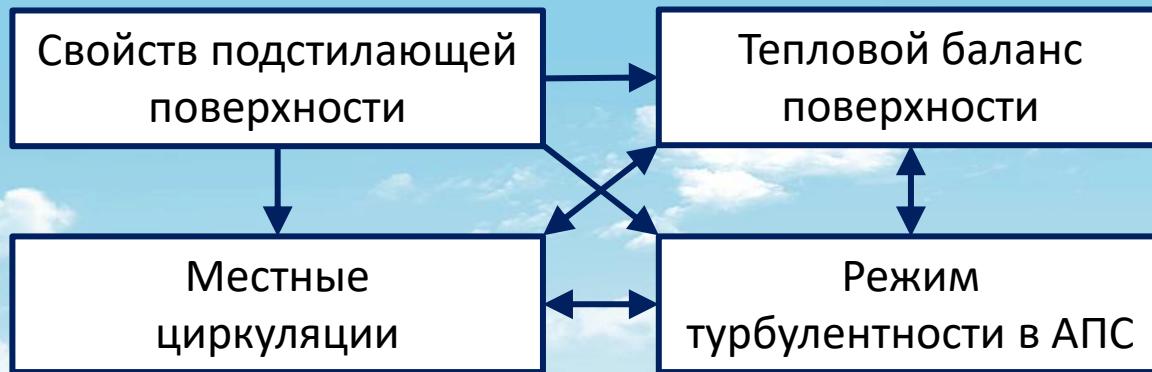
$$LE = -L \rho C_h U_h (Q_h - Q_s)$$

$$[\frac{W}{m^2}]$$
 - поток скрытого тепла

Турбулентность и погранслой атмосферы

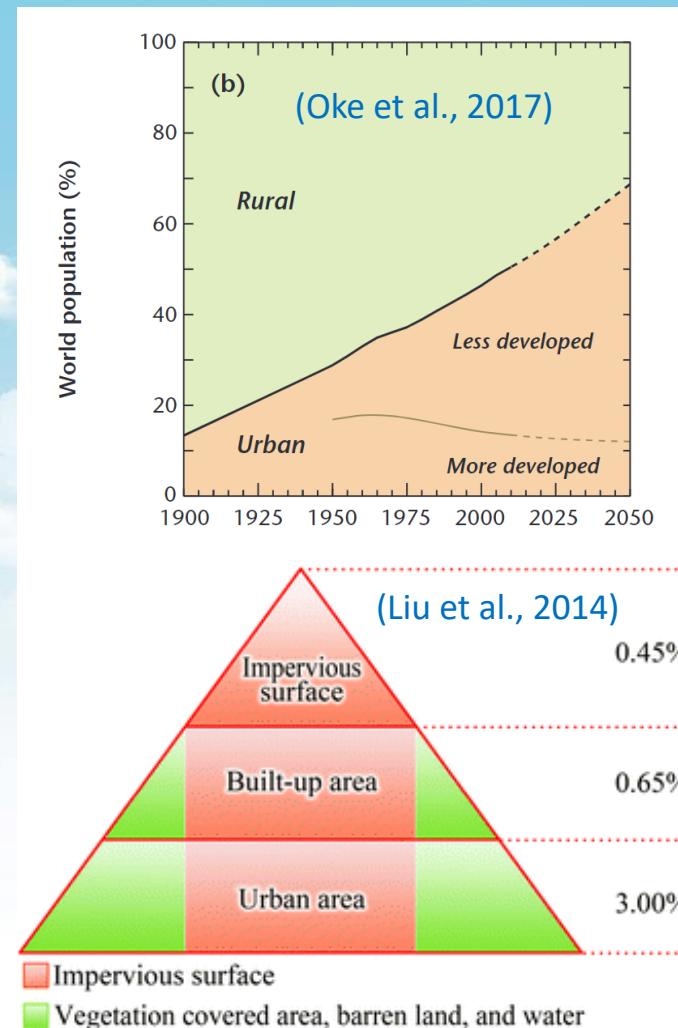


Местные климатические особенности



Введение в городскую метеорологию

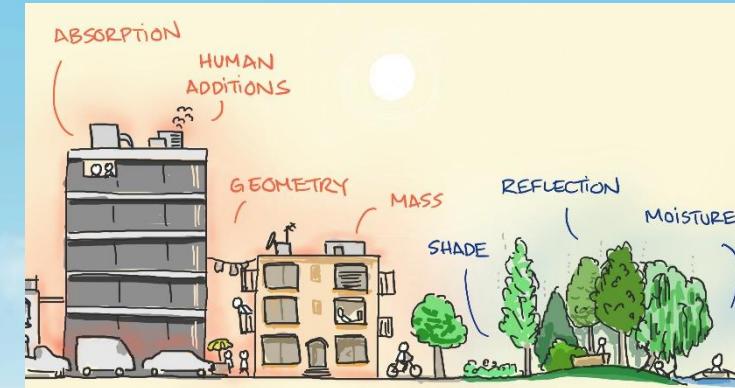
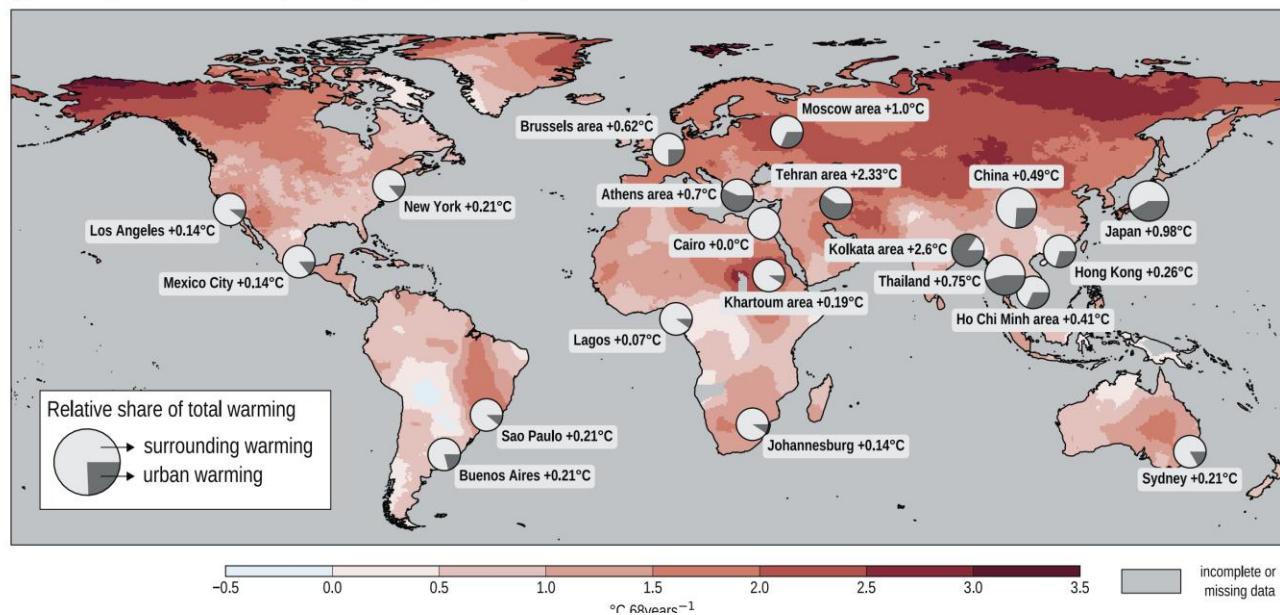
Актуальность



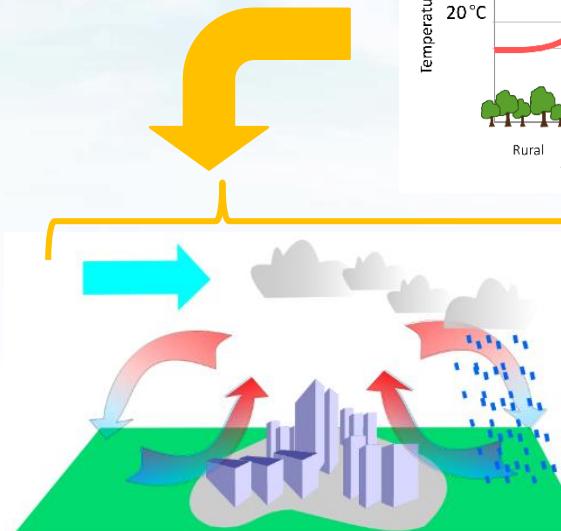
Актуальность

- Города особо уязвимы к погодно-климатическим экстремумам
- Города сами по себе влияют на атмосферные процессы и местный климат за счет изменения свойств подстилающей поверхности и антропогенных эмиссий
- Города являются «горячими точками» глобального потепления (IPCC AR6, 2021)

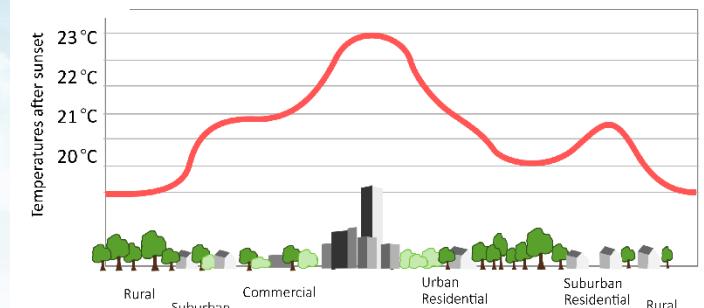
(a) Trend in global surface air temperature (CRU TS, 1950-2018)



Эффект городского острова тепла



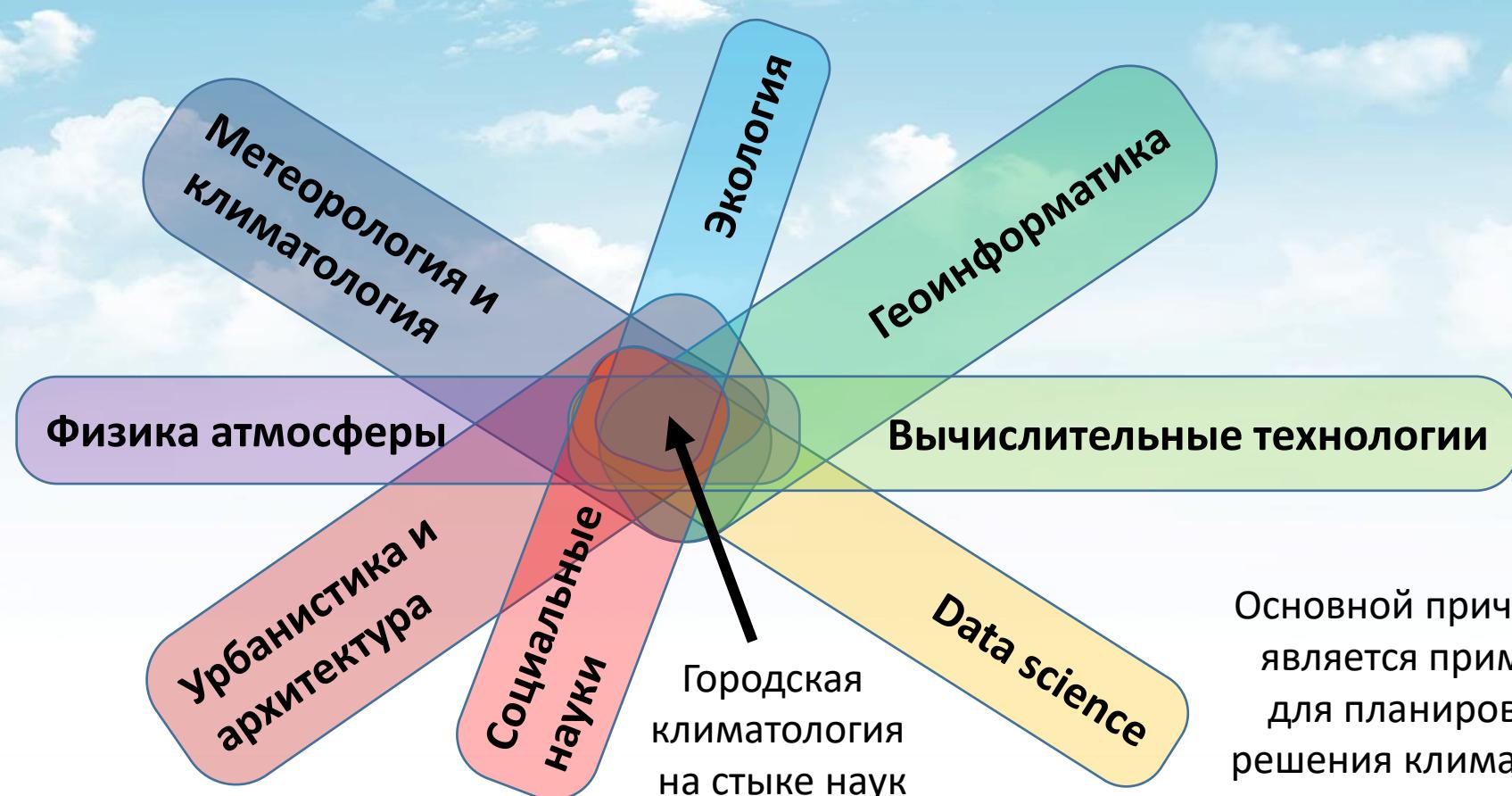
Влияние на облачность, осадки, опасные явления погоды



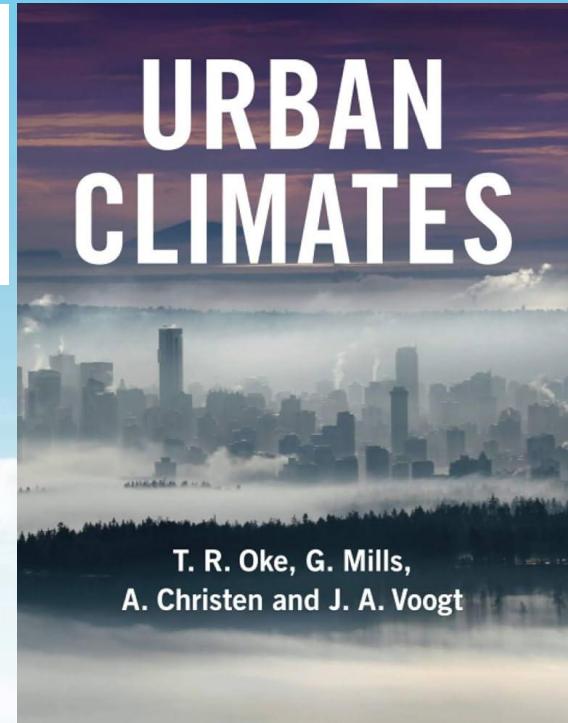
Влияние на термический комфорт населения

Особенности подстилающей поверхности

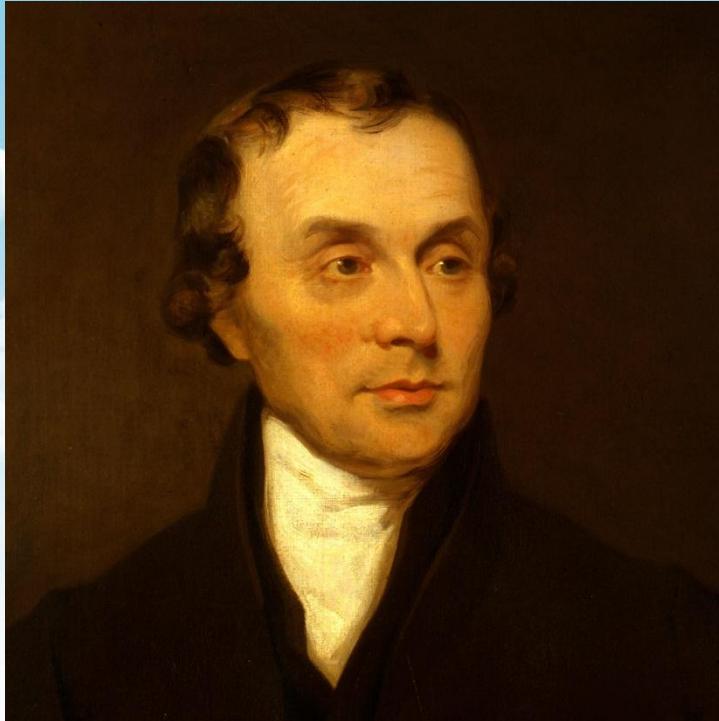
Изучение физических, химических и биологических процессов, определяющих состояние городской атмосферы и ее изменения, называется городской метеорологией, а изучение статистически наиболее вероятных состояний городской погоды — городской климатологией (Oke et al., 2017)



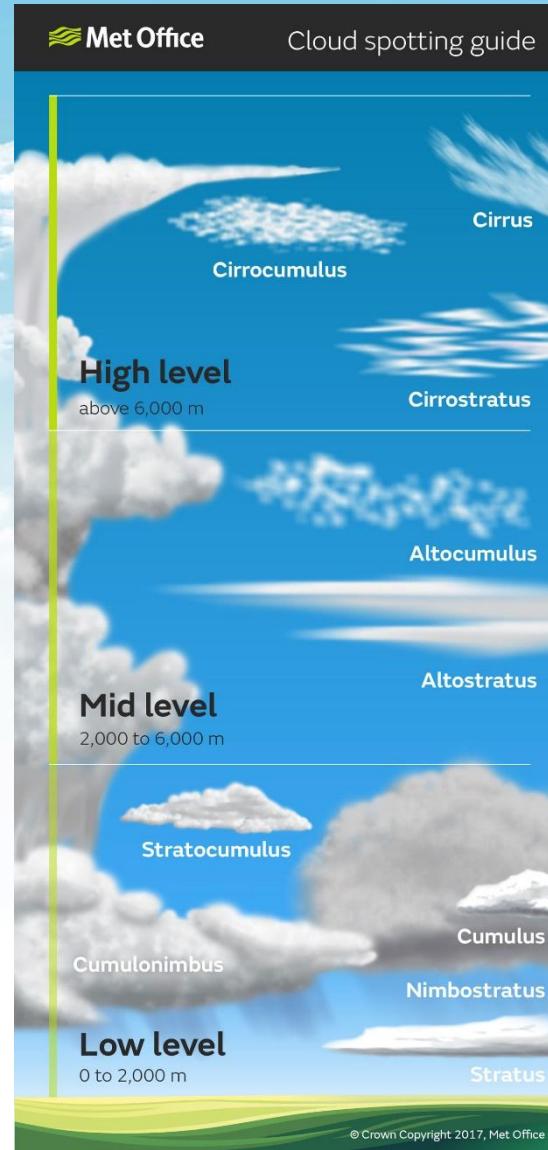
Основной причиной изучения городского климата является применение полученных знаний либо для планирования новых поселений, либо для решения климатических проблем в существующих поселениях (Oke et al., 2017)



Немного истории



Luke Howard (1772-1864)



The
CLIMATE OF LONDON
DEDUCED FROM
Meteorological Observations,
MADE IN THE METROPOLIS,
AND AT
VARIOUS PLACES AROUND IT.

BY LUKE HOWARD, GENT.

CITIZEN OF LONDON; HONORARY CITIZEN OF MAGDEBURG; FELLOW
OF THE ROYAL SOCIETY, AND HONORARY ASSOCIATE OF THE
SOCIETIES OF ARTS OF HAMBURGH AND LEIPSIC.

IN THREE VOLUMES.

A SECOND, MUCH ENLARGED AND IMPROVED EDITION
IN WHICH THE
OBSERVATIONS ARE CONTINUED TO THE YEAR MDCCCLXXXV
ILLUSTRATED BY ENGRAVINGS ON WOOD AND COPPER.

Sic vos non vobis fertis oratra boves!

VOL. I.

Containing an Introduction, with the necessary Descriptions of Instruments, and Definitions of
terms used;-A Series of Dissertations on the several parts of the Subject;- A Summary of the
Phenomena of the Climate;- General Tables of Results, and a copious Index.

LONDON:
HARVEY AND DARTON, GRACECHURCH-STREET;
J. AND A. ARCH, CORNHILL; LONGMAN AND CO. PATERNOSTER ROW;
HATCHARD AND SON, PICCADILLY; S. HIGHLEY, FLEET-STREET;
R. HUNTER, ST. PAUL'S CHURCH-YARD.

1833.

Средние значения температуры каждого месяца по наблюдениям, продолжавшимся с 1807 по 1816 г.			
Месяц	сельская местность	Лондон	Лондон в градусах на
Январь	34,16	36,20	2,04
Февраль	39,78	41,47	1,69
Март	41,51	42,77	1,26
Апрель	46,89	47,69	0,80
Май	55,79	56,28	0,49
Июнь	58,66	59,91	1,25
Июль	62,40	63,41	1,01
Август	61,35	62,61	1,26
Сентябрь	56,22	58,45	2,13
Октябрь	50,24	52,23	1,99
Ноябрь	40,93	43,08	2,15
Декабрь	37,66	39,40	1,74

Немного истории

Появление метеорологической сети, эпизодические пионерские исследования (до 1930х гг.)

Систематические исследования описательные местного климата, т.ч. городского (1930-1965)

Обобщение работ по городской климатологии, исследование физических механизмов, масштабные измерительные эксперименты, появление численных моделей (1965-2000)

Современный этап (начиная с 2000х)
Мульти尺度ное моделирование, дистанционное зондирование, учет городов в моделях погоды и климата, прикладные исследования и сервисы

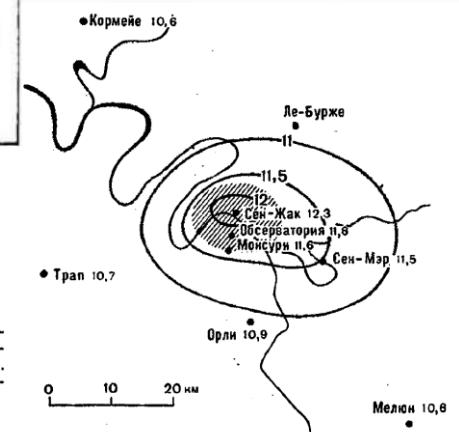
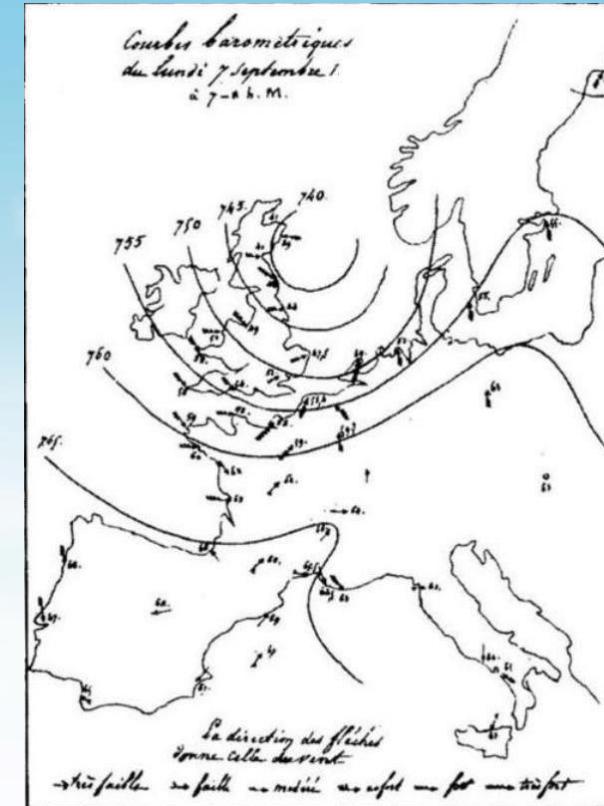


Рис. 5.5. Средние годовые изотермы ($^{\circ}\text{C}$) в Париже и его окрестностях. По Деввиллеру (Deftwiler, 1970б).

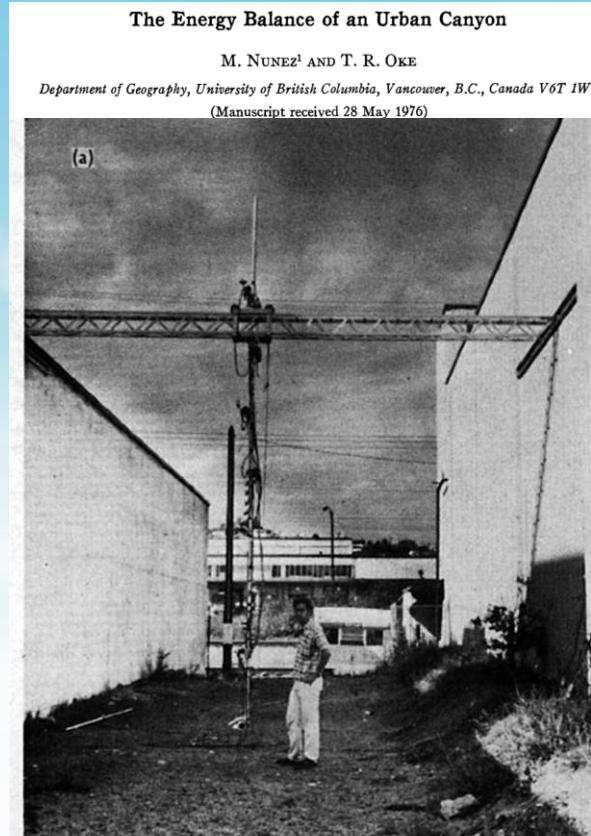
Немного истории

Появление метеорологической сети, эпизодические пионерские исследования (до 1930х гг.)

Систематические исследования описательные местного климата, т.ч. городского (1930-1965)

Обобщение работ по городской климатологии, исследование физических механизмов, масштабные измерительные эксперименты, появление численных моделей (1965-2000)

Современный этап (начиная с 2000х)
Мульти尺度ное моделирование, дистанционное зондирование, учет городов в моделях погоды и климата, прикладные исследования и сервисы



The Energy Balance of an Urban Canyon

M. NUNEZ¹ AND T. R. OKE

Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada V6T 1W5
(Manuscript received 28 May 1976)

(a)

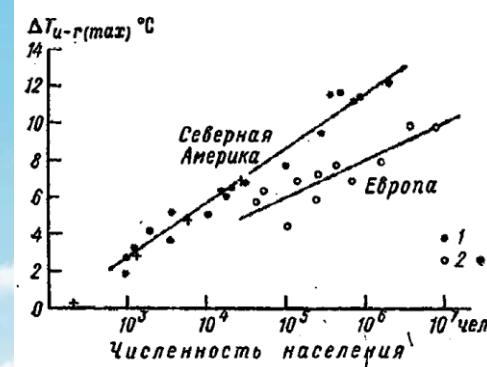
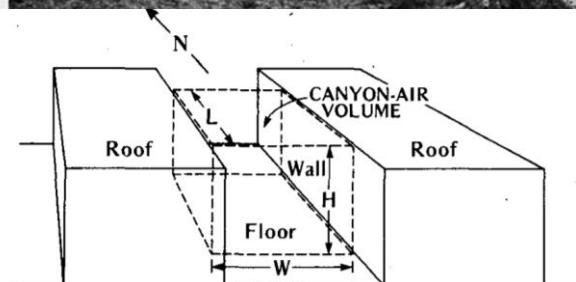


Рис. 5.11. Зависимость интенсивности максимума городского острова тепла ΔT_{u-r} ($^{\circ}\text{C}$) от численности населения. По Оке (Oke, 1979).

1 — города США, 2 — города Европы. Крестиками ограничивается максимальная интенсивность островов тепла в Колумбии (Мэриленд) на начальном и конечном этапах строительства (см. рис. 5.7 и 5.8).



Немного истории

Появление метеорологической сети, эпизодические пионерские исследования (до 1930х гг.)



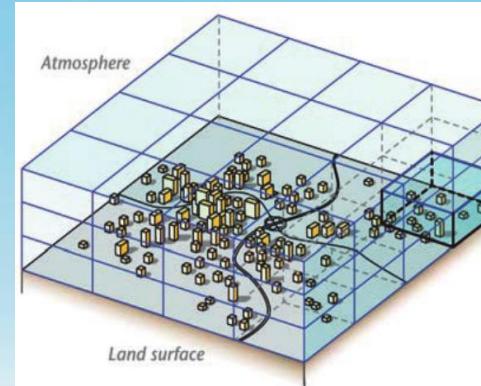
Систематические исследования описательные местного климата, т.ч. городского (1930-1965)



Обобщение работ по городской климатологии, исследование физических механизмов, масштабные измерительные эксперименты, появление численных моделей (1965-2000)

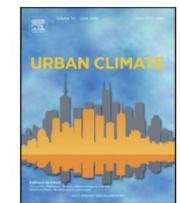


Современный этап (начиная с 2000х)
Мульти尺度ное моделирование, дистанционное зондирование, учет городов в моделях погоды и климата, прикладные исследования и сервисы



Contents lists available at ScienceDirect
Urban Climate

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/uclim>



From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services

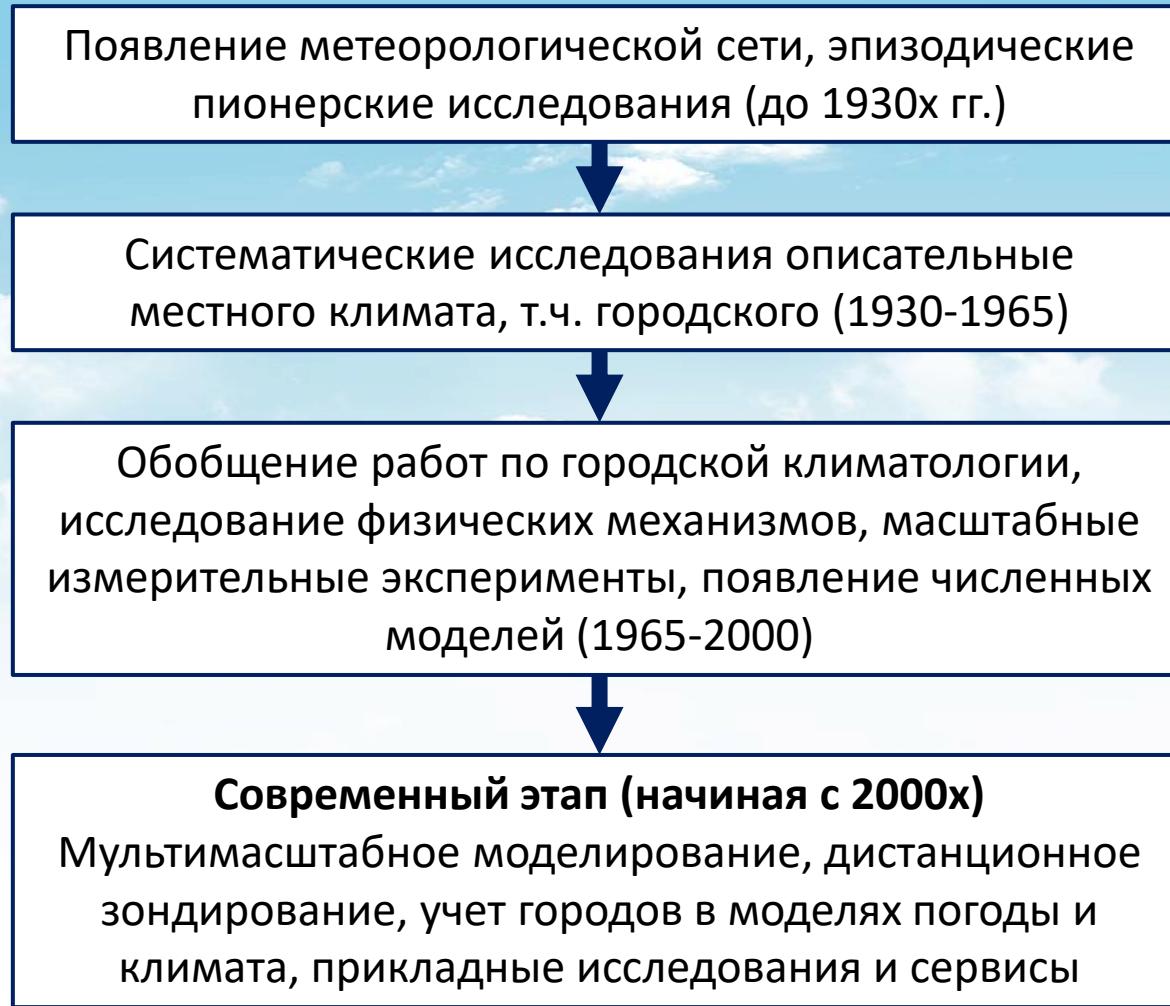
A. Baklanov ^{a,*}, C.S.B. Grimmond ^{b,*}, D. Carlson ^a, D. Terblanche ^a, X. Tang ^a, V. Bouchet ^c, B. Lee ^a, G. Langendijk ^a, R.K. Kolli ^a, A. Hovsepyan ^a

^a World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland

^b University of Reading, Reading, UK

^c Environment and Climate Change Canada (ECCC), Montreal, Canada

Немного истории



Новый этап начиная с 2020-х?
IOT, Data Science, AI

Немного истории

С. А. САПОЖНИКОВА
доктор географических наук

551.56
€ 19

ПРОВЕРЕННО
1951 г.

МИКРОКЛИМАТ и МЕСТНЫЙ КЛИМАТ

Допущено Министерством высшего образования СССР
в качестве учебного пособия для гидрометеорологических
институтов и университетов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД • 1950

В среднем в городе теплее по сравнению с окрестностями более чем на $0,5^{\circ}$.

Выше в городе и абсолютные минимумы. Так, в Москве в среднем за 1910—1926 гг. средний из абсолютных годовых минимумов составлял $-28,0^{\circ}$, а в Петровско-Разумовском $-31,2^{\circ}$. В отдельные годы различие в абсолютных минимумах достигало 6° . В Ленинграде, на Васильевском острове (Главная физическая обсерватория), 25/XII 1892 г. температура спустилась до -34° , а в Лесном до -41° . Несколько меньшие различия минимальных температур приводят А. А. Каминский для Харькова, Воронежа и Пензы, что объясняется меньшей их застройкой. Отмечено, что повреждения растений от заморозков в городе происходит гораздо реже, чем за его пределами.

Совсем с других позиций ведется изучение климата крупных городов в капиталистических странах. Известны исследования климатических особенностей таких крупных городов, как Лондон, Нью-Йорк, Париж, Токио, Рим, Мельбурн, Монреаль и другие. Но результаты достижений микроклиматических исследований применяются не в рабочих кварталах, где сосредоточена основная масса городского населения, а в буржуазных. В этих кварталах проводятся работы по озеленению, создаются парки и скверы, бульвары и газоны, выполняется разреженная застройка с использованием вертикального озеленения и водоемов. В рабочих кварталах застройка ведется с учетом только одного фактора — максимального использования территории для размещения максимального количества людей. Вот почему здесь узкие улицы, полностью отсутствует зелень, а дворы представляют собой глубокие темные колодцы, куда совсем не проникают солнечные лучи.

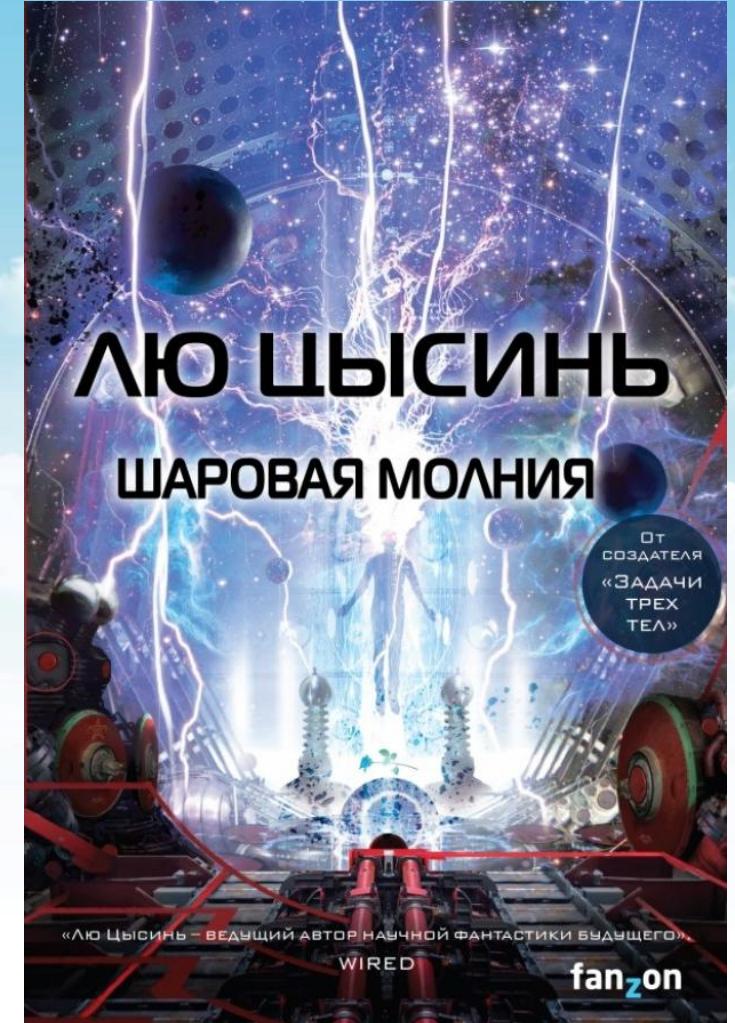
Щербань М.И. Микроклиматология. 1985

Немного истории

Программа по направлению «метеорология» в китайских университетах конца 1990х годов:

Обязательные предметы: высшая математика, теоретическая механика, гидродинамика, принцип работы и практическое применение компьютеров, языки программирования, динамическая метеорология, принципы синоптической метеорологии, китайская метеорология, статистическое прогнозирование, долгосрочное прогнозирование, математическое прогнозирование.

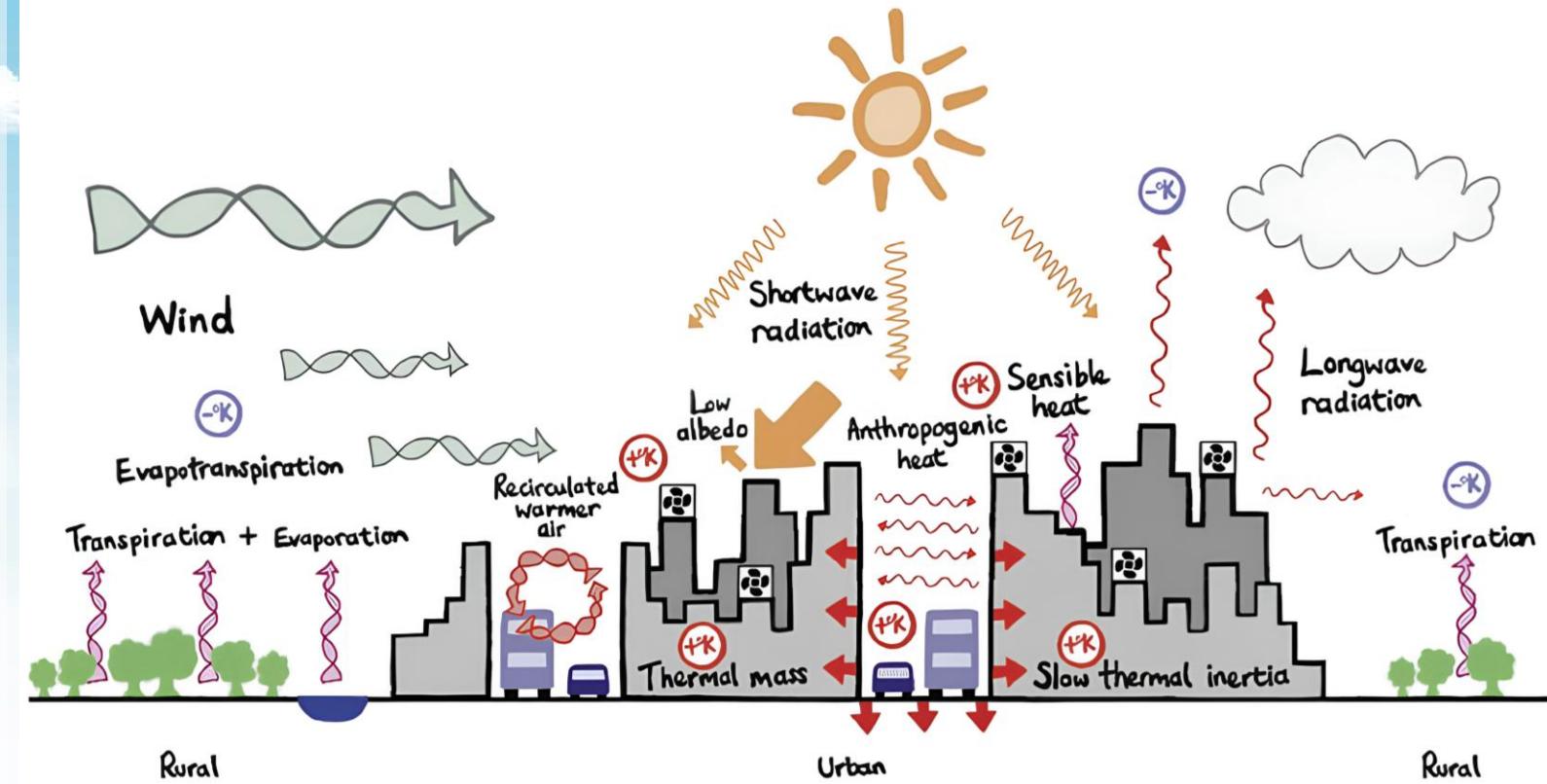
Предметы по желанию: циркуляция атмосферы, метеорологический диагностический анализ, грозы и метеорология среднего уровня, предсказание и предотвращение гроз, тропическая метеорология, климатические изменения и краткосрочное предсказание климата, радиолокационная и спутниковая метеорология, **загрязнение атмосферы и климатология больших городов**, высотная метеорология, взаимодействие атмосферы и Мирового океана.



Физические механизмы

Факторы влияния городской среды на метеорологические процессы:

- Изменения свойств поверхности \leftrightarrow urban form
- Антропогенные эмиссии (тепла, влаги, газов, аэрозолей) \leftrightarrow urban function
- Большое разнообразие частных физических процессов и их взаимодействий



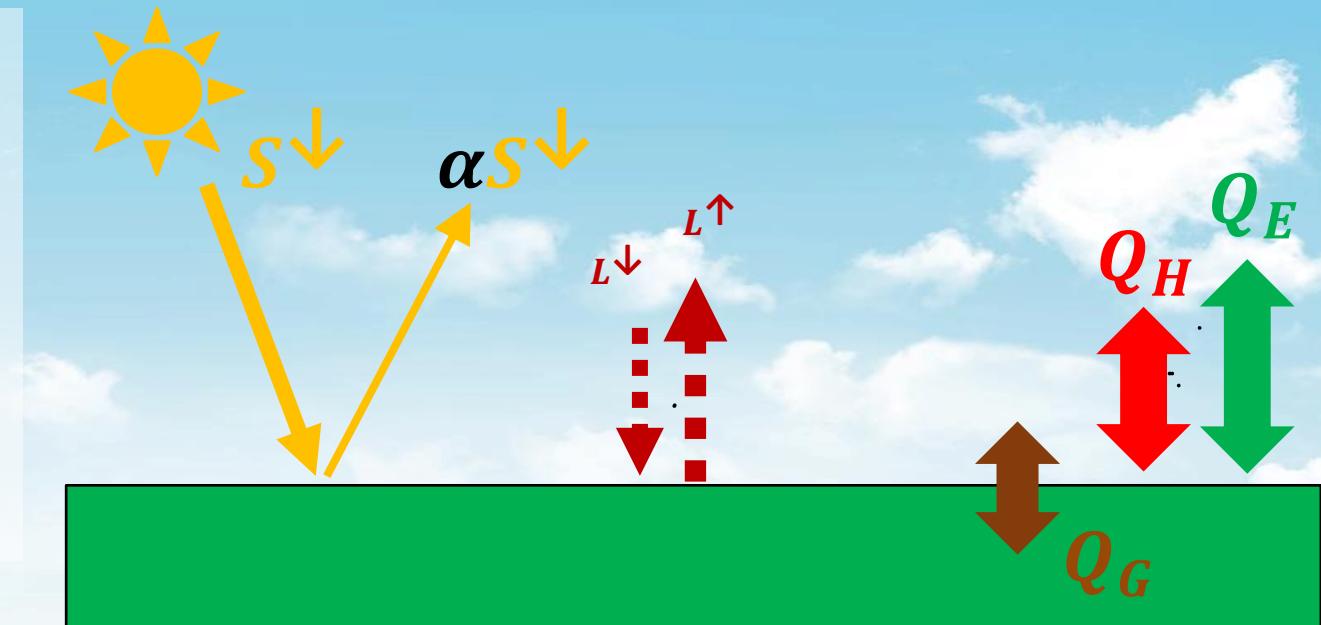
Физические механизмы

Изменения свойств поверхности

- Термофизические свойства материалов (альбедо, теплоемкость ..)
- Геометрия городской застройки, переотражение и переизлучение радиации
- Изменение водного баланса из-за наличия запечатанных (непроницаемых для влаги) поверхностей



Изменение слагаемых теплового баланса



$$Q_H + Q_E + Q_G = Q^*$$

Радиационный баланс

$$Q^* = S \downarrow (1 - \alpha) + L \downarrow - L \uparrow$$

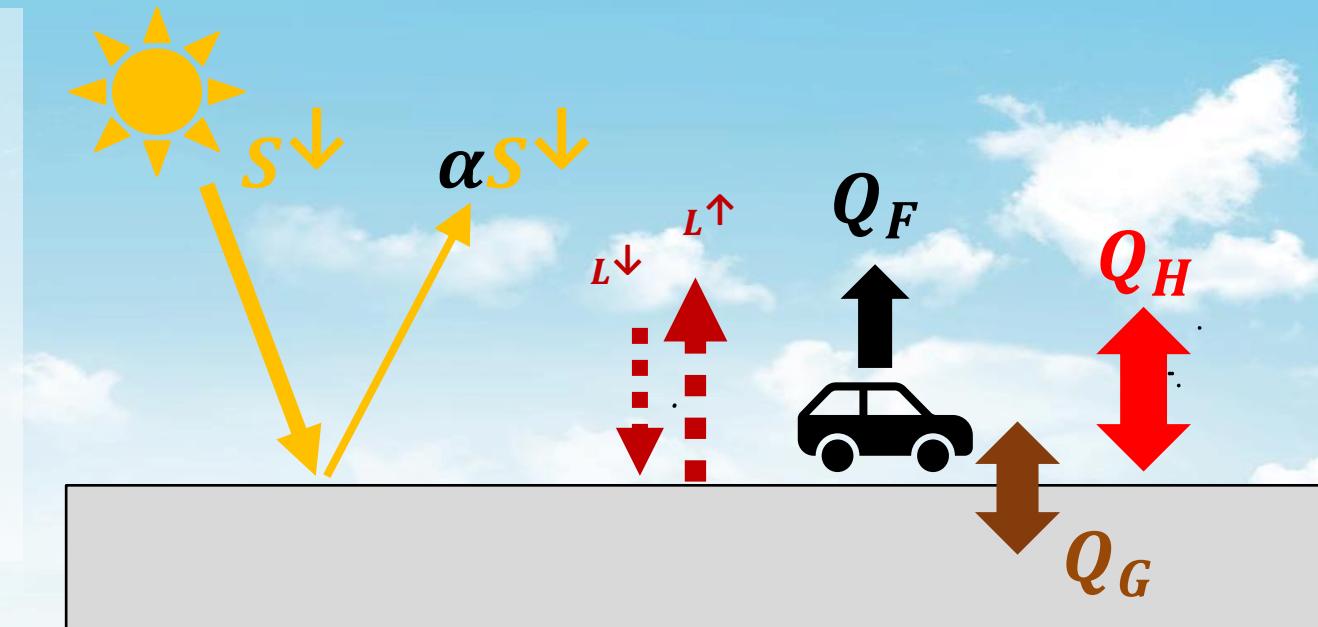
Физические механизмы

Изменения свойств поверхности

- Термофизические свойства материалов (альбедо, теплоемкость ..)
- Геометрия городской застройки, переотражение и переизлучение радиации
- Изменение водного баланса из-за наличия запечатанных (непроницаемых для влаги) поверхностей



Изменение слагаемых теплового баланса



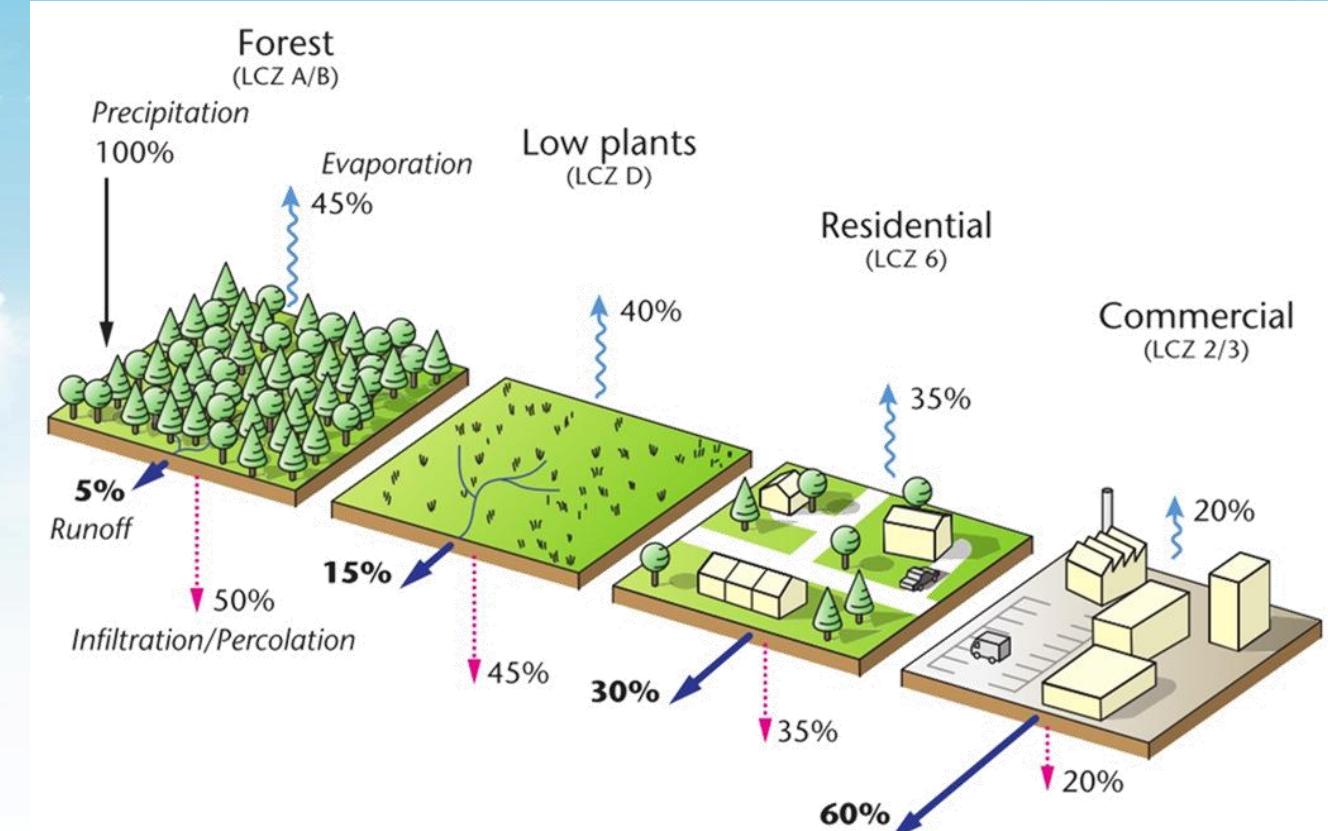
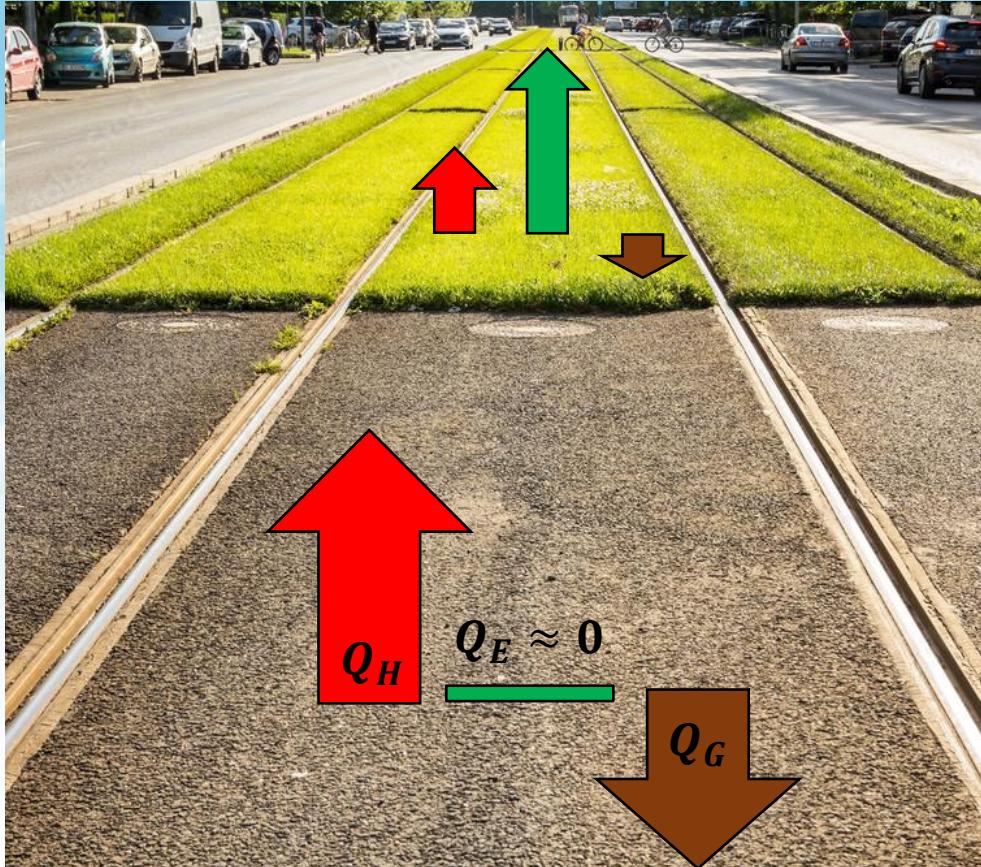
$$Q_H + \cancel{Q_E} + Q_G = Q^* + Q_F$$

Радиационный баланс

$$Q^* = S\downarrow(1 - \alpha) + L\downarrow - L\uparrow$$

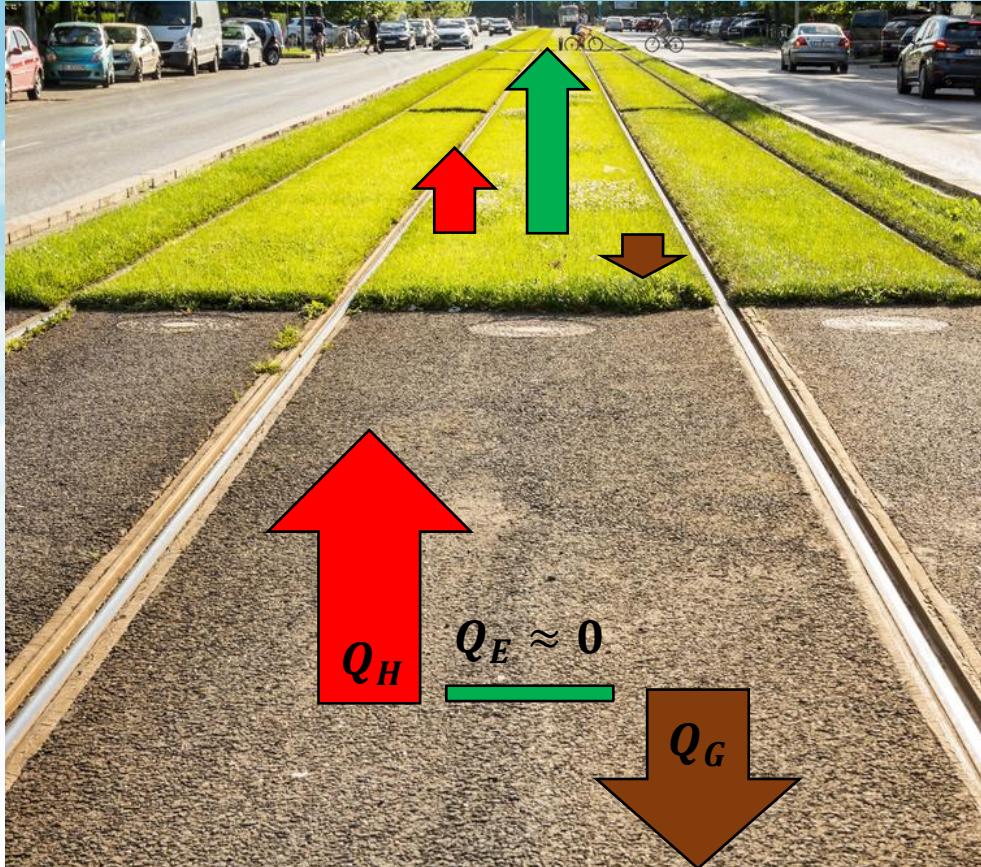
Физические механизмы

Турбулентные потоки тепла и влаги



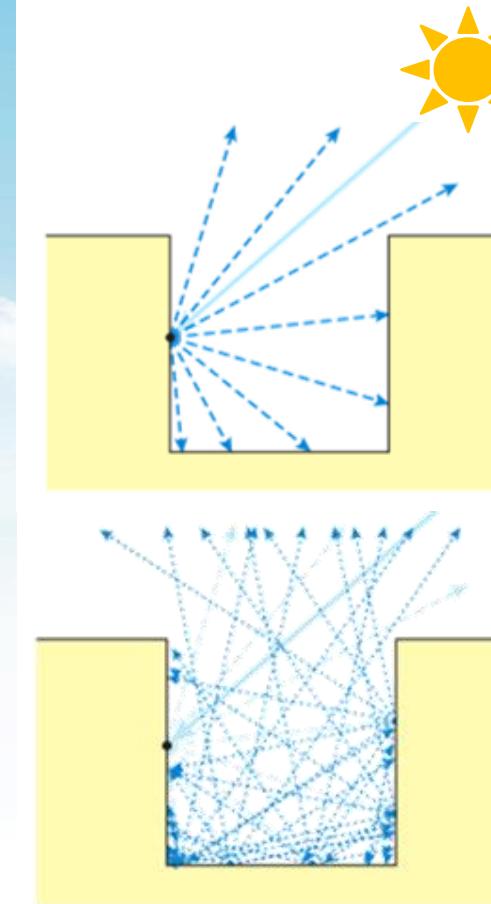
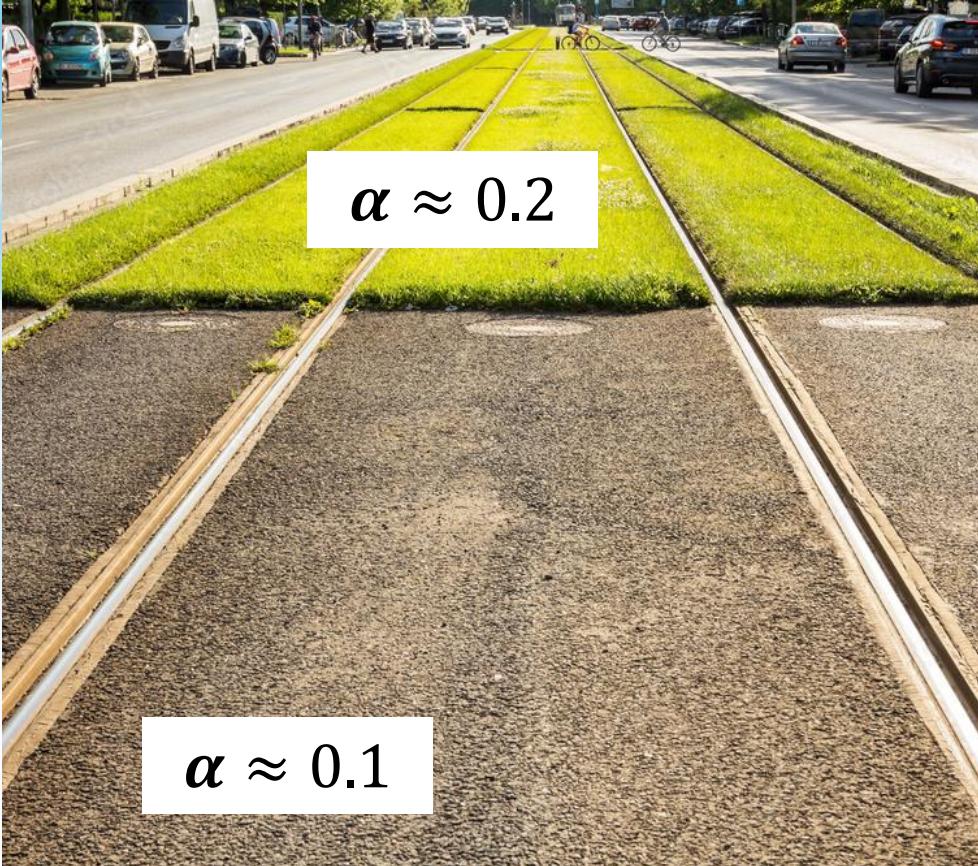
Физические механизмы

Турбулентные потоки тепла и влаги



Физические механизмы

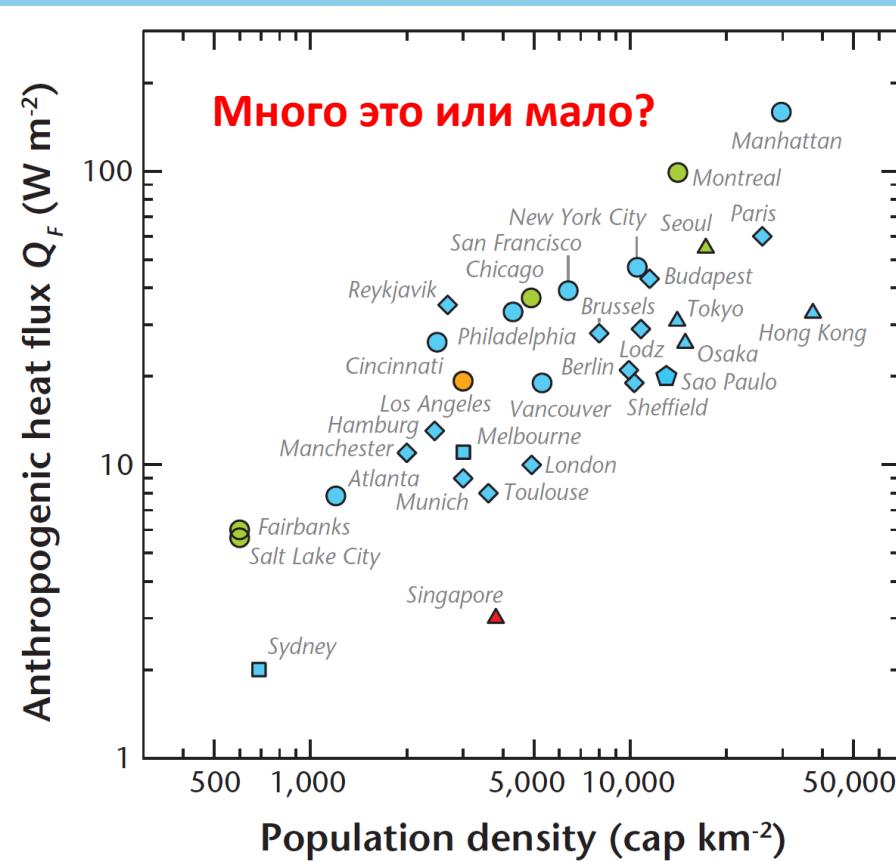
Баланс коротковолновой радиации



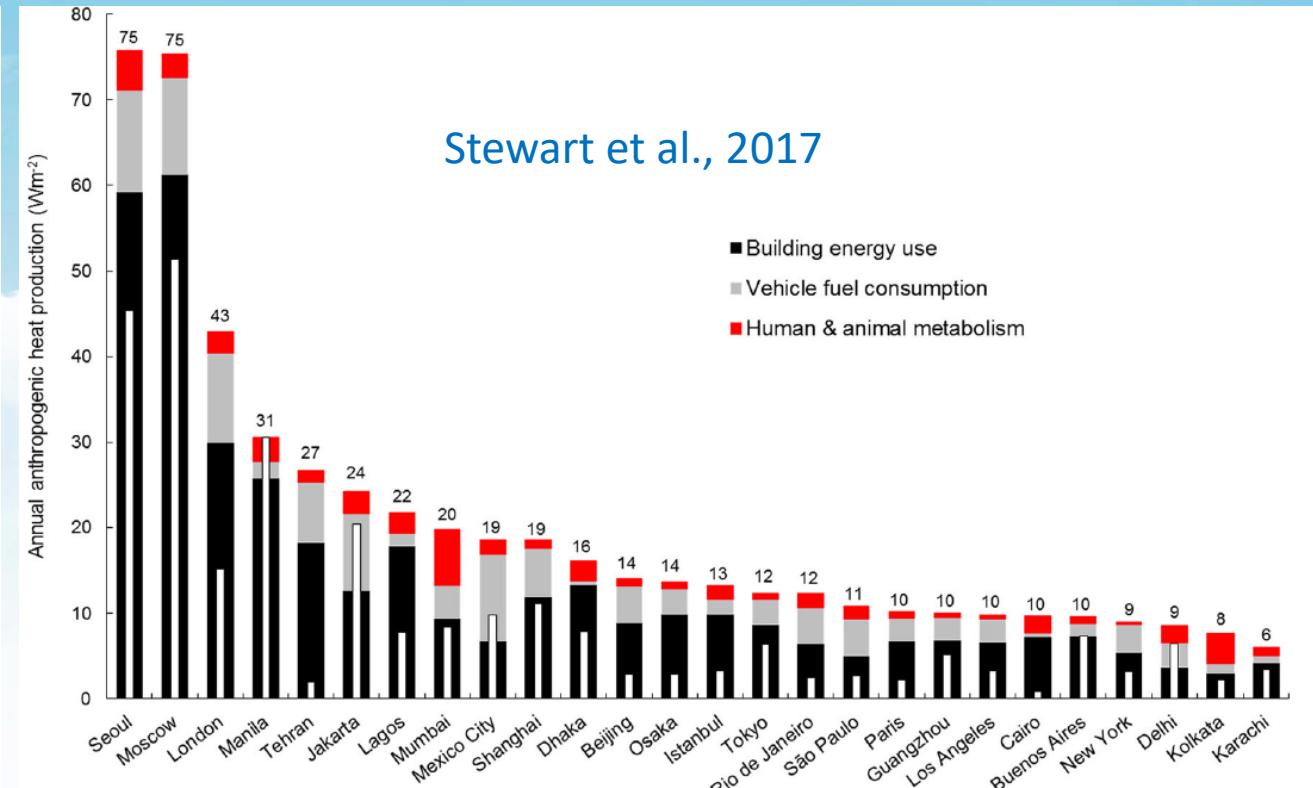
Urban form	H/W	λ_c	Albedo α	Change in absorption
	0	1	0.40	
	0.5	1.5	0.32	+17%
	1	2	0.27	+21%
	2	3	0.23	+27%

Физические механизмы

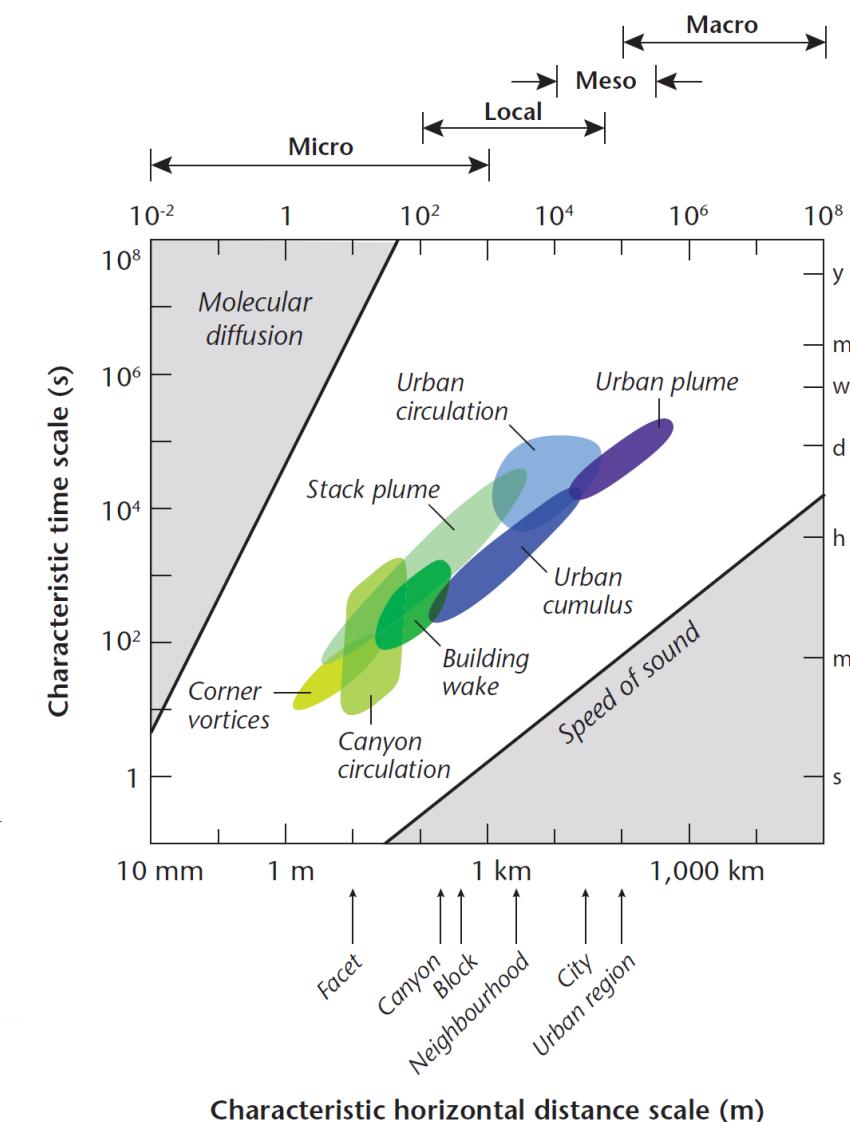
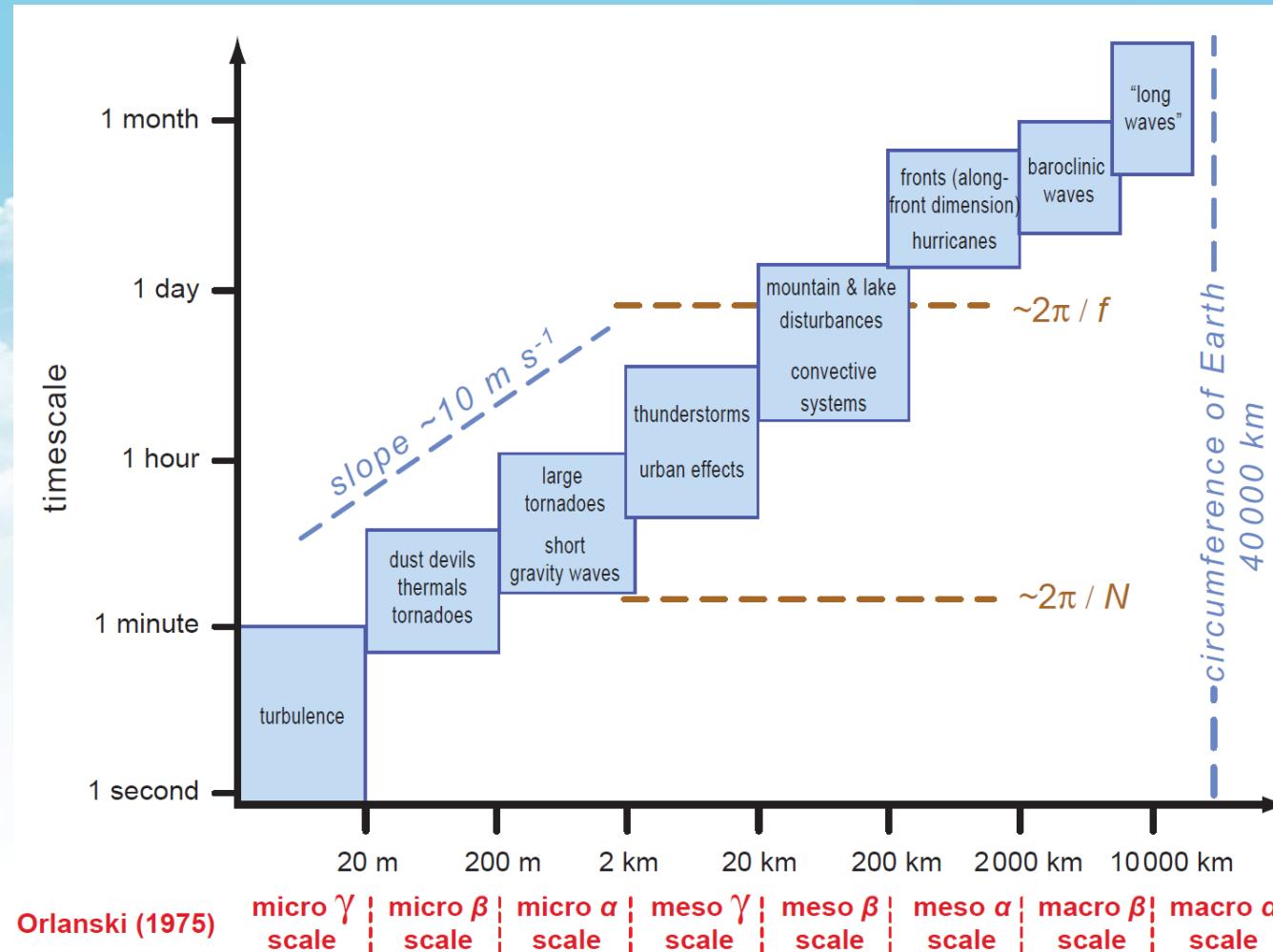
Антропогенный поток тепла



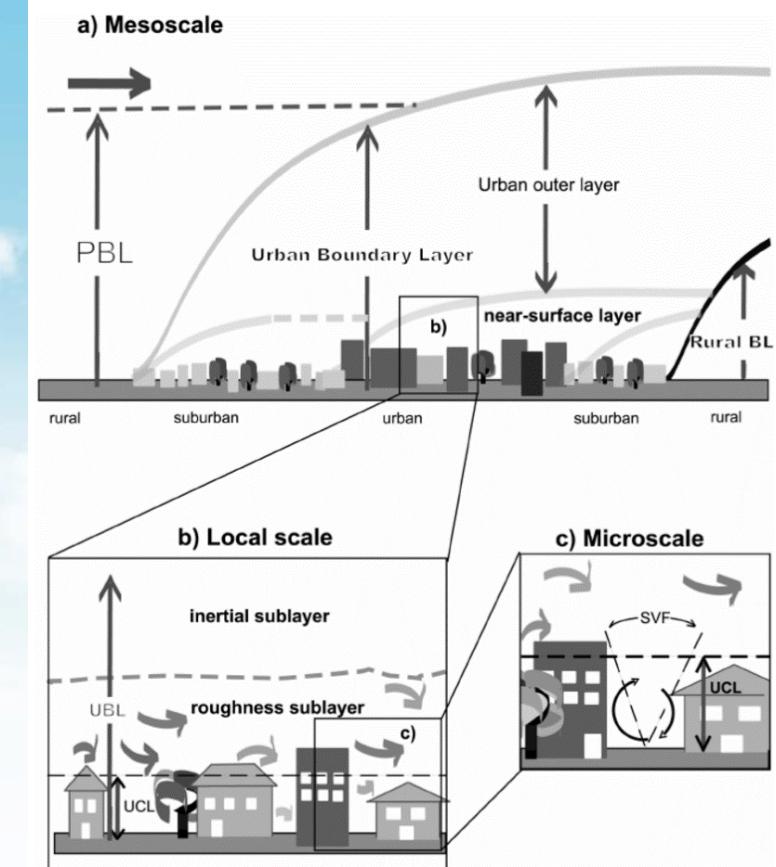
Для сравнения:
от Солнца Земля получает
в среднем $340 \text{ Вт}/\text{м}^2$



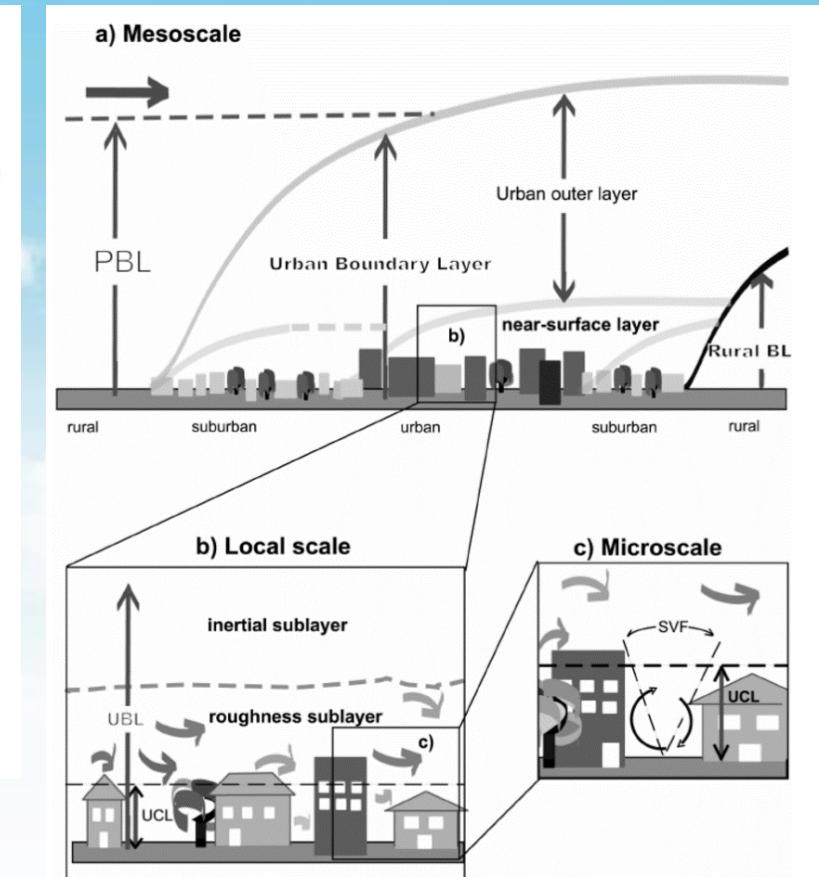
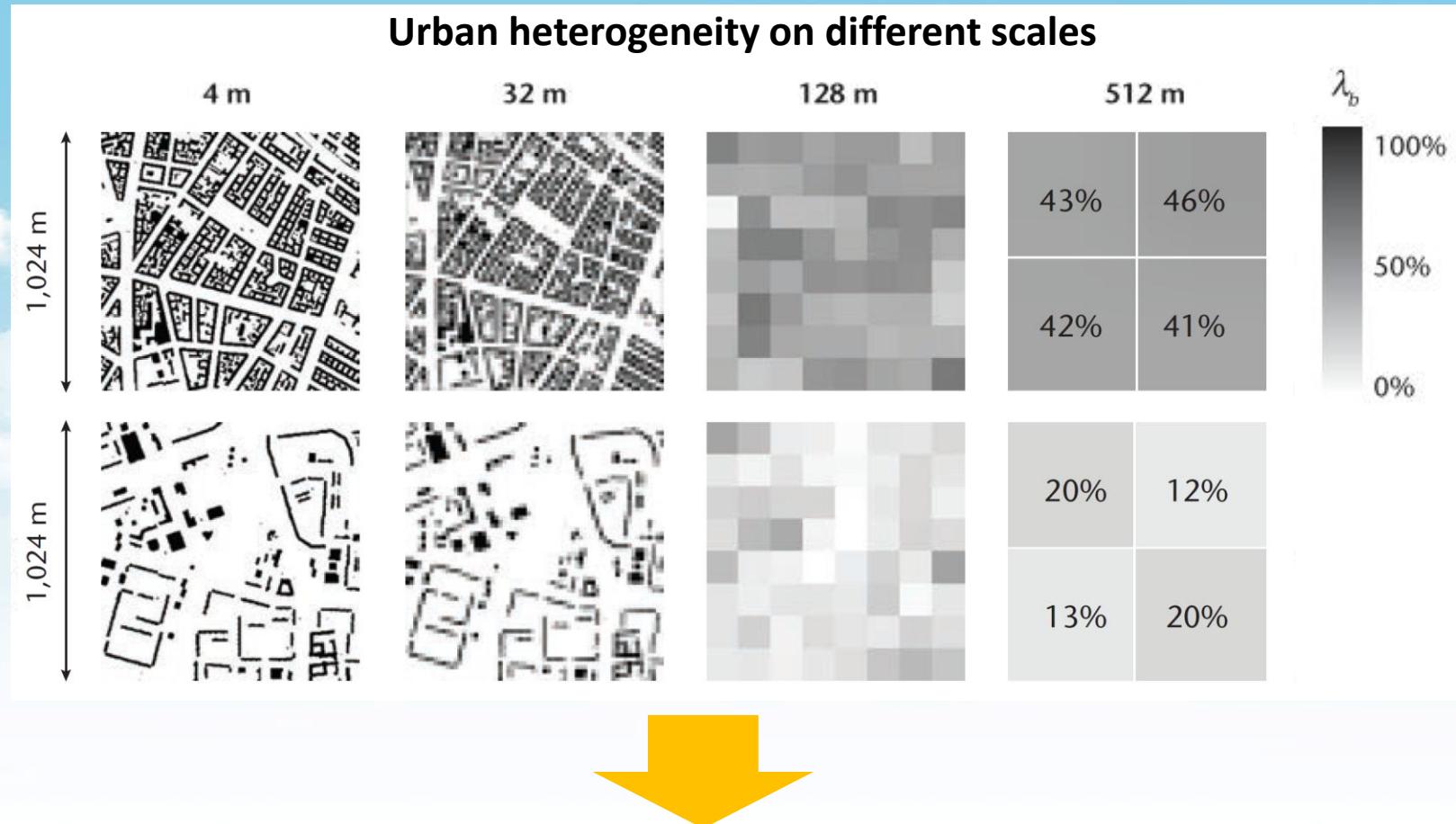
Мульти масштабность городской атмосферы



Мульти масштабность городской атмосферы

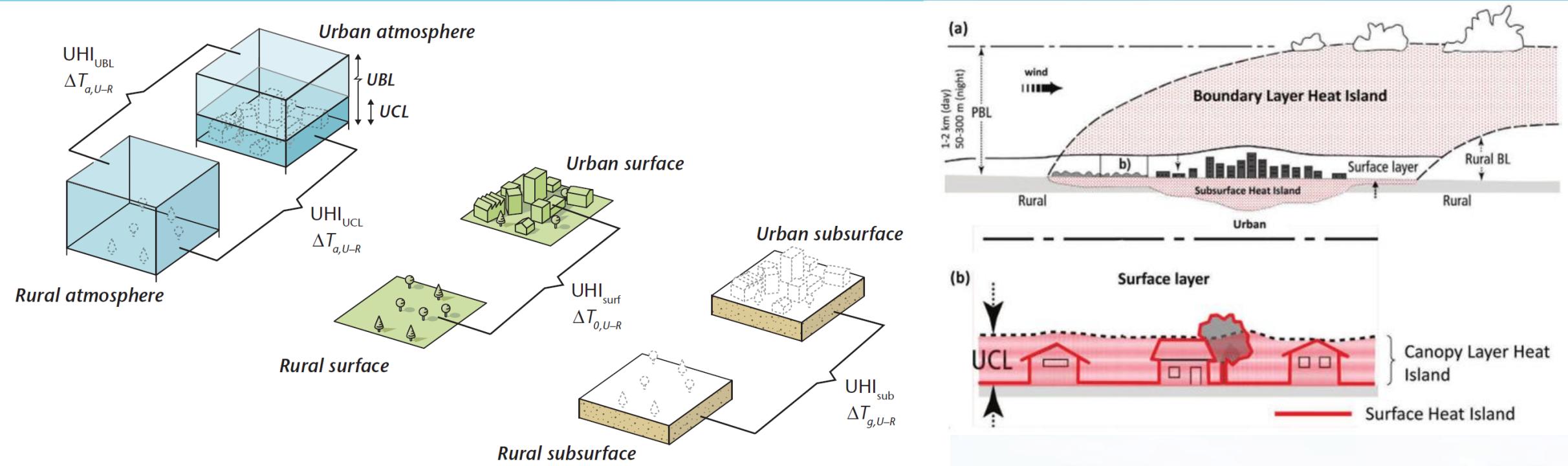


Мульти масштабность городской атмосферы



Масштаб процессов определяет выбор данных
и моделей для исследования

Городской остров тепла



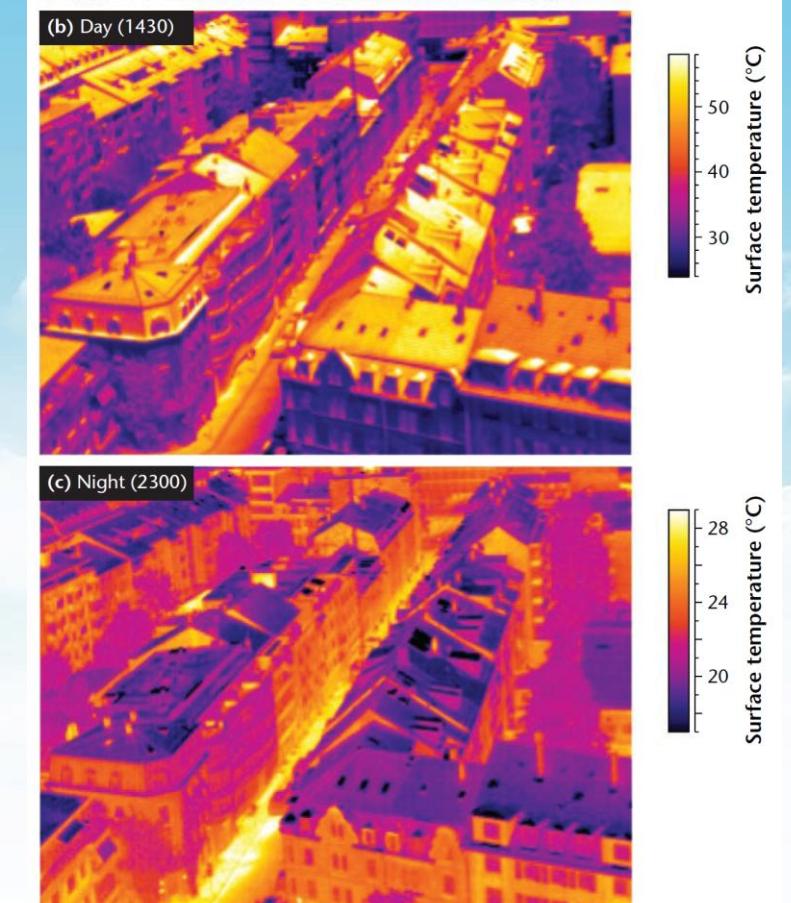
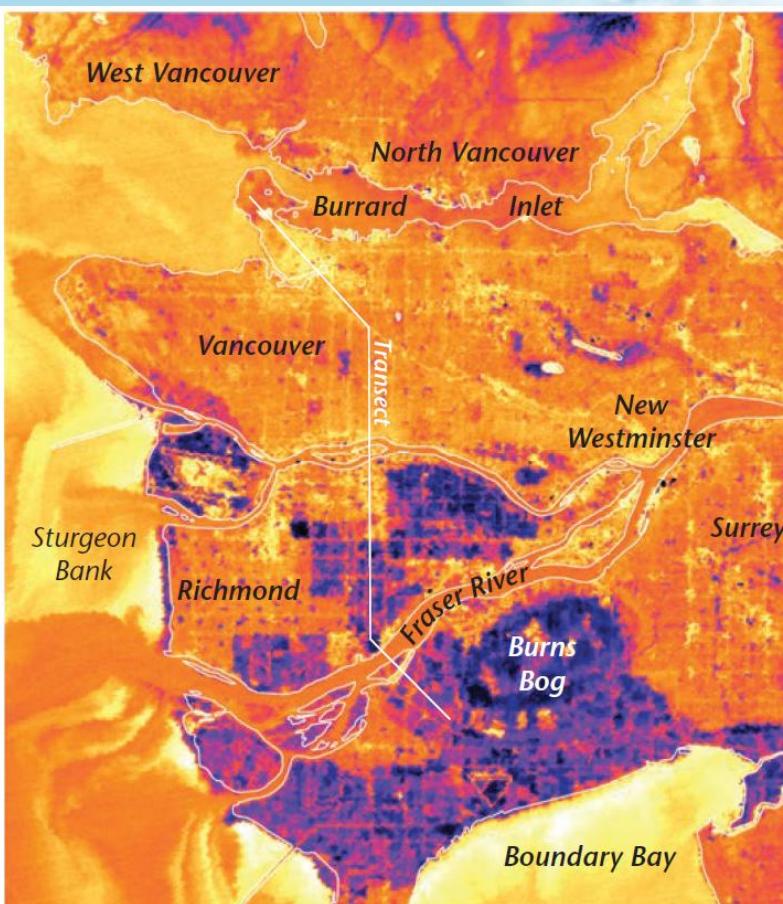
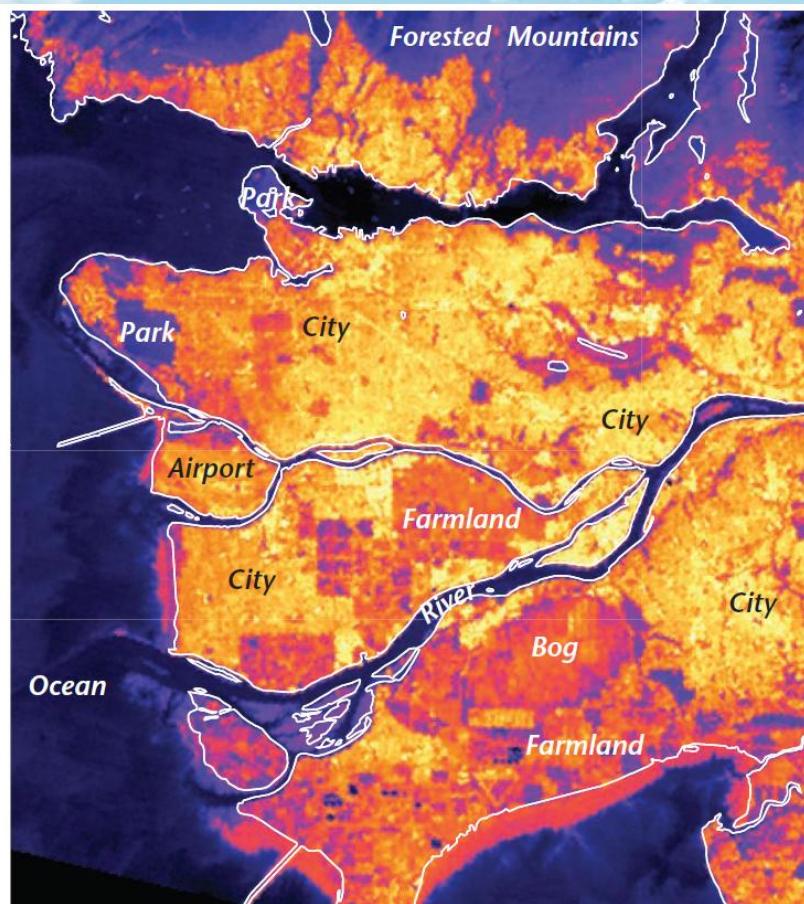
Виды островов тепла:

- Поверхностный остров тепла (surface UHI) – по данным спутниковой ИК съемки
- Приземный остров тепла (canopy-layer UHI) – по данным метеонаблюдений
- Остров тепла в пограничном слое атмосферы (boundary layer UHI)

Городской остров тепла

Поверхностный остров тепла (surface UHI) в поле температуры поверхности

- Определяющее влияние локальных свойств поверхности
- Высокая пространственная неоднородность
- Диагностируется по спутниковым данным

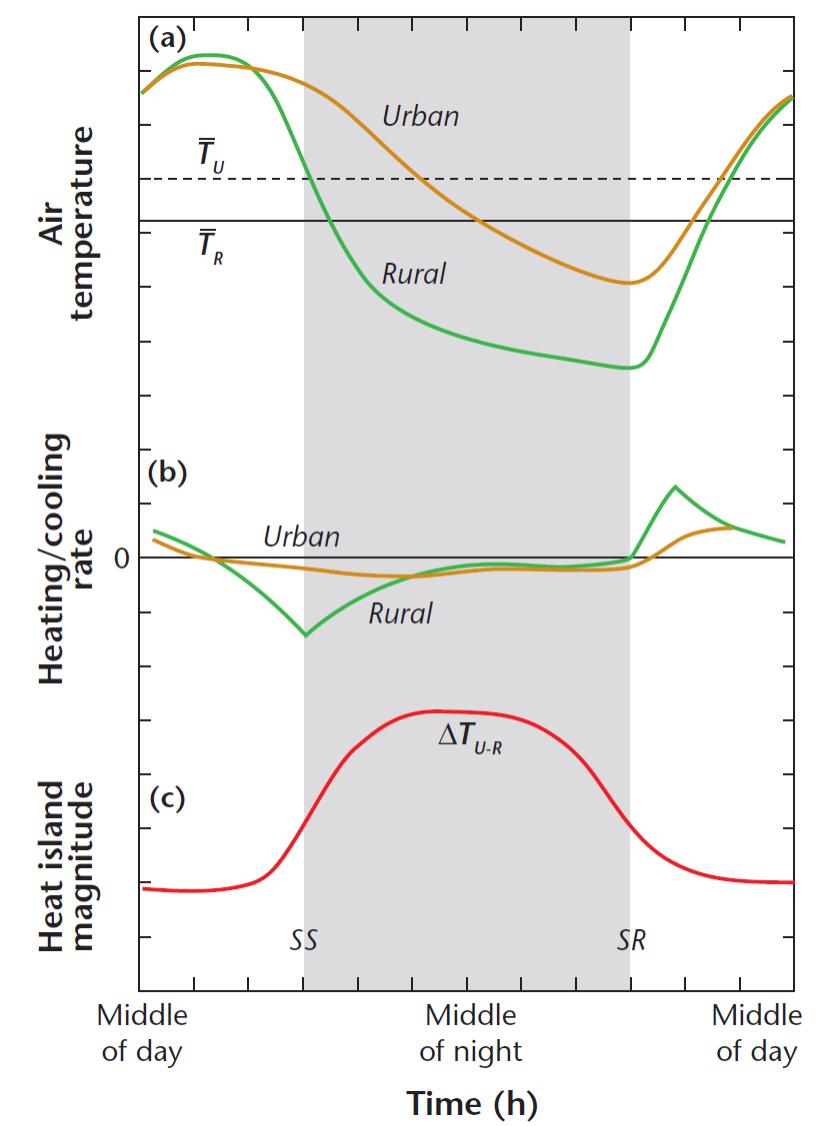
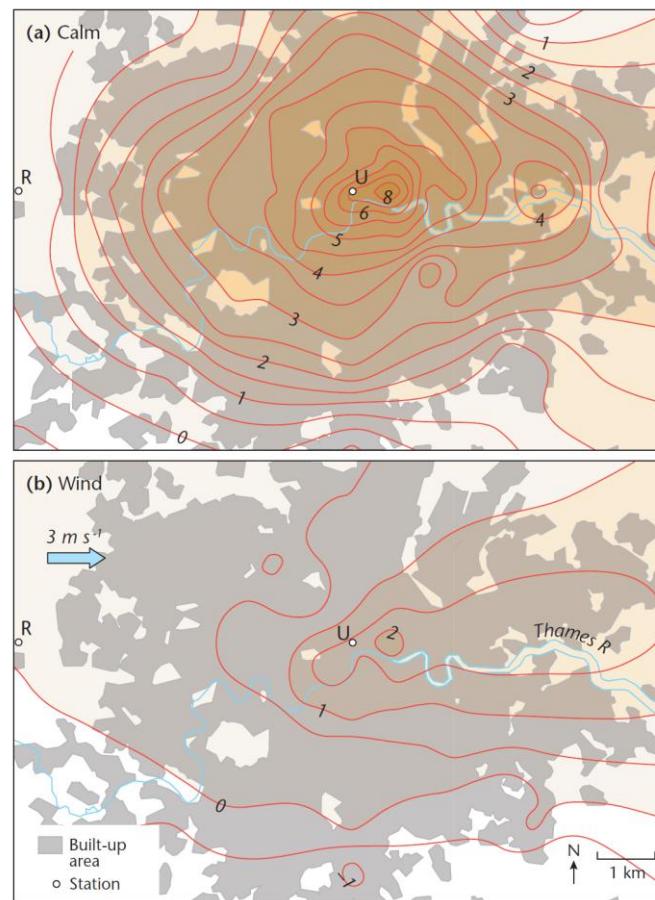
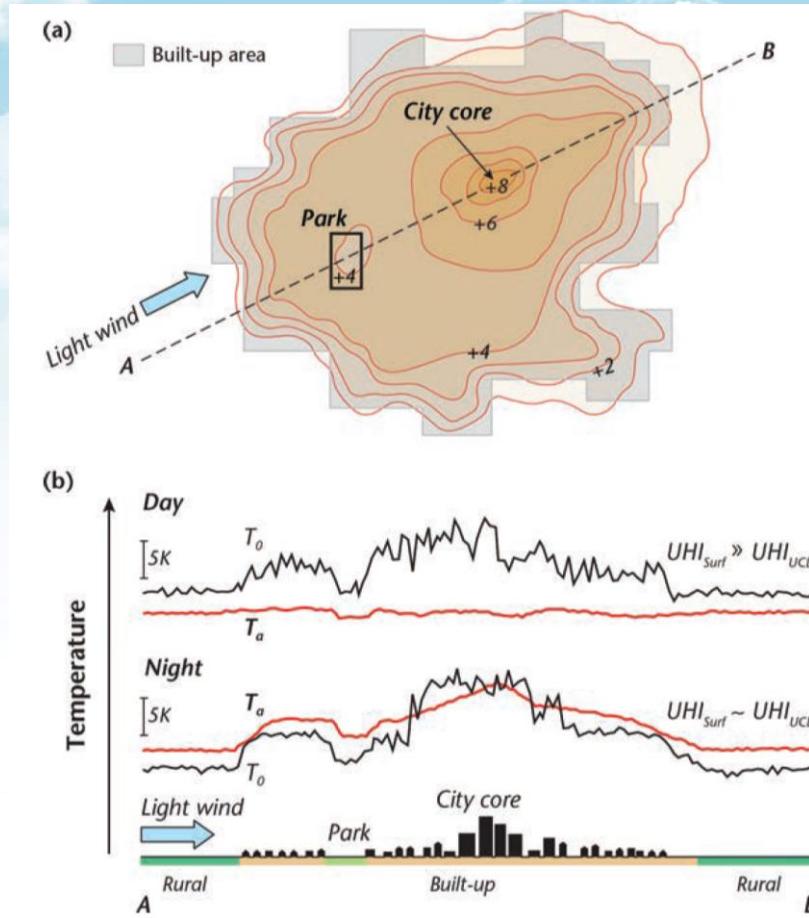


Surface temperature ($^{\circ}\text{C}$)

Городской остров тепла

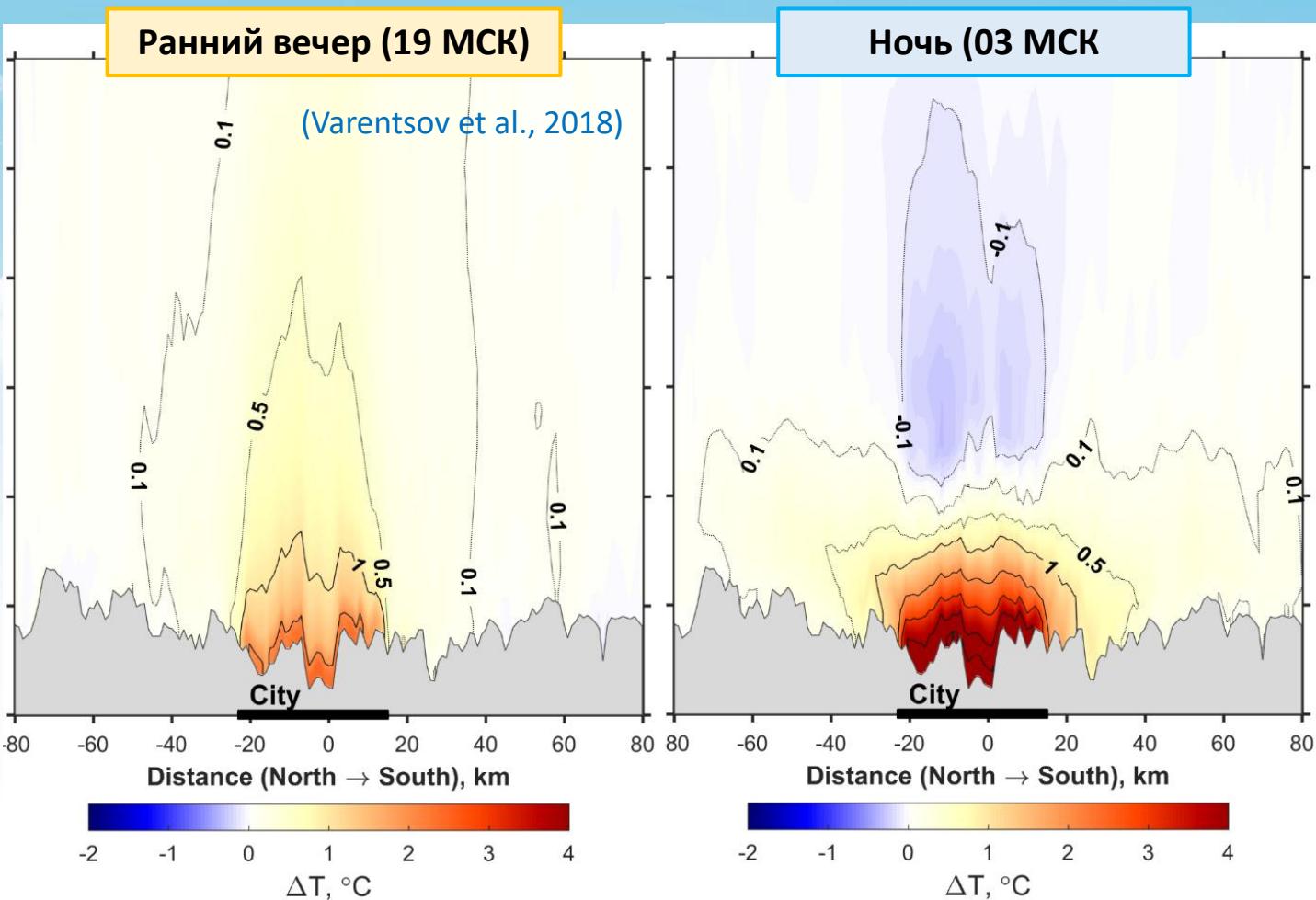
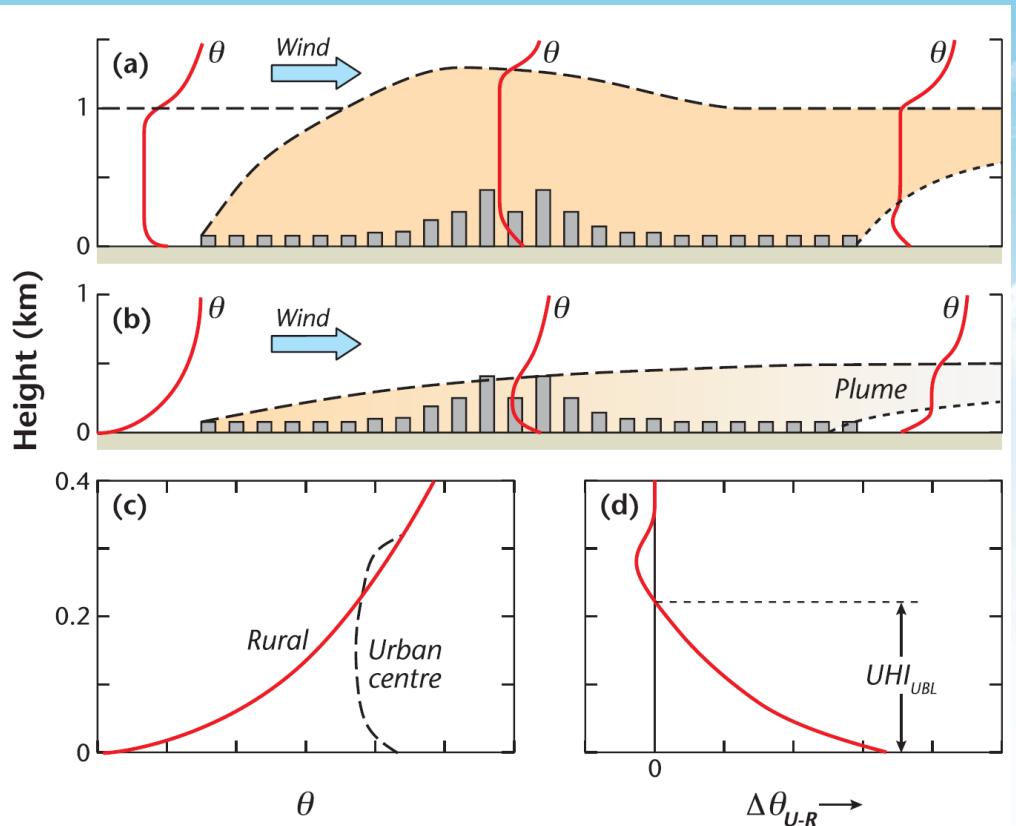
Приёмный остров тепла (canopy-layer UHI)

- Характерный суточный ход, отличный от хода SUHI
- Высокая чувствительность к скорости и направлению ветра
- Сглаженная структура, влияния нелокальных факторов



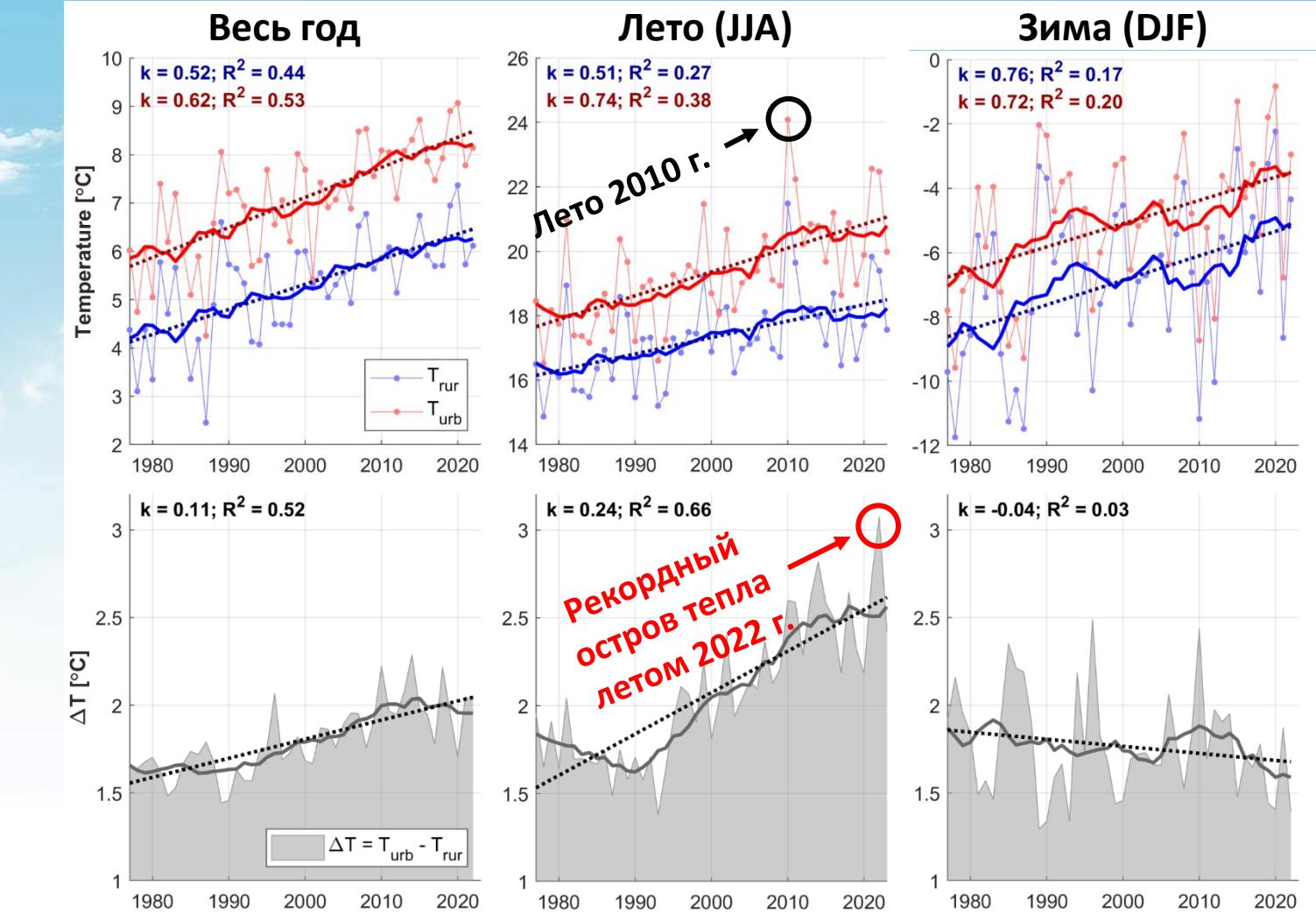
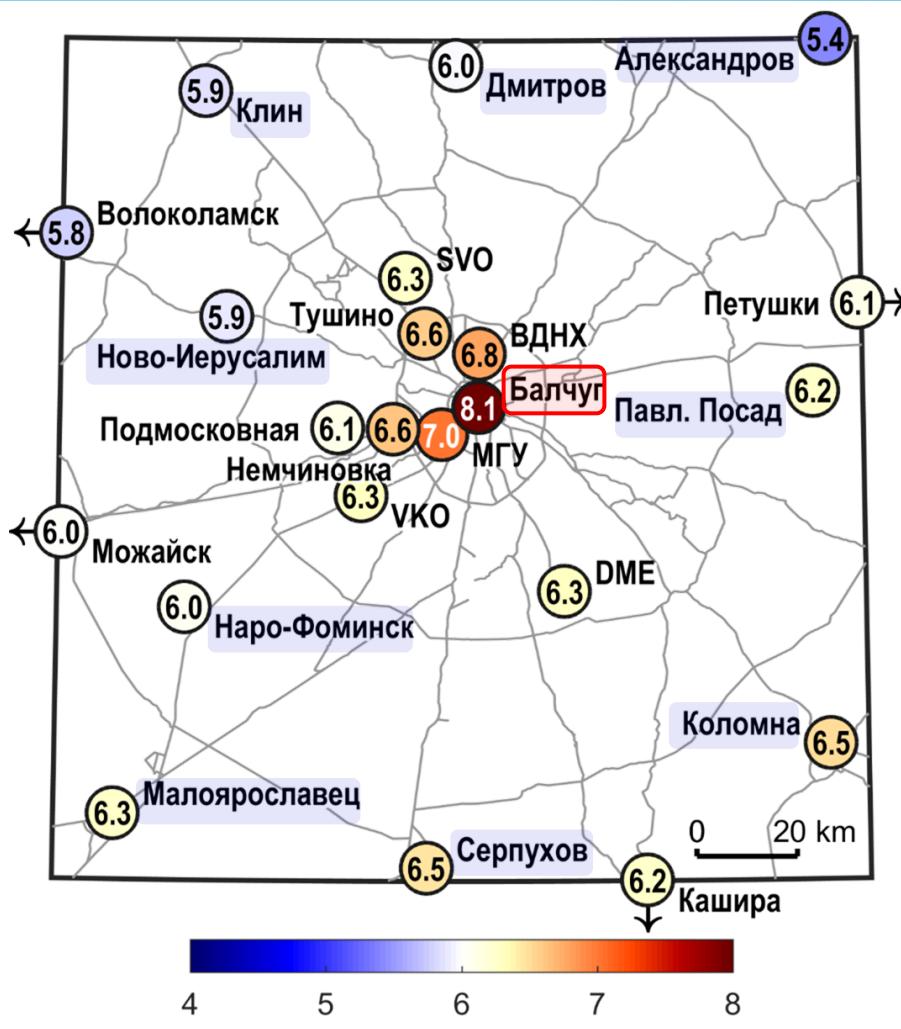
Городской остров тепла

Остров тепла в пограничном слое атмосферы (boundary layer UHI)



Тесная связь со стратификацией атмосферы
Может распространяться далеко за границы города

Остров тепла Москвы



Тренд усиления острова тепла обусловлен как ростом и развитием города, так и крупномасштабными измерениями климата (Varentsov et al., 2023)

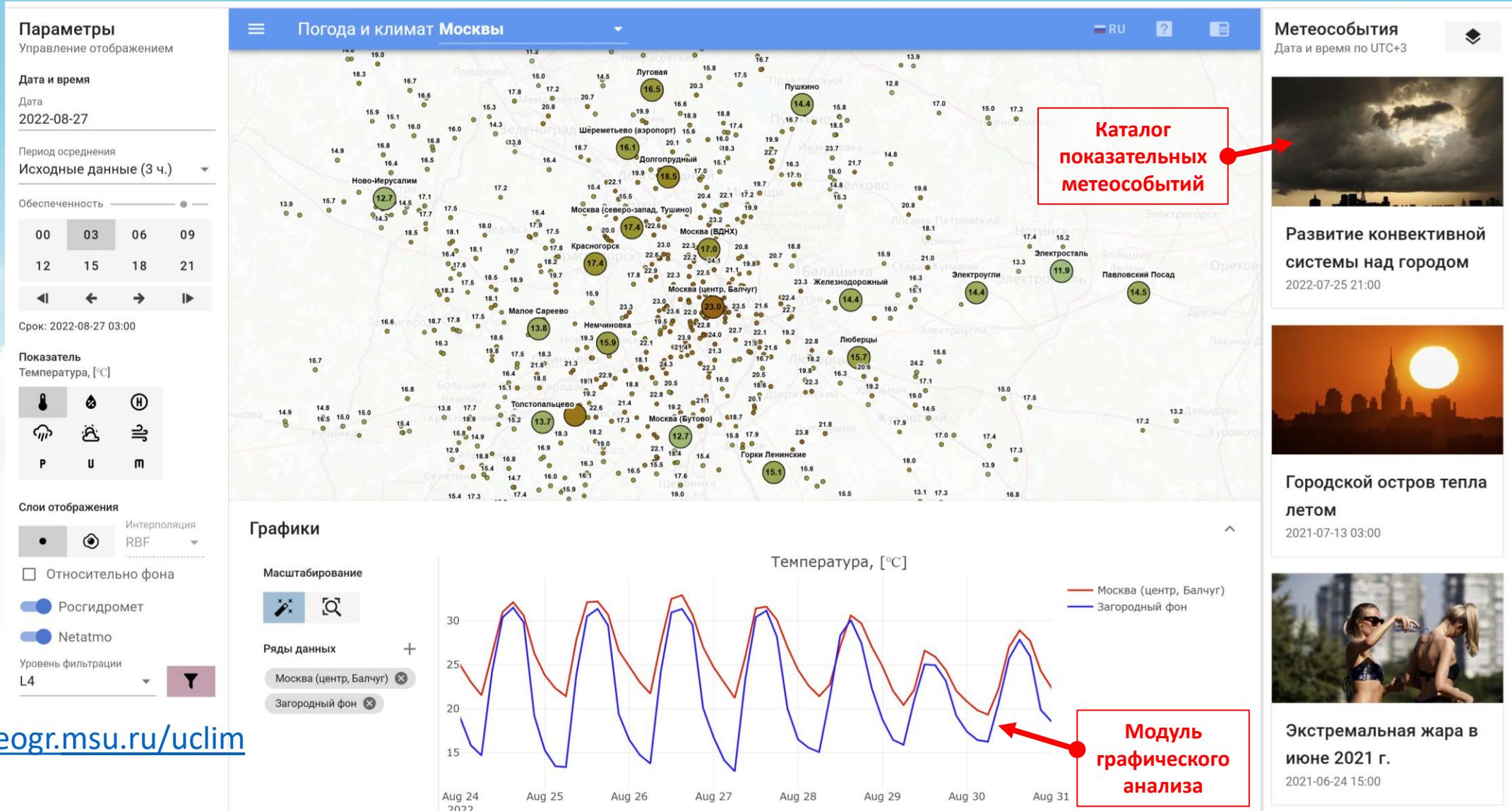
Остров тепла Москвы

Выбор даты, времени, периода осреднения

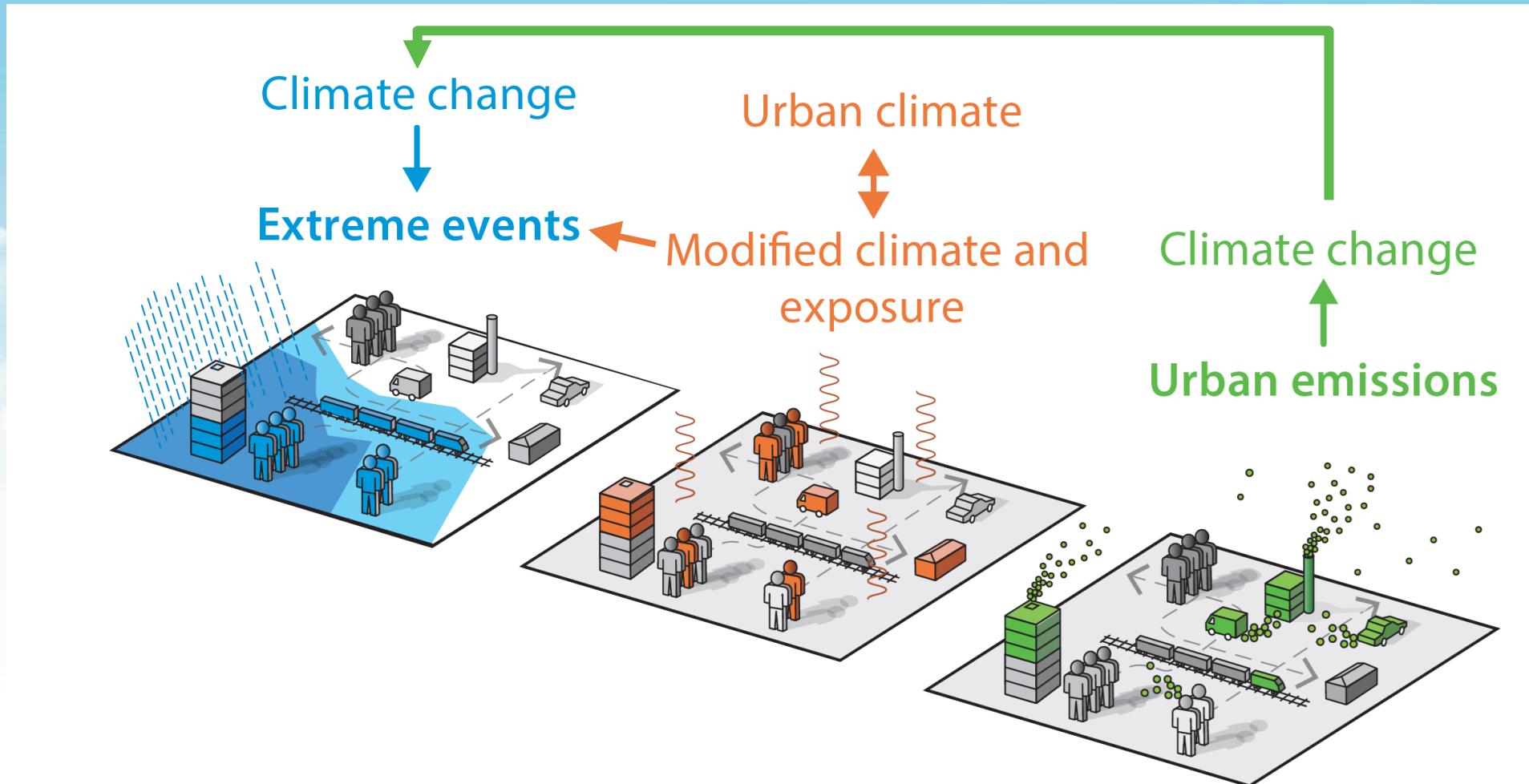
Выбор отображаемого параметра

Настройки отображения и преобразования

<http://carto.geogr.msu.ru/uclim>

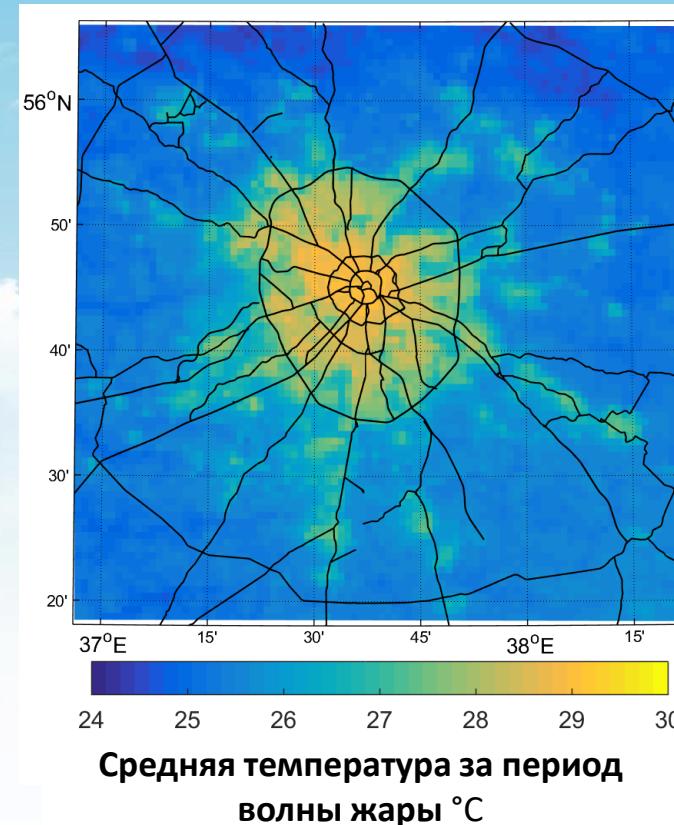
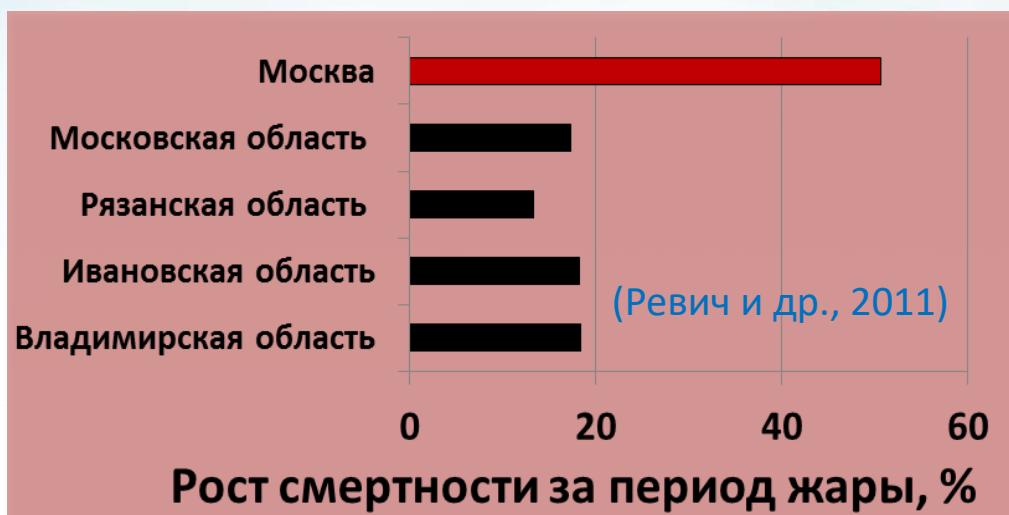
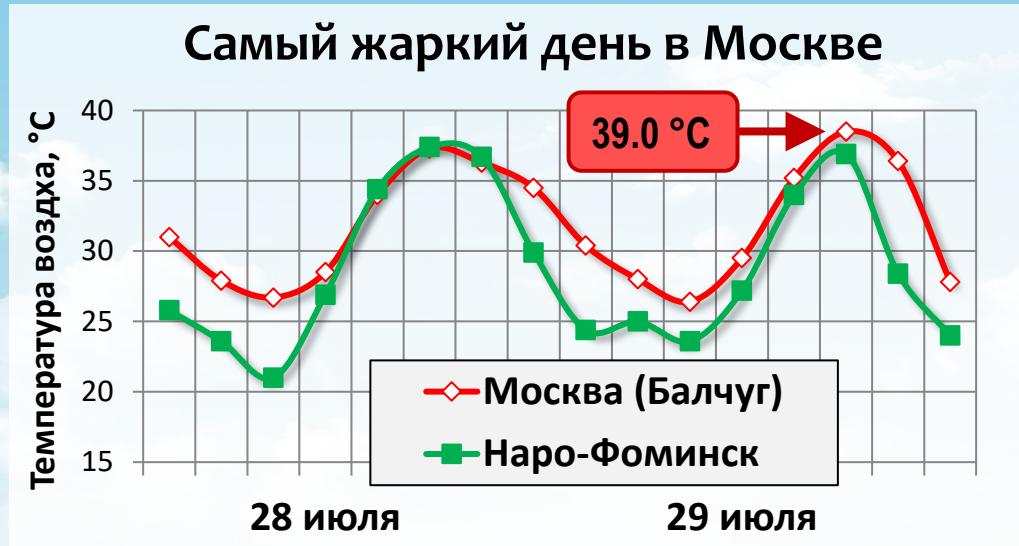


На что это все влияет?

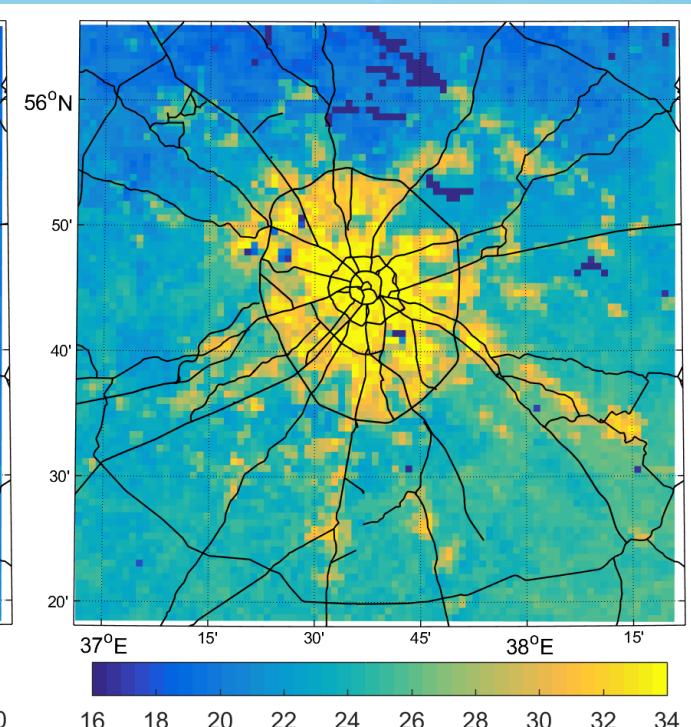


Комфорт и здоровье населения

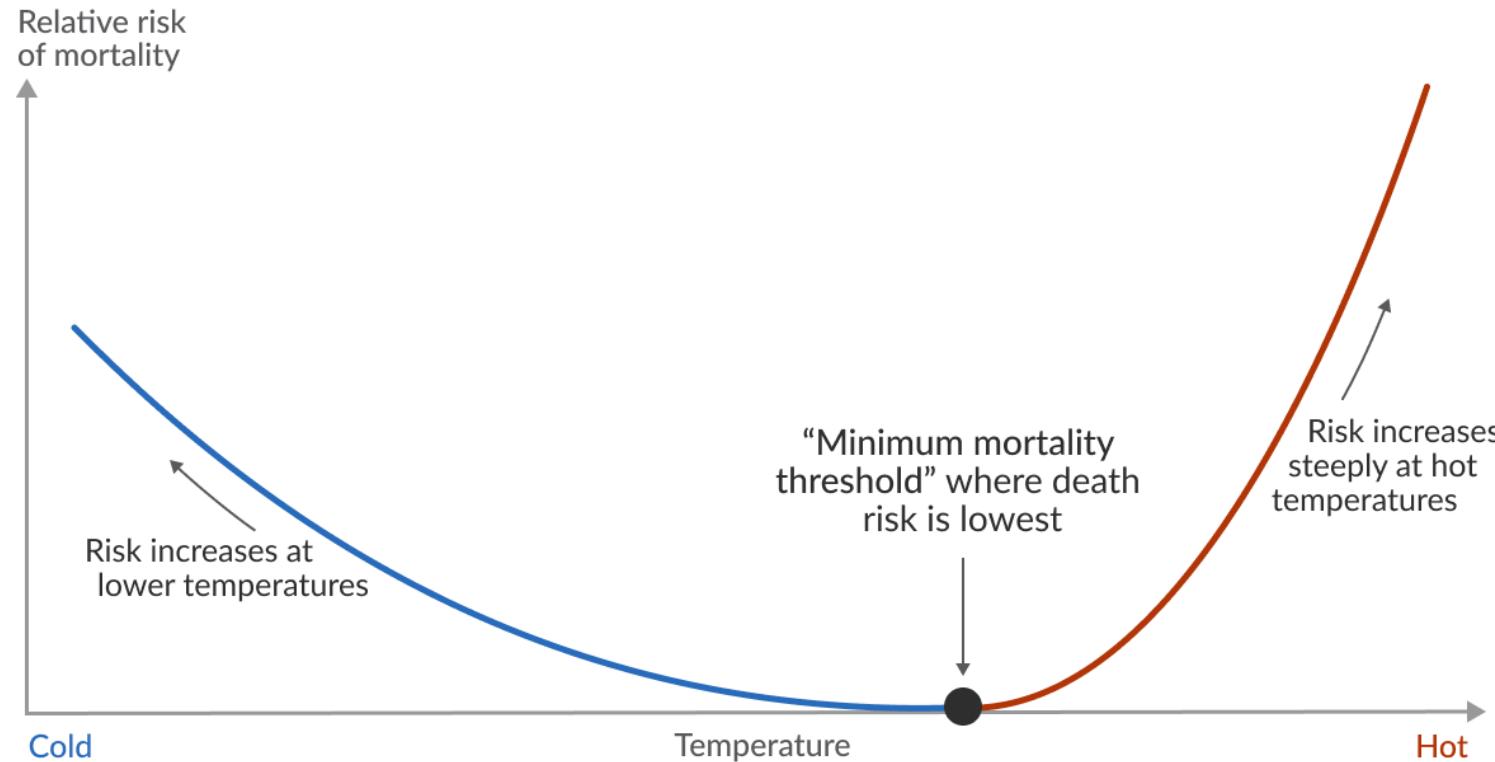
Примеры для экстремальной волны жары 2010 г.



(Zemtsov et al., 2020)



Комфорт и здоровье населения



ENVIRONMENTAL RESEARCH 5, 85–92 (1972)

Heat Island = Death Island?

ROBERT W. BUECHLEY, JOHN VAN BRUGGEN, AND LAWRENCE E. TRUPPI¹

Epidemiology Branch, Division of Health Effects Research,
National Environmental Research Center, Environmental Protection Agency,
Research Triangle Park, North Carolina

Received December 30, 1971

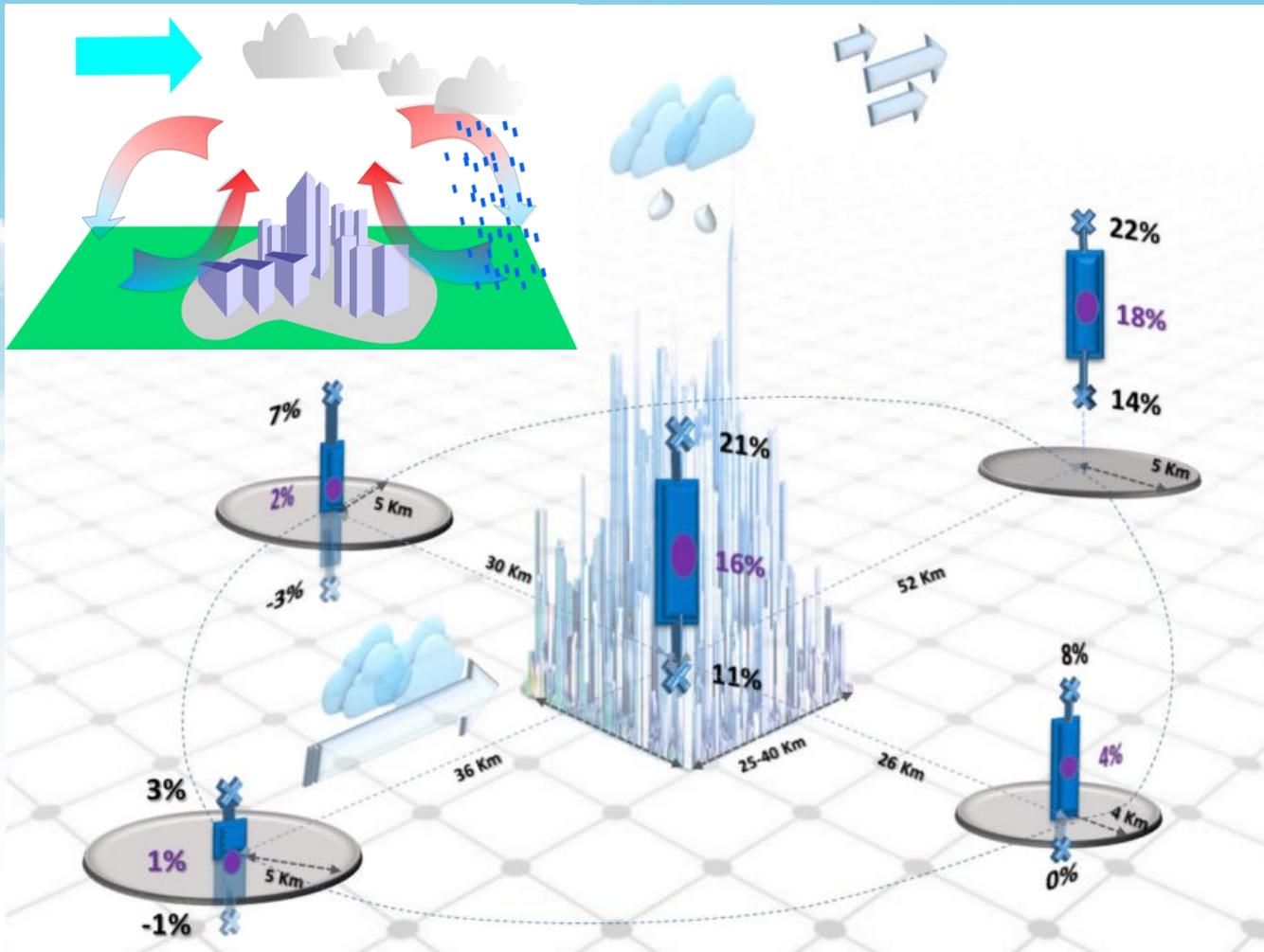
URBAN PLANNING, ENVIRONMENT AND HEALTH

Over 4% of Summer Mortality in European Cities is Attributable to Urban Heat Islands

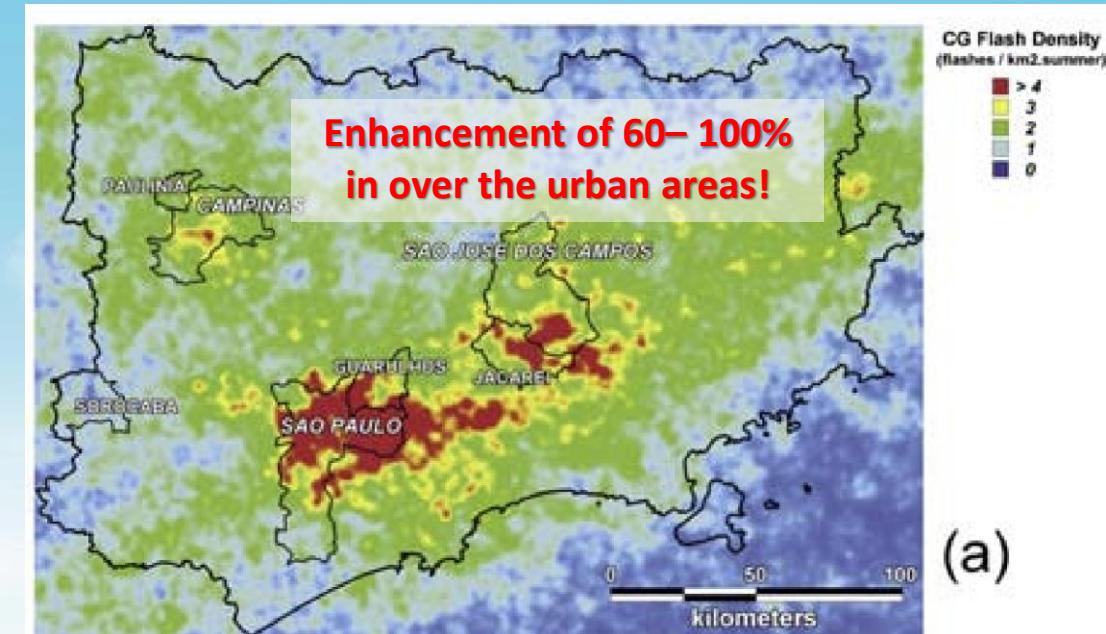
A new study conducted with data from 93 European cities estimates that one third of deaths attributable to heat islands could be avoided if trees covered 30% of urban space

01.02.2023

Осадки и опасные явления погоды

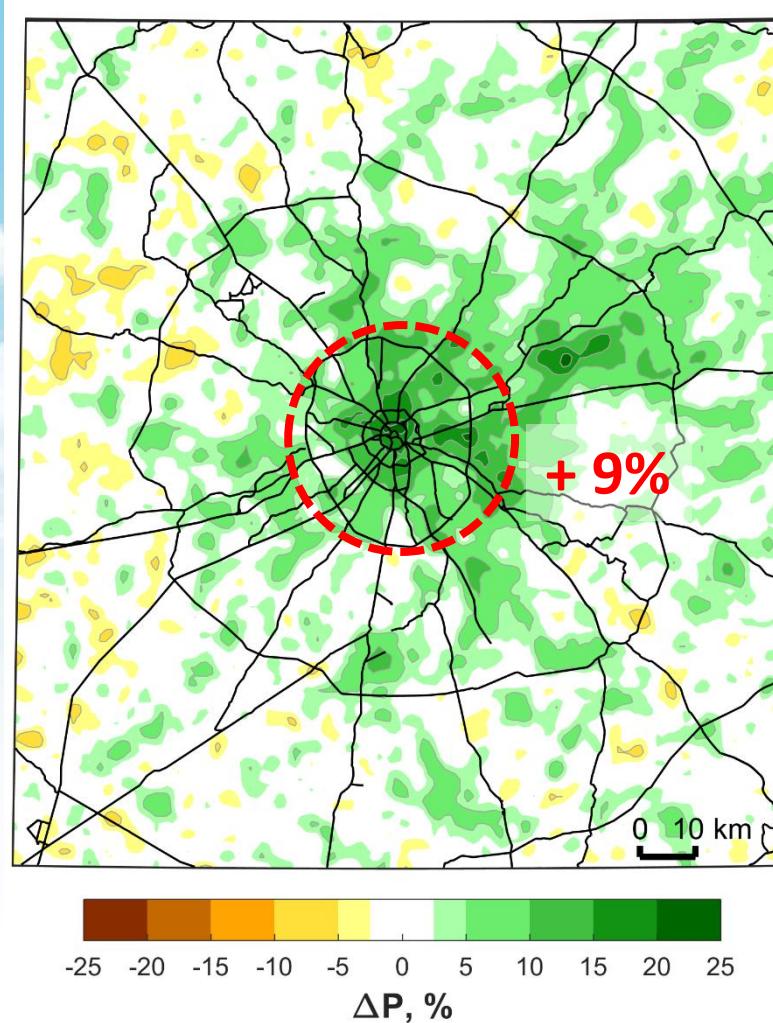


Liu, J., & Niyogi, D. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Scientific Reports*, 9(1), 7301

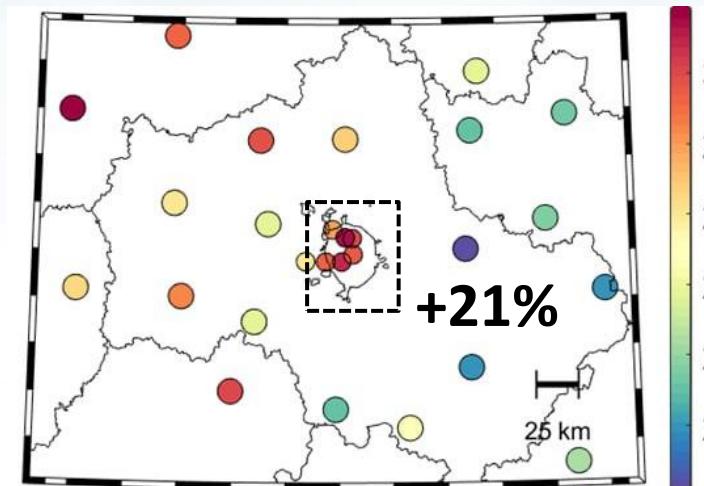
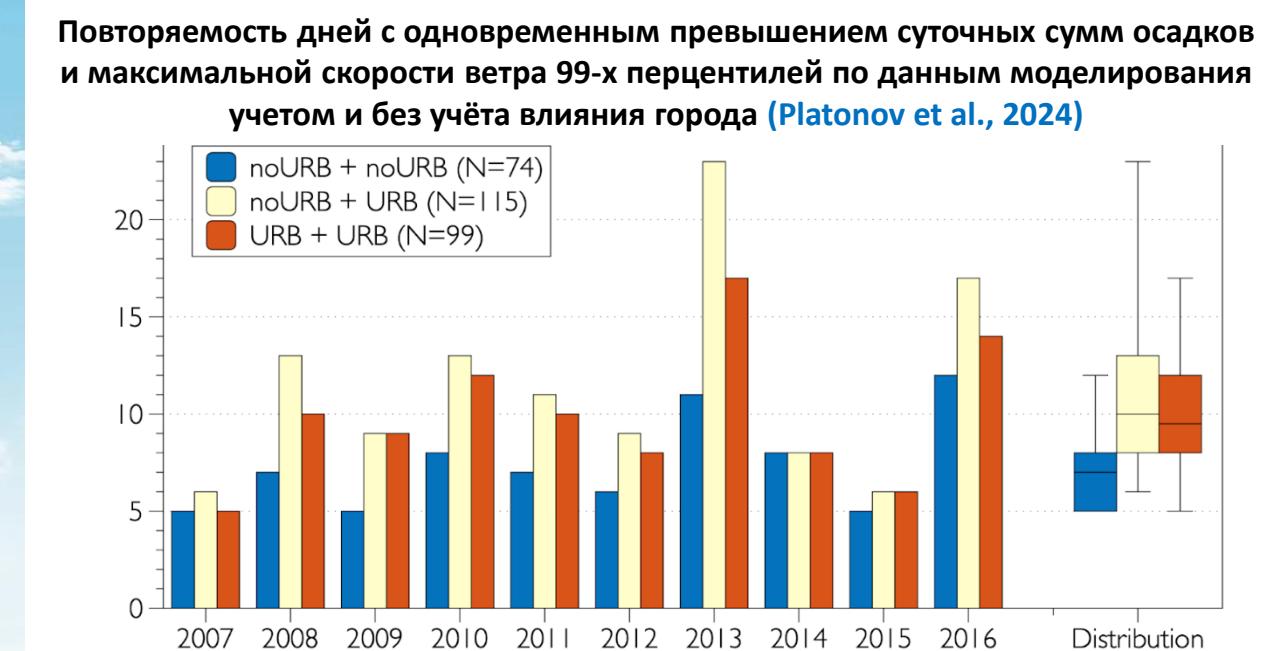


Naccarato et al. (2003) Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil

Осадки и опасные явления погоды

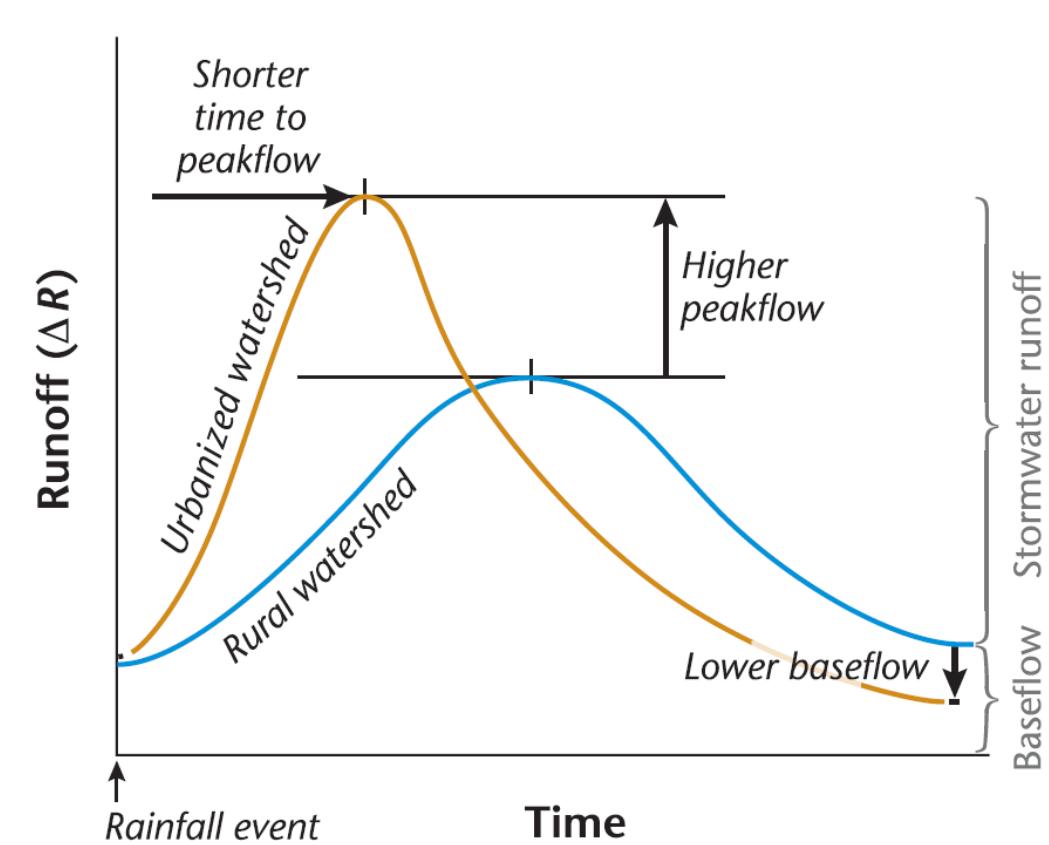
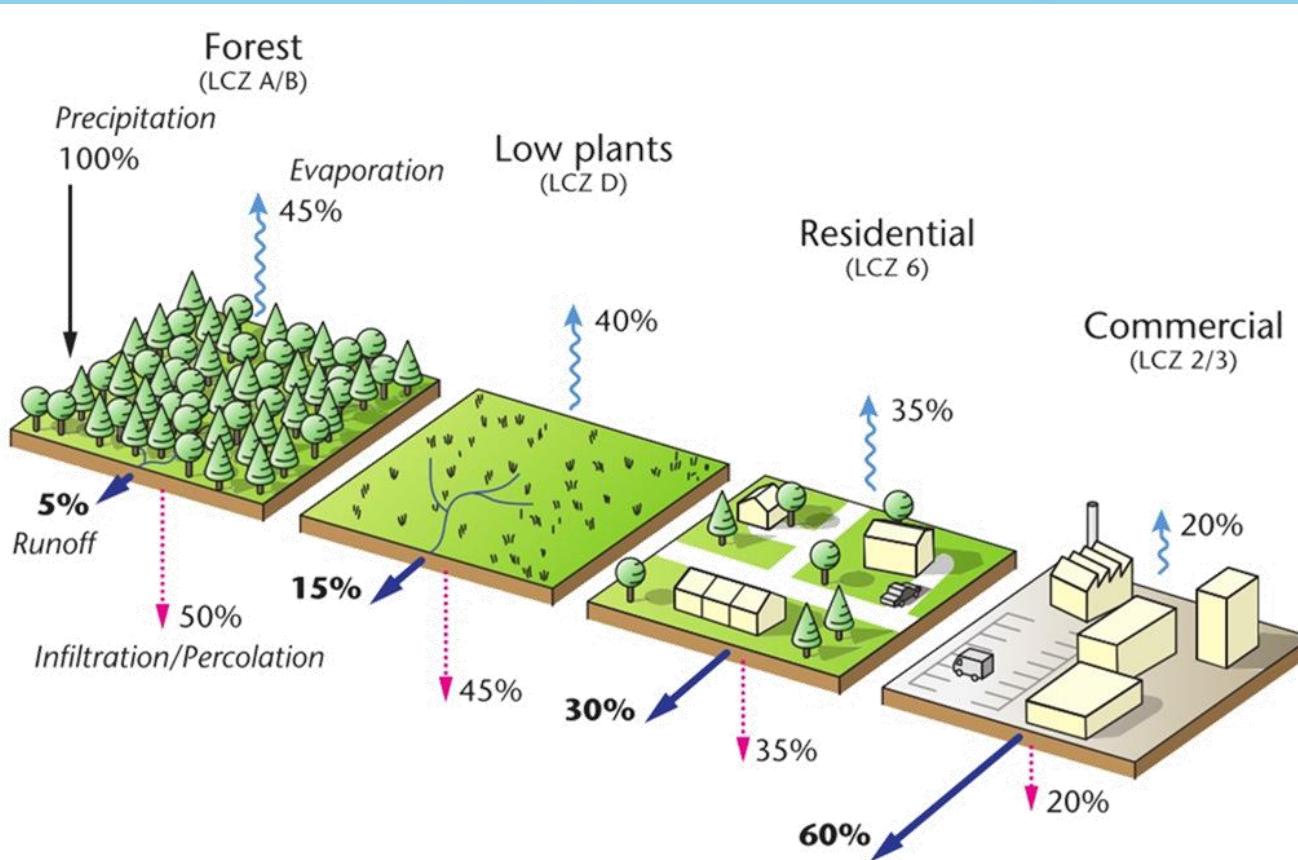


Влияние Москвы на летние суммы осадков в среднем за 10 лет (2007-2016) по данным моделирования (Varentsov et al., 2018)

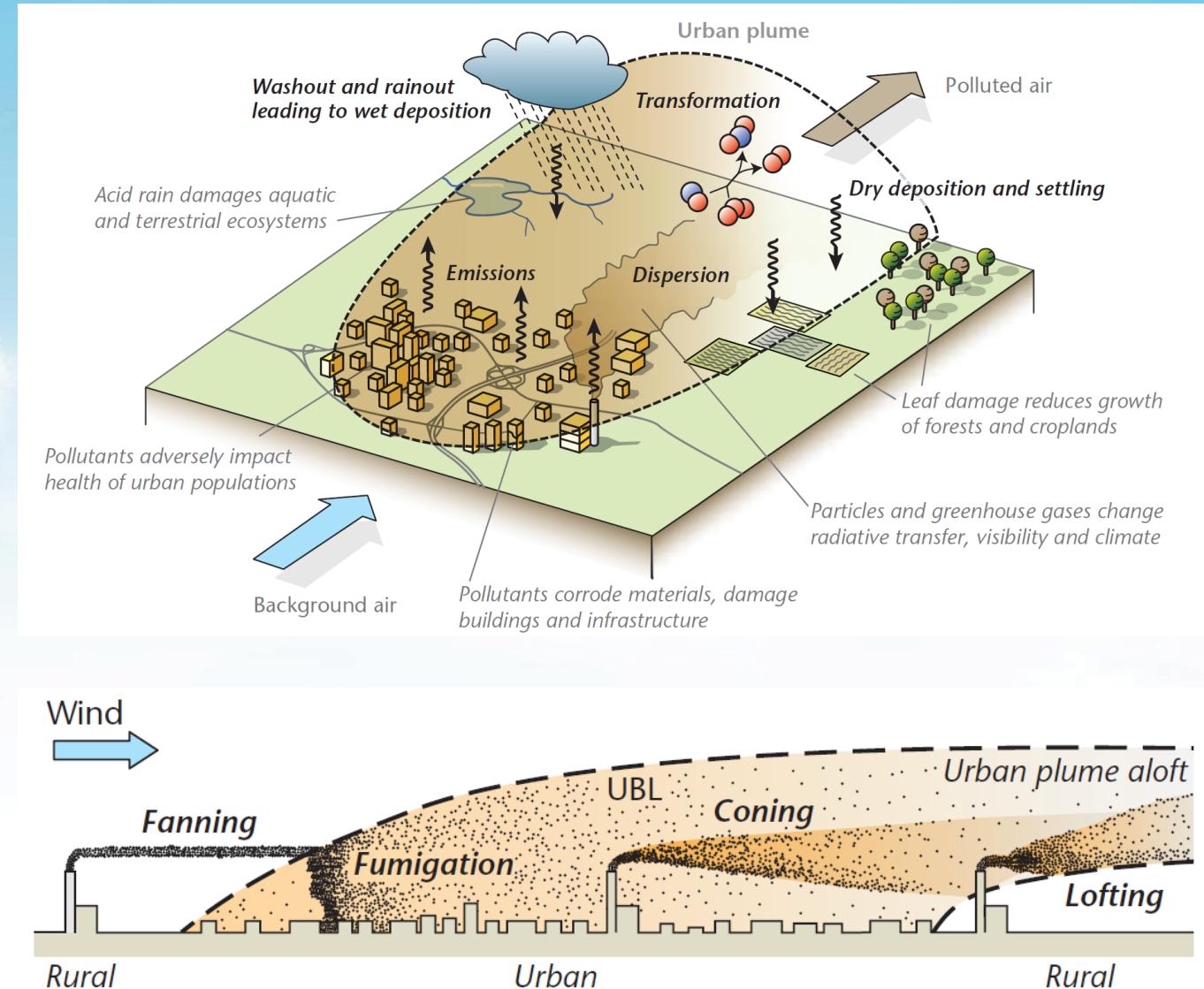
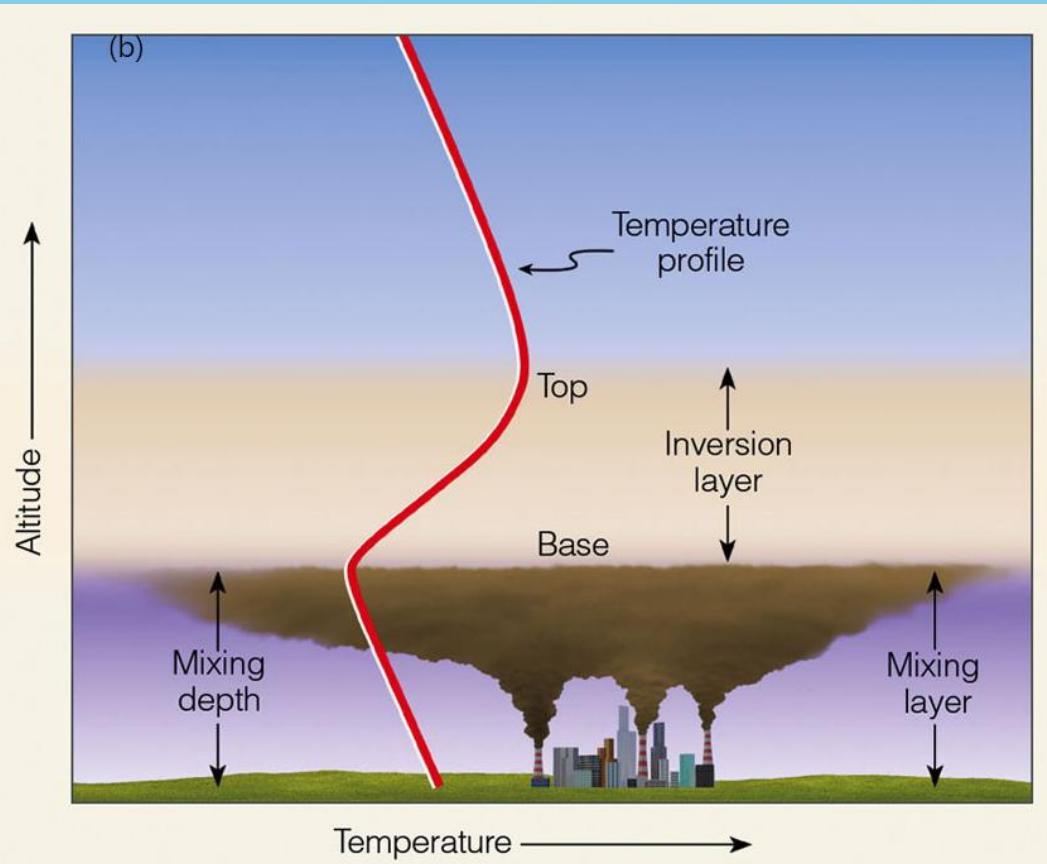


Влияние города выражено сильнее всего не для самых экстремальных, но интенсивных осадков

Гидрологические опасные явления

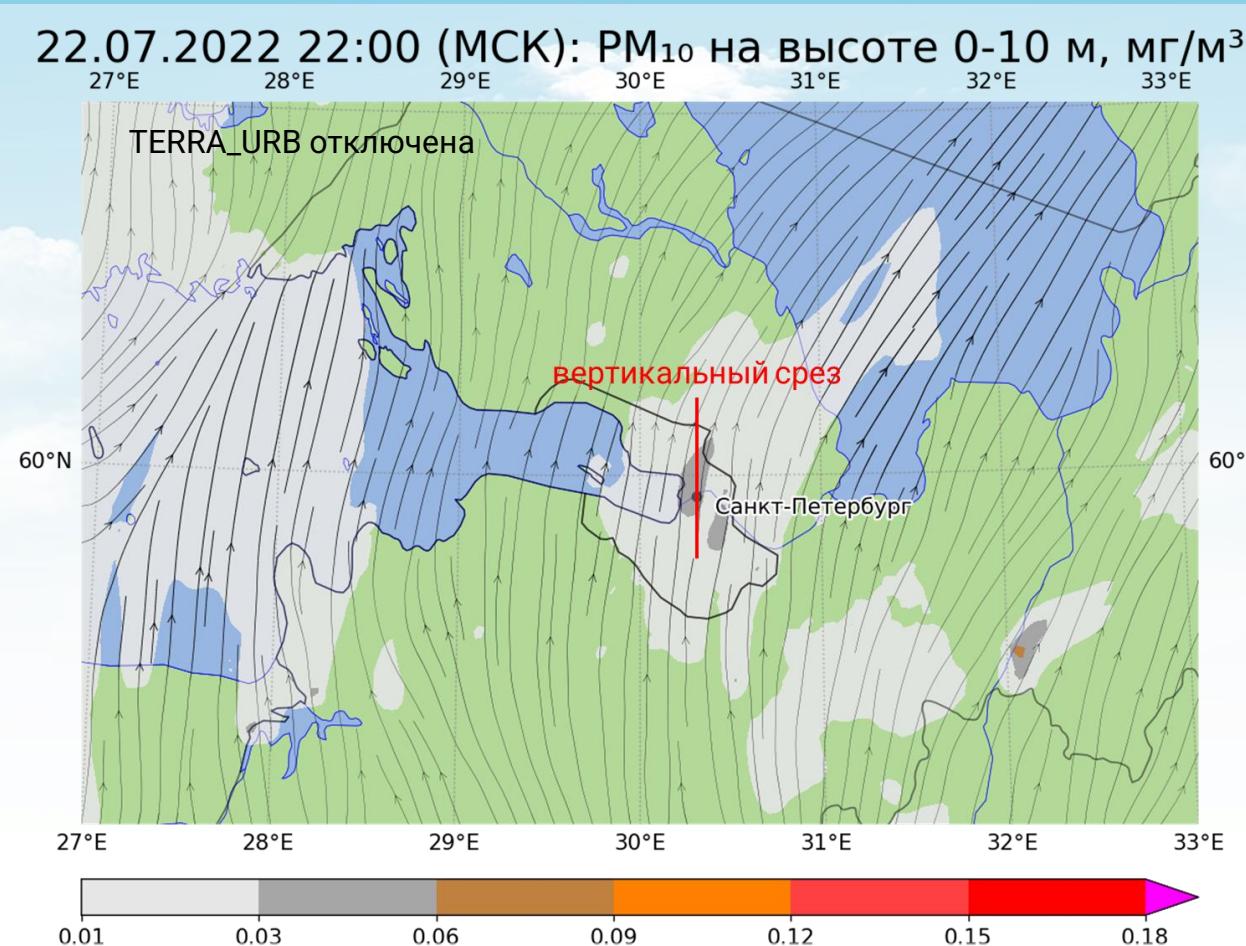


Загрязнение атмосферы

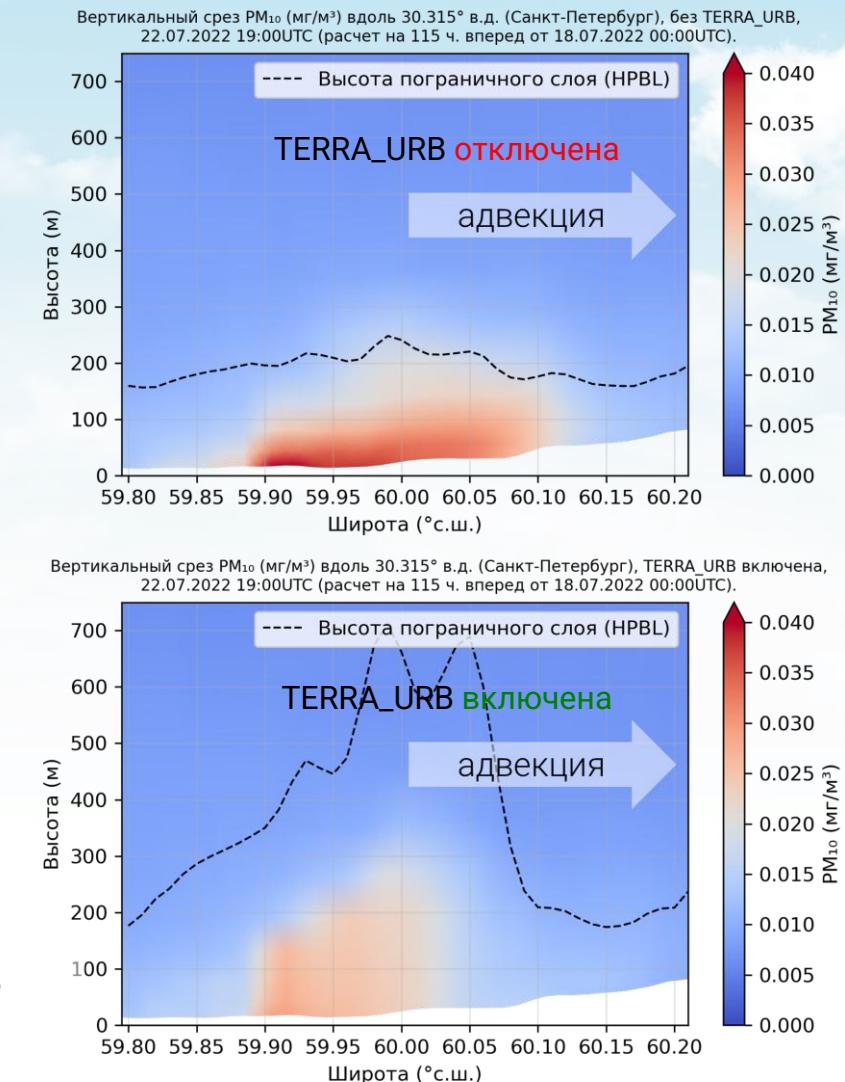


Загрязнение атмосферы

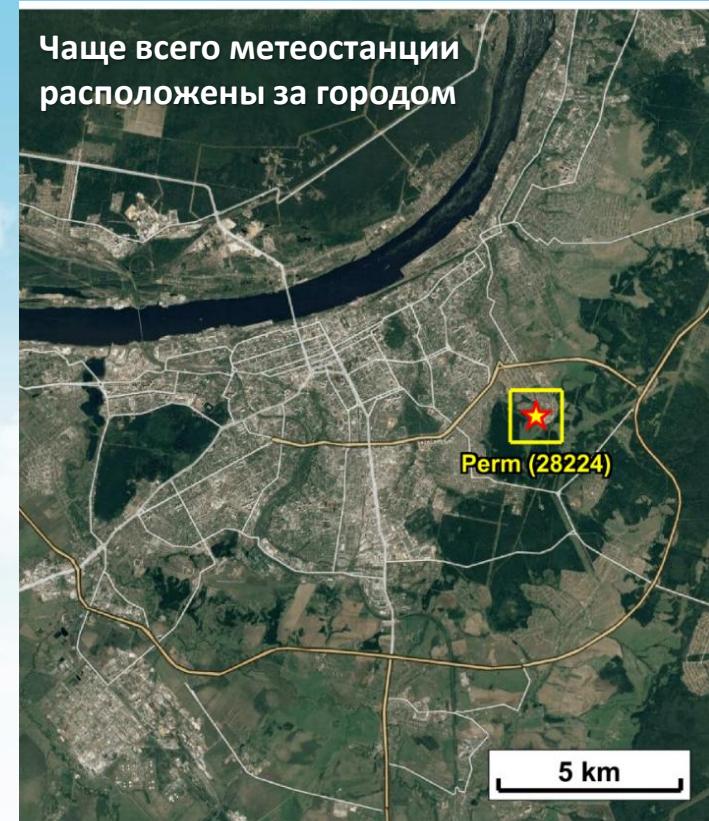
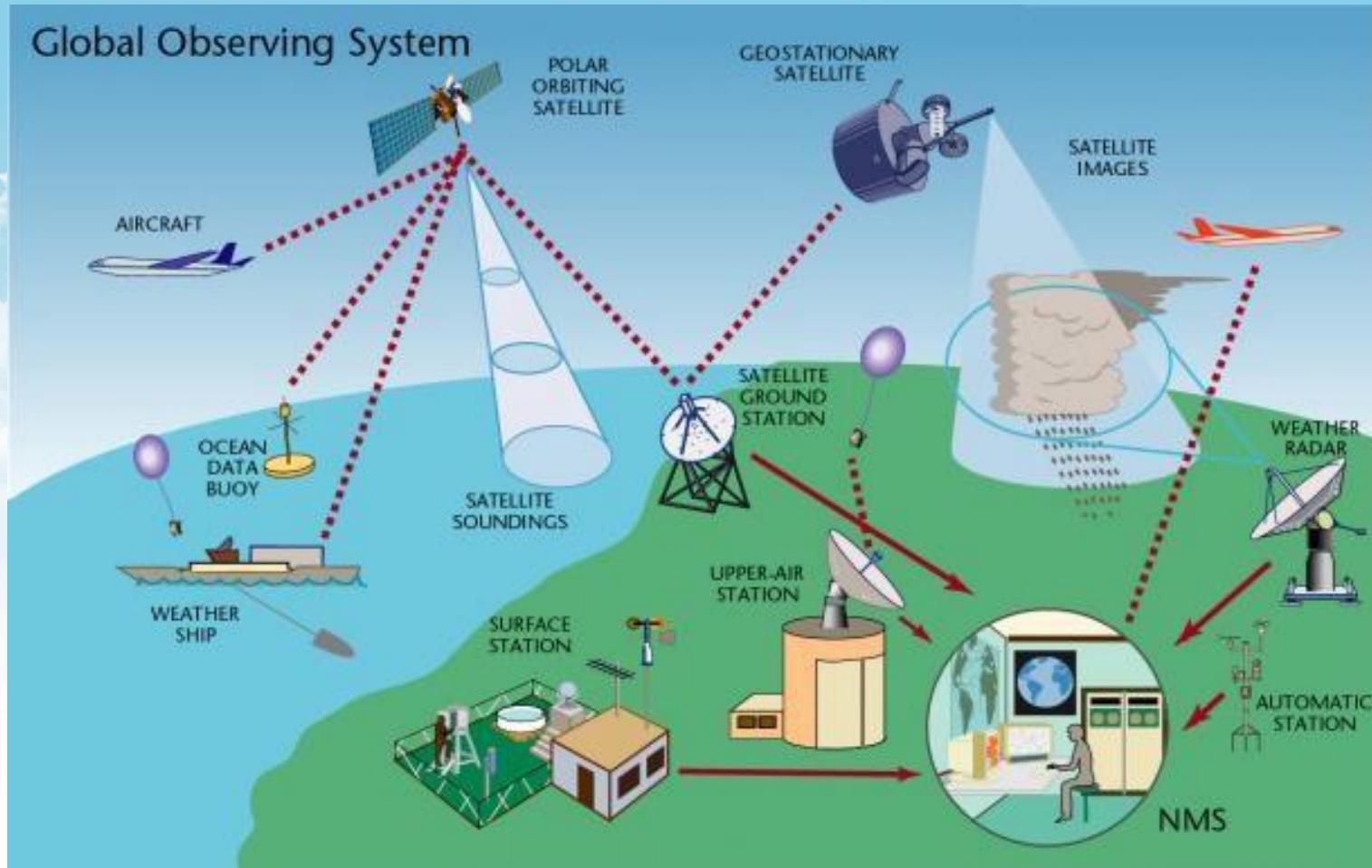
Результаты расчетов интегрированной химико-транспортной модели COSMO-ART



Результаты моделирования COSMO-ART со включенной/отключенной TERRA.URB
Автор слайда А. А. Кирсанов (ГМЦ)

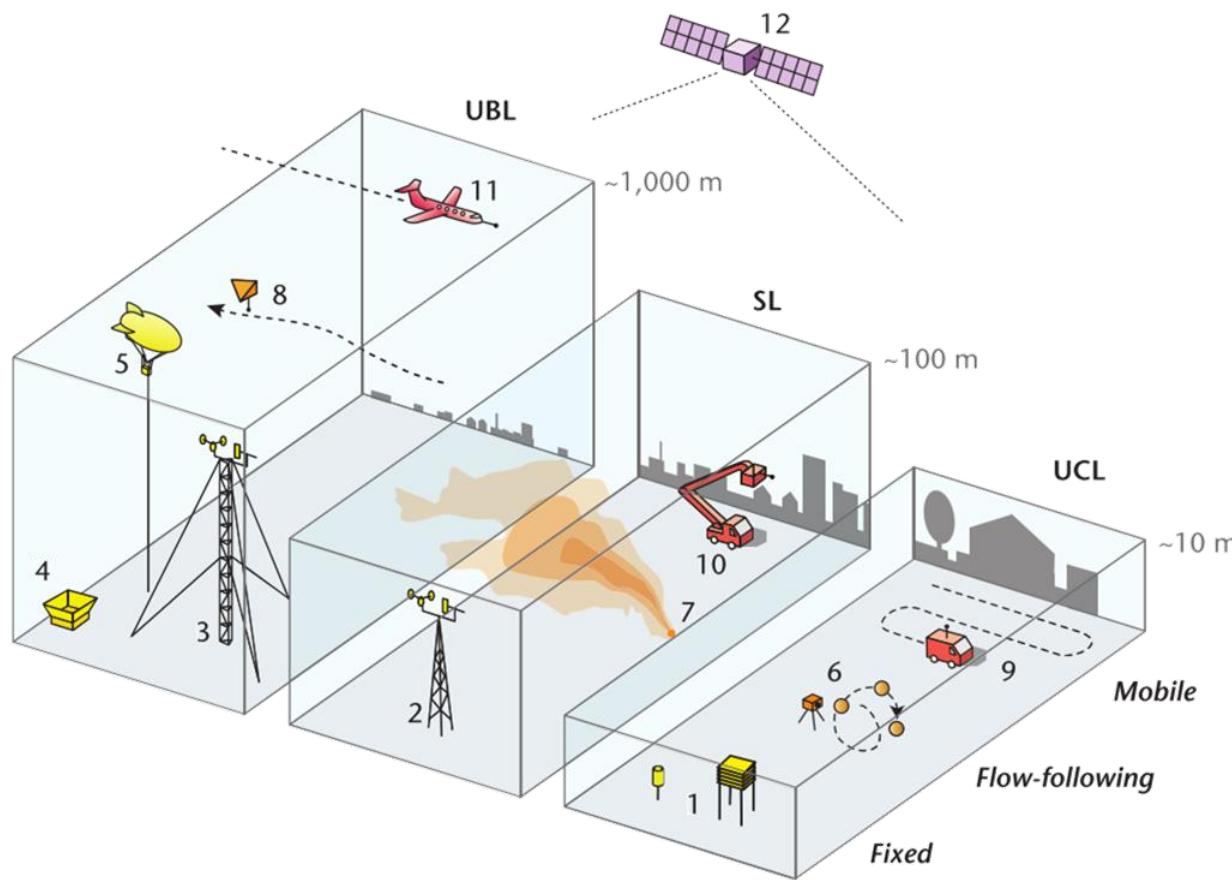


Методы исследования: наблюдения



**Только 15% крупных городов
России освещено
репрезентативными
городскими метеоданными**

Методы исследования: наблюдения

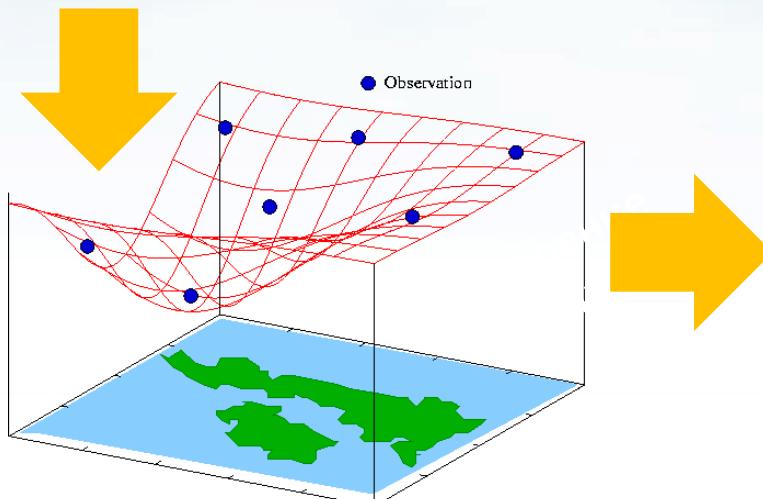


Методы исследования: моделирование



Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment for Urban Climate (COSMO)

Методы исследования: моделирование



Conservation of momentum:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_a \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$

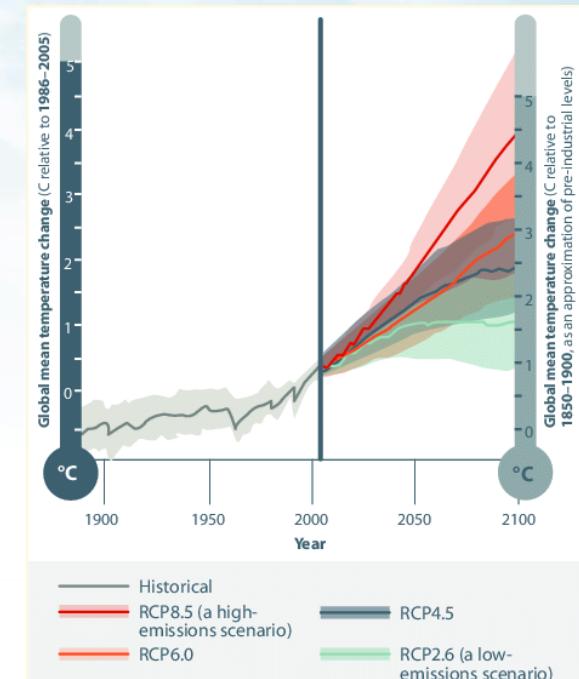
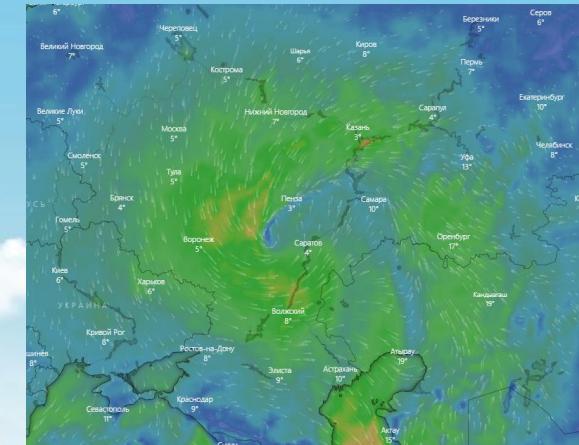
Conservation of energy:

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_v (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k \nabla T) + C + S$$

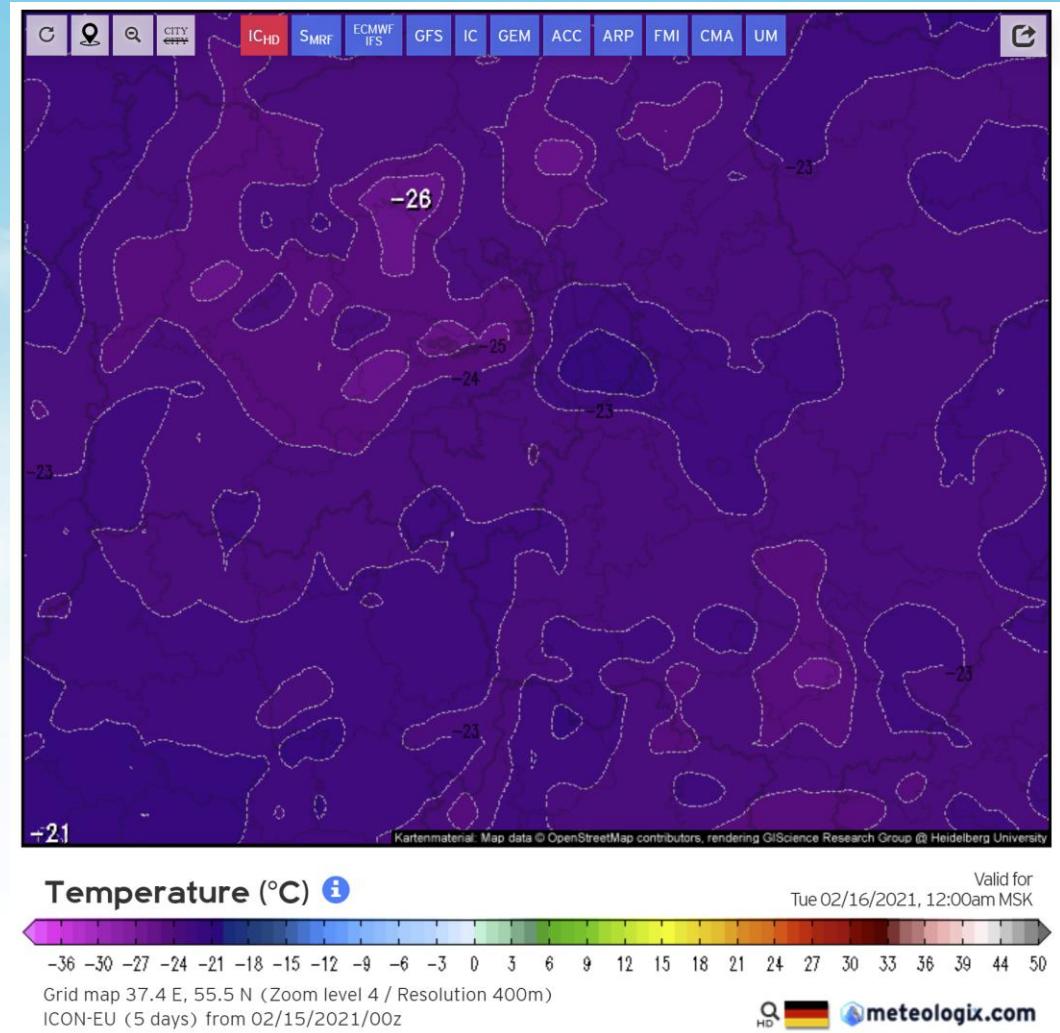
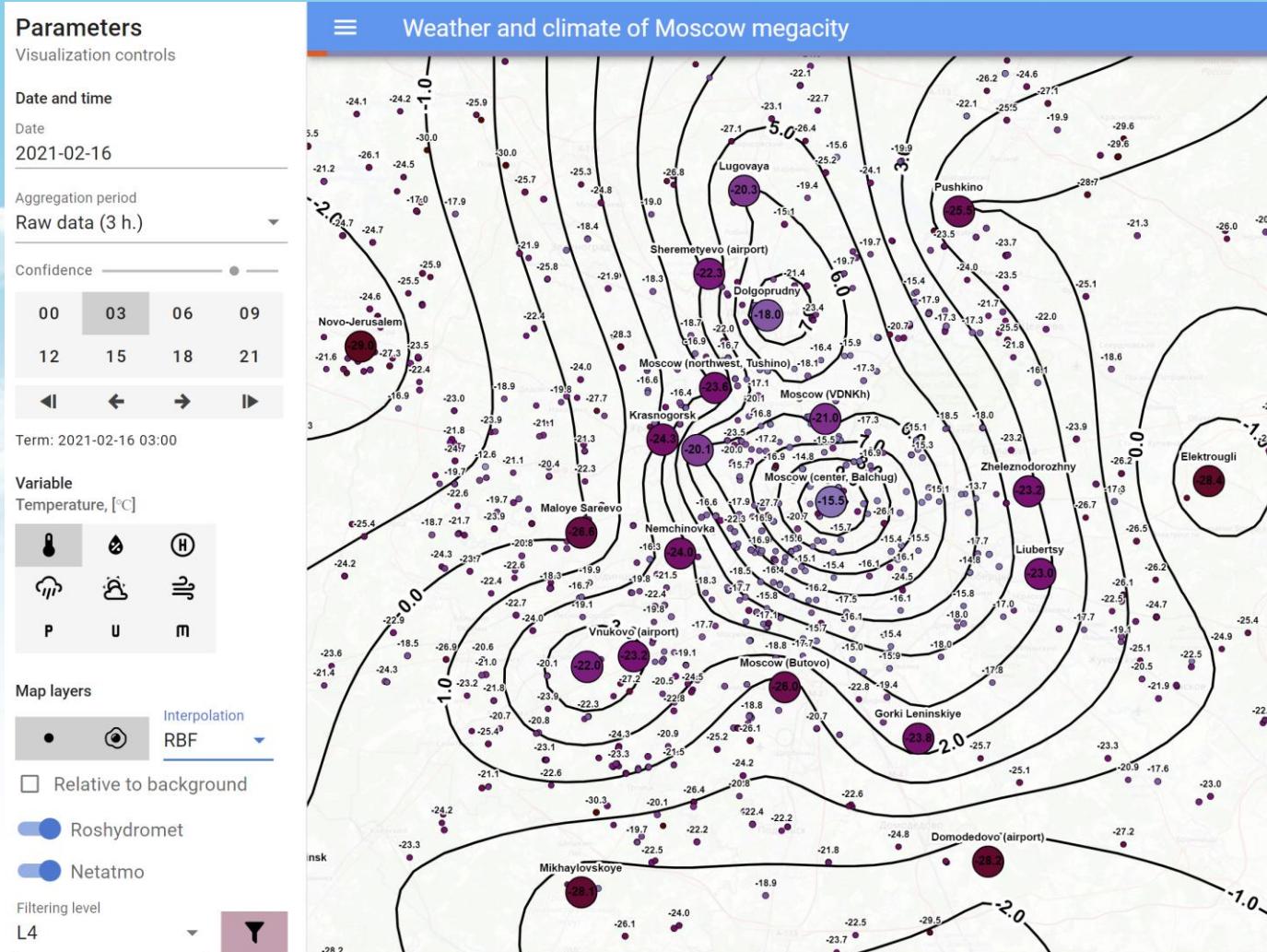
Conservation of mass:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$

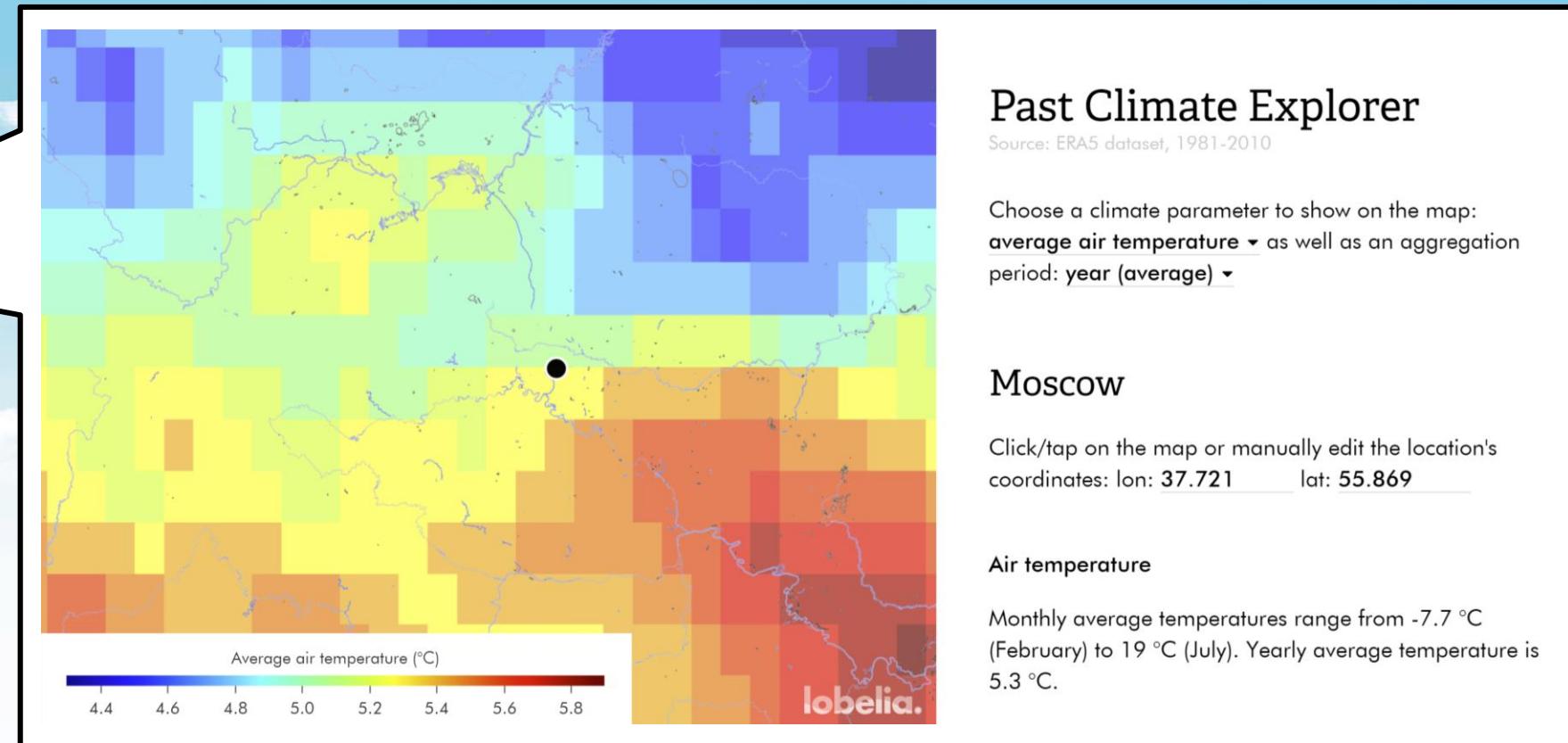
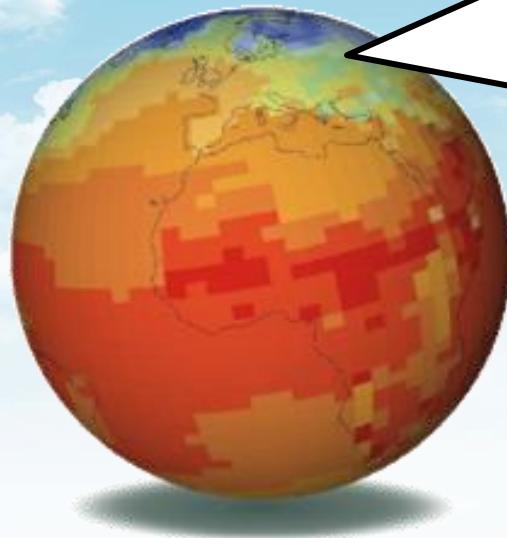
$$\frac{df_{1.5}}{dx} \approx \frac{f_2 - f_1}{\Delta x}$$



Методы исследования: моделирование

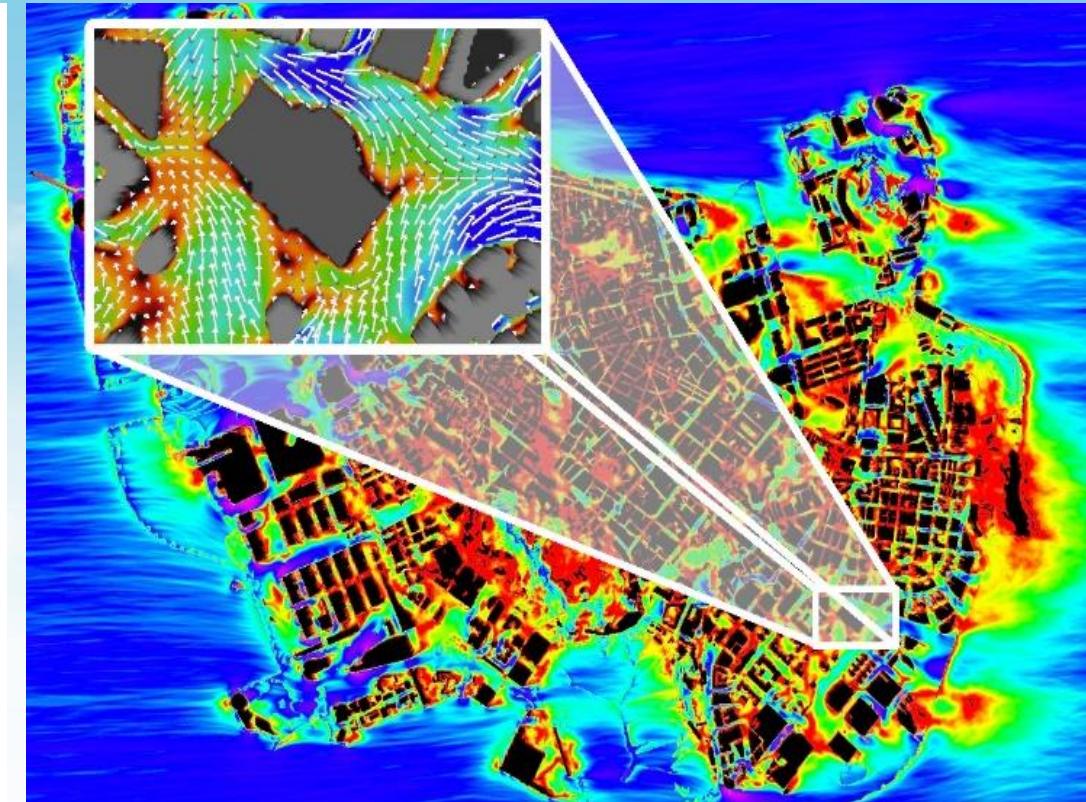
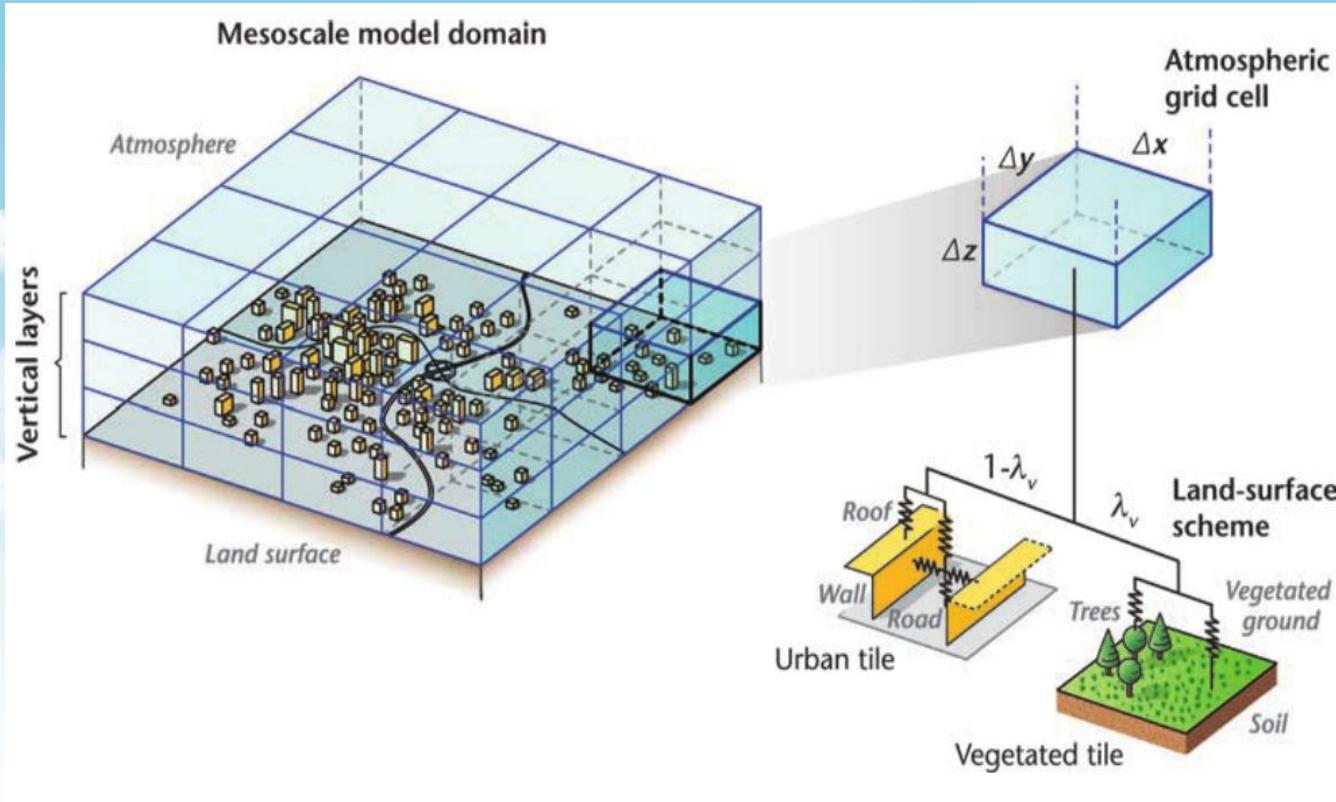


Методы исследования: моделирование



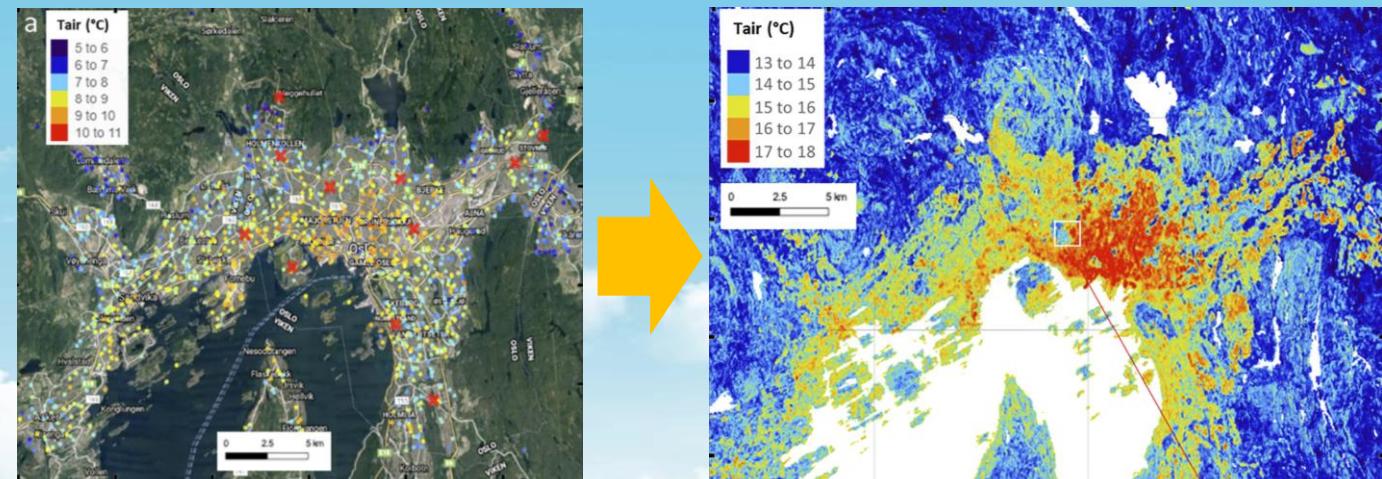
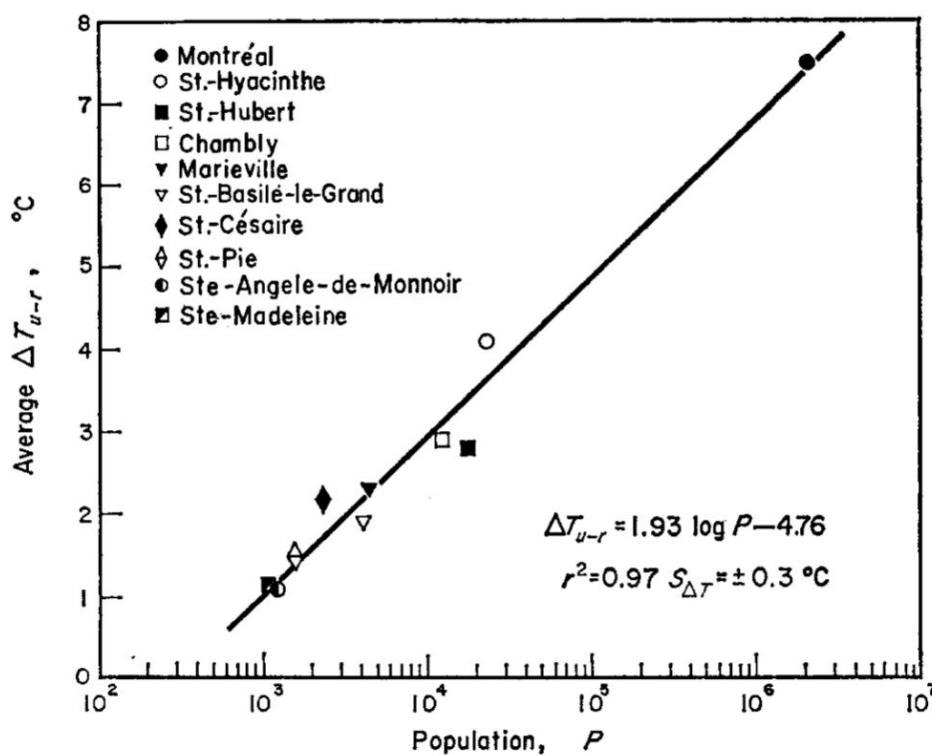
Несмотря на стремительное развитие технологий моделирования атмосферных процессов, в задачах моделирования погоды и климата города по-прежнему редко учитываются

Методы исследования: моделирование

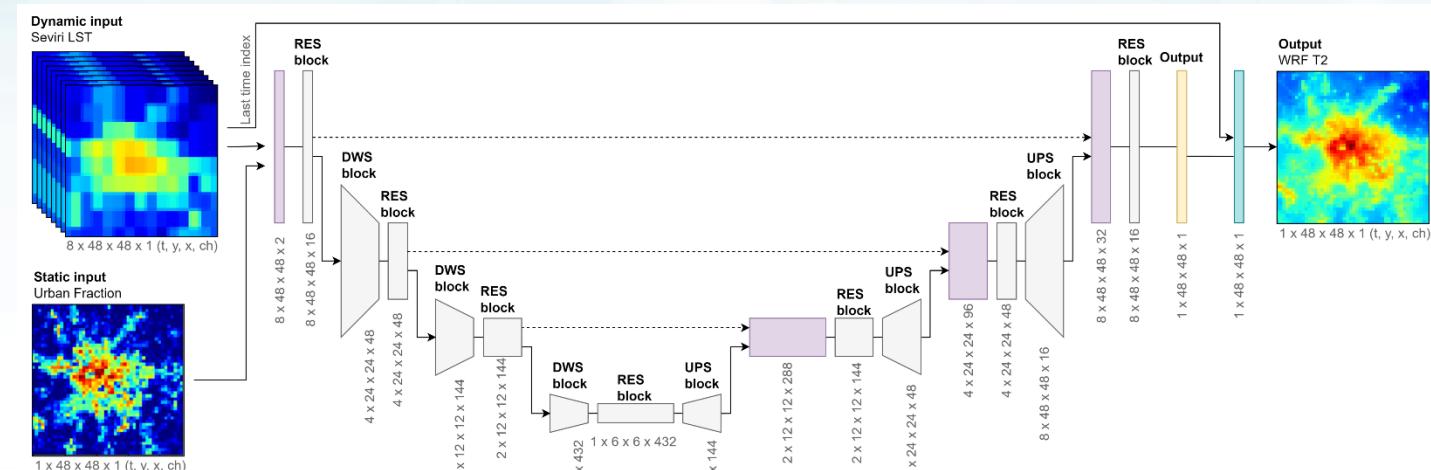


Методы исследования: моделирование*

*статистическое, включая машинное обучение



Venter et al. (2020) Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data



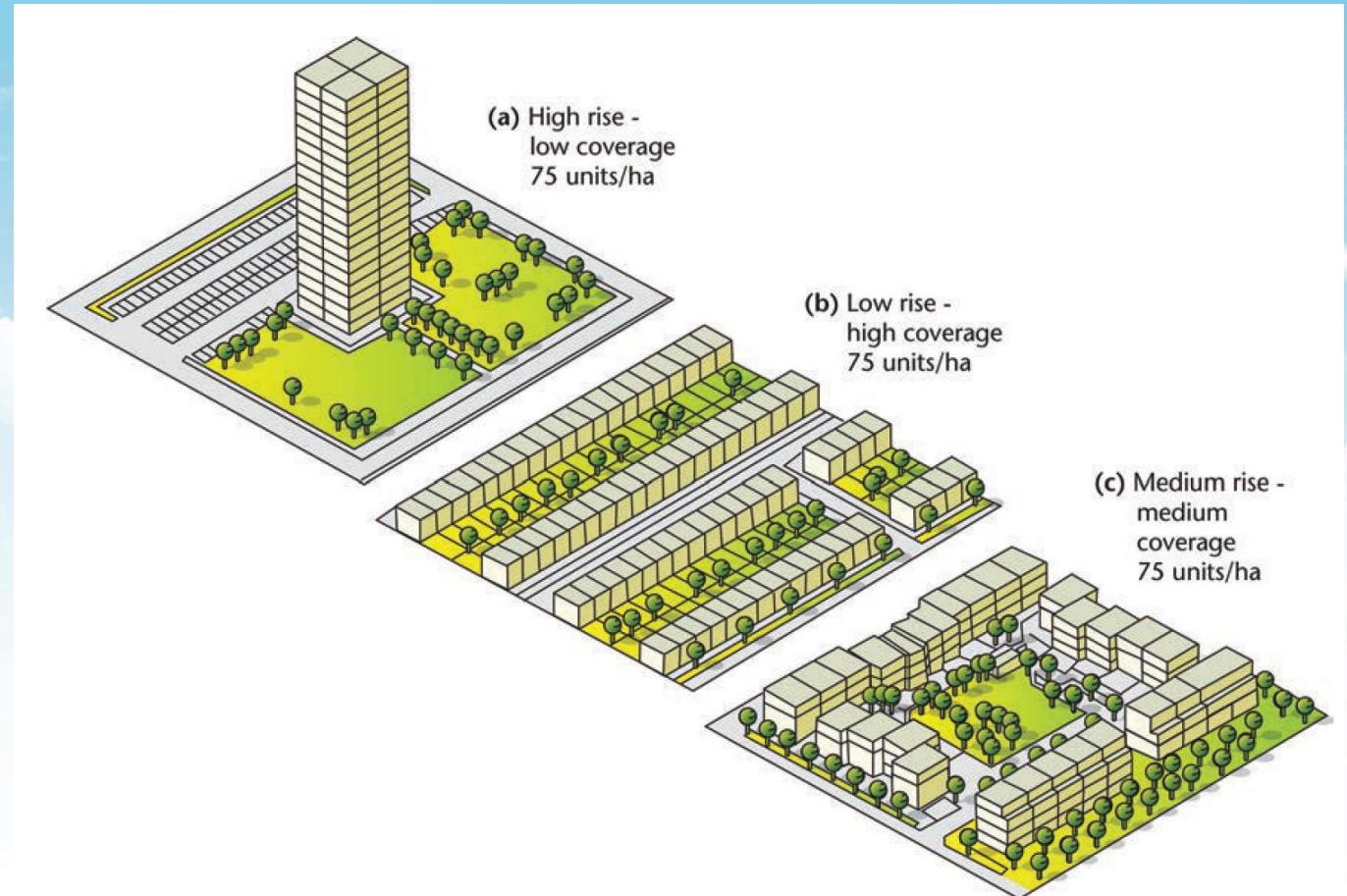
Afshari et al. (2023) Statistical Downscaling of SEVIRI Land Surface Temperature to WRF Near-Surface Air Temperature Using a Deep Learning Model

Применение знаний о городском климате

Основной причиной изучения городского климата является применение полученных знаний либо для планирования новых поселений, либо для решения климатических проблем в существующих поселениях (Oke et al., 2017)

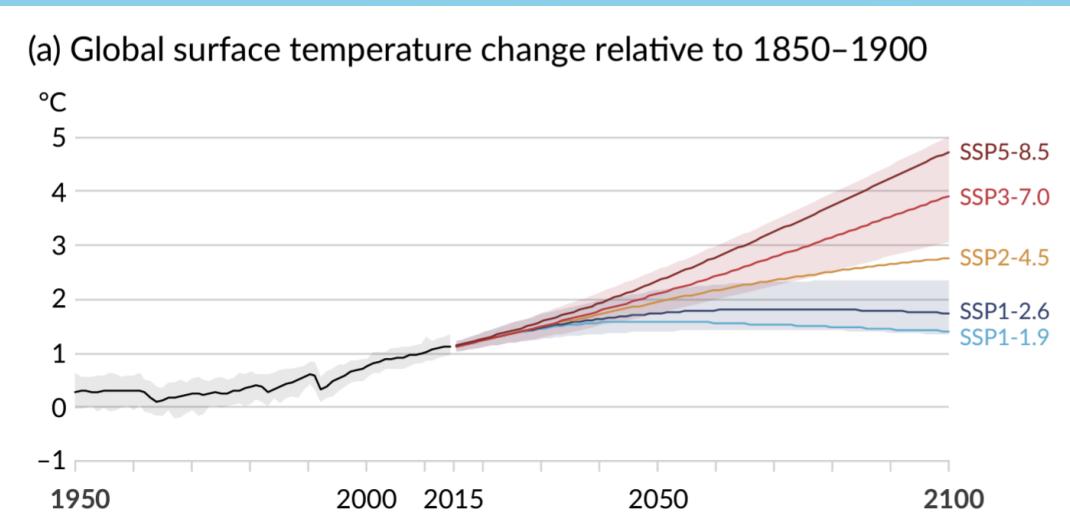
Мы можем применить наши здания (и опирающиеся на знания модели) для:

- Идентификации проблем
- Предупреждения о проблемах
- Поиска оптимальных способов решения проблемы



Применение знаний о городском климате

Адаптация и митигация



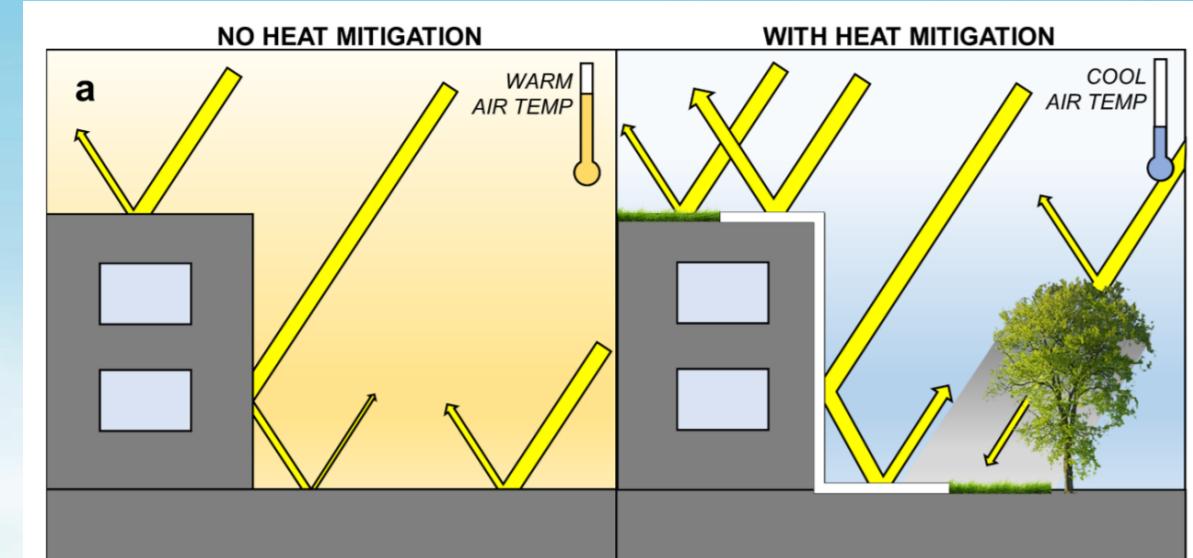
Mitigation

Action to reduce emissions that cause climate change



Adaptation

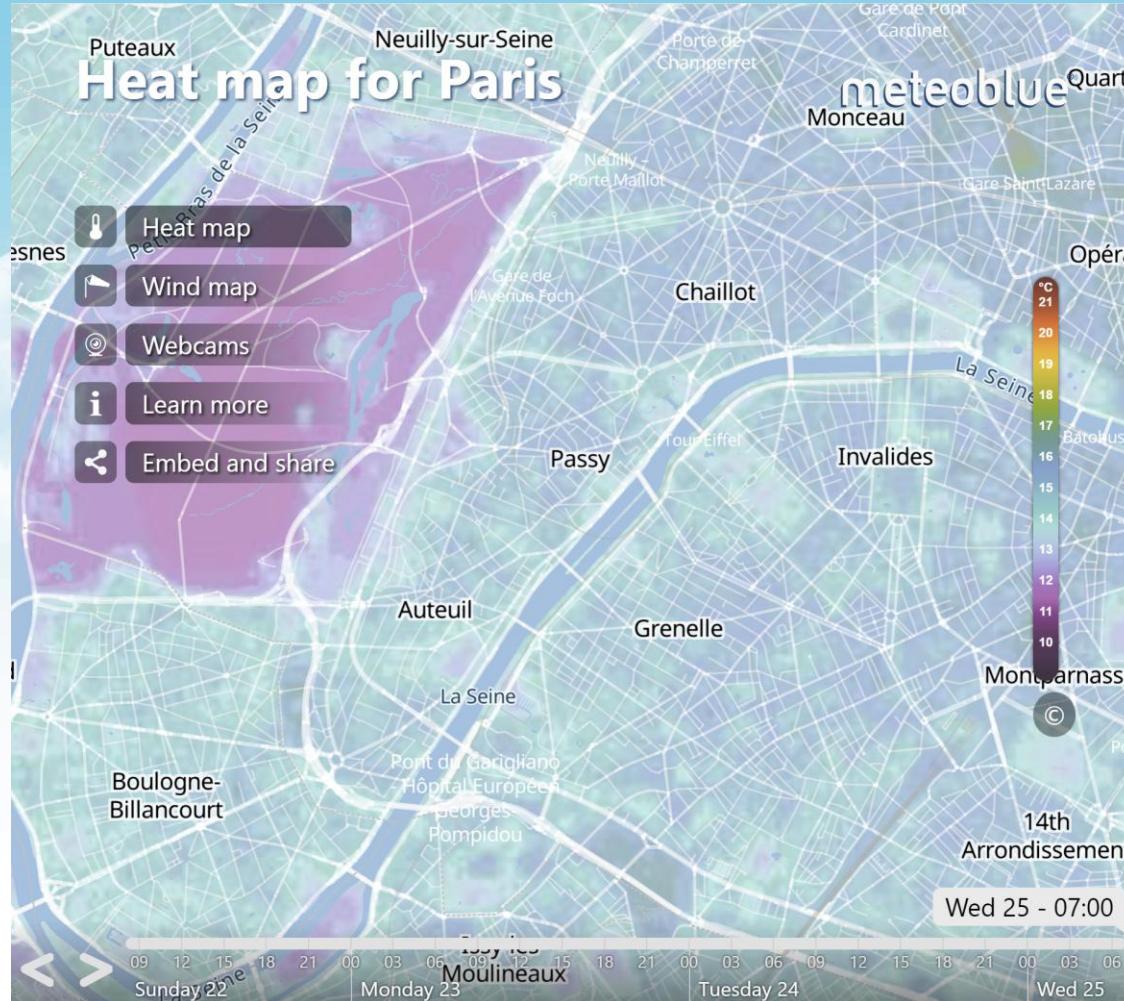
Action to manage the risks of climate change impacts



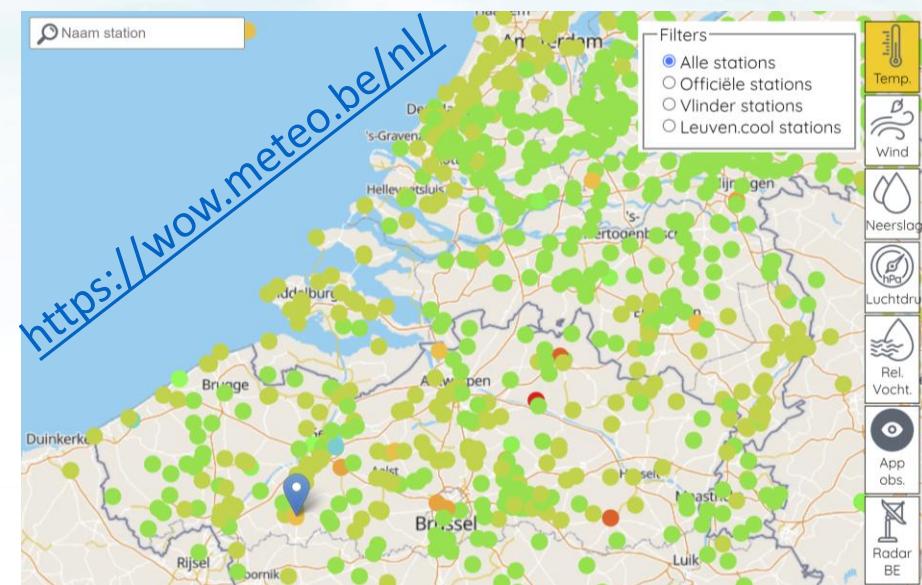
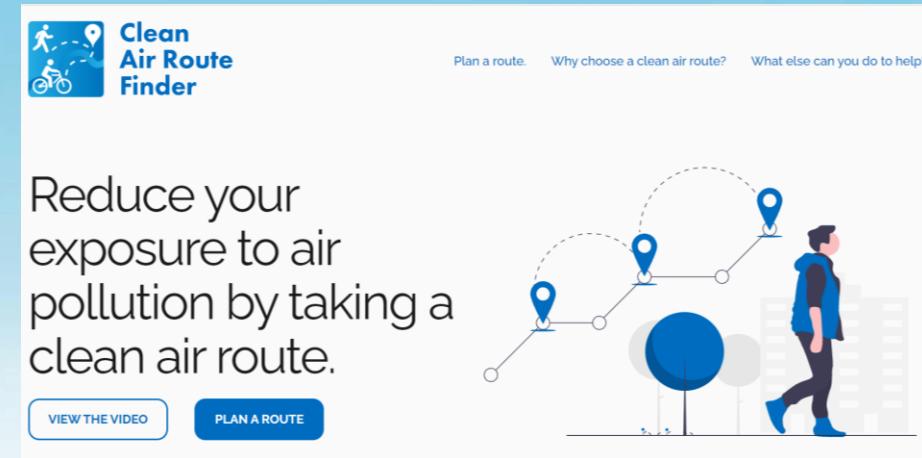
Митигация (смягчение) локальных особенностей городского климата, например снижение температуры в городе за счет озеленения, как **адаптация** к глобальным изменениям климата.

Применение знаний о городском климате

Городские погодно-климатические сервисы

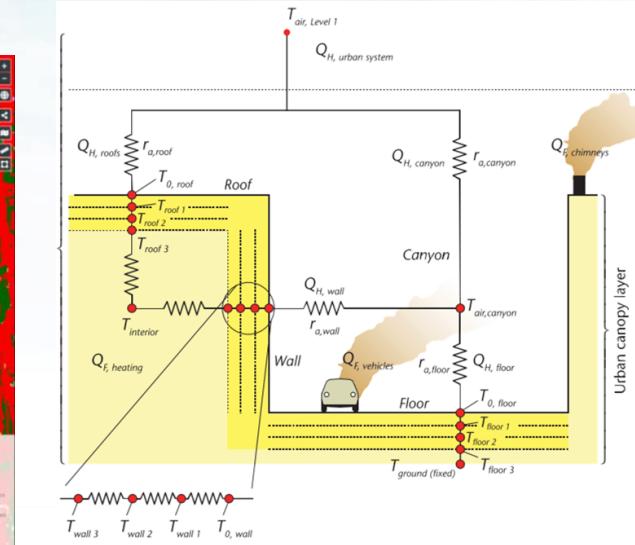
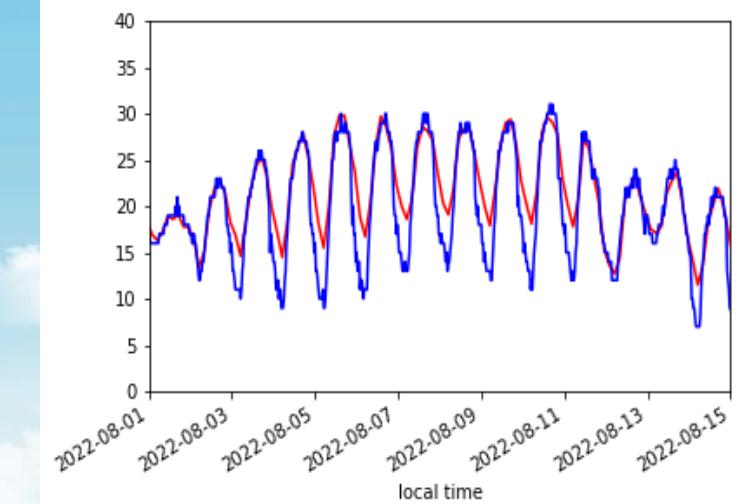
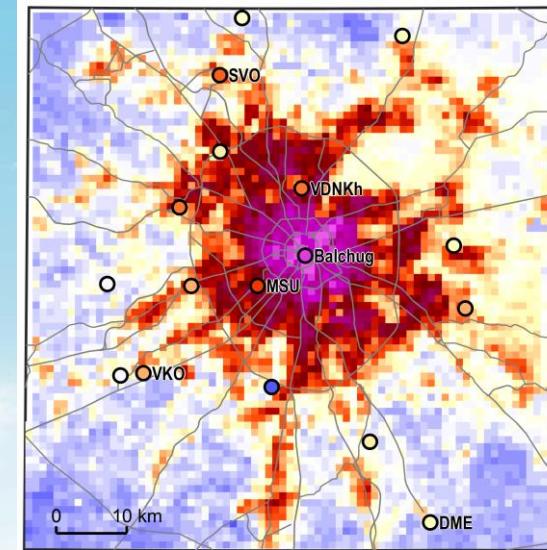


<https://www.meteoblue.com/en/products/cityclimate/>



Что будет далее в нашем курсе

- Особенности интерпретации данных наблюдений и моделирования для городов
- Анализ данных различных форматов
- Пространственные данные для городских климатических исследований
- Различные модели для различных задач и масштабов
- Практические приложения знаний о городском климате





The end

Вопросы?

Командное задание

Мозговой штурм на тему «Как знания об особенностях городского климата можно использовать для решения проблем населения и экономики?»

Работая в командах по 3-4 человека, необходимо:

- Сформулировать проблему, которая:
 - имеет социально-экономическое значение для крупных современных городов (важна для населения / инфраструктуры / бизнесе и т.д.)
 - решение которой требует знания о погоде и/или климате
 - эффективность решения можно повысить, есть учитывать **локальные особенности городского климата**
- Предложить, какие методы и инструменты можно применить для ее решения
- Сформировать, какой именно эффект (финансовый, экологический и пр.) может быть достигнут
- Подготовить про все это краткое устное сообщение (не более 5 минут)
- Исходить из следующих предположений: город X с населением более 100К человек расположен в умеренных или субарктических широтах одной из развитых стран; не учитывается в моделях прогноза погоды и климата, данные метеорологических наблюдений есть только для загородной метеостанции.

Пример: проблема подачи необходимого для отопления города количества тепла котельными и ТЭЦ

«Тихий» мозговой штурм



Домашнее задание

ДЗ №1

- С учетом опыта командной работы, необходимо написать эссе на эту же тему («Как знания об особенностях городского климата можно использовать для решения проблем населения и экономики?»)
- Необходимо использовать ссылки на российскую и зарубежную литературу
- Объем эссе 3-5 стр.
- Использование генеративного ИИ допускается, но должно быть явно указано
- Срок сдачи – следующее занятие (21 января)

ДЗ №2 (не ждем, а готовимся)

- Озадачится выбором города для выполнения последующих практических работ (также приветствуется использование литературы)