



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ГЕОГРАФИИ
И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Курс «Моделирование климата городов» 2025, лекция №5

Виды моделей городского климата

Михаил Иванович Варенцов

mvarentsov@hse.ru

В предыдущих сериях...

Ключевые характеристики моделей

- **Разрешение модели**
 - Горизонтальный шаг сетки Δx
 - Масштаб воспроизводимых процессов $\approx 8 \Delta x$, макро-, -мезо и микромасштабные модели

- **Допущение гидростатики (да/нет):**

$$\cancel{\frac{dw}{dz}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \cancel{F_z}$$

- **Описание турбулентности:**

- Осреднение по Рейнольдсу (RANS)
- Large Eddy Simulations (LES)
- Direct Numerical Simulations (DNS)

- **Охват по пространству:**

глобальные/региональные

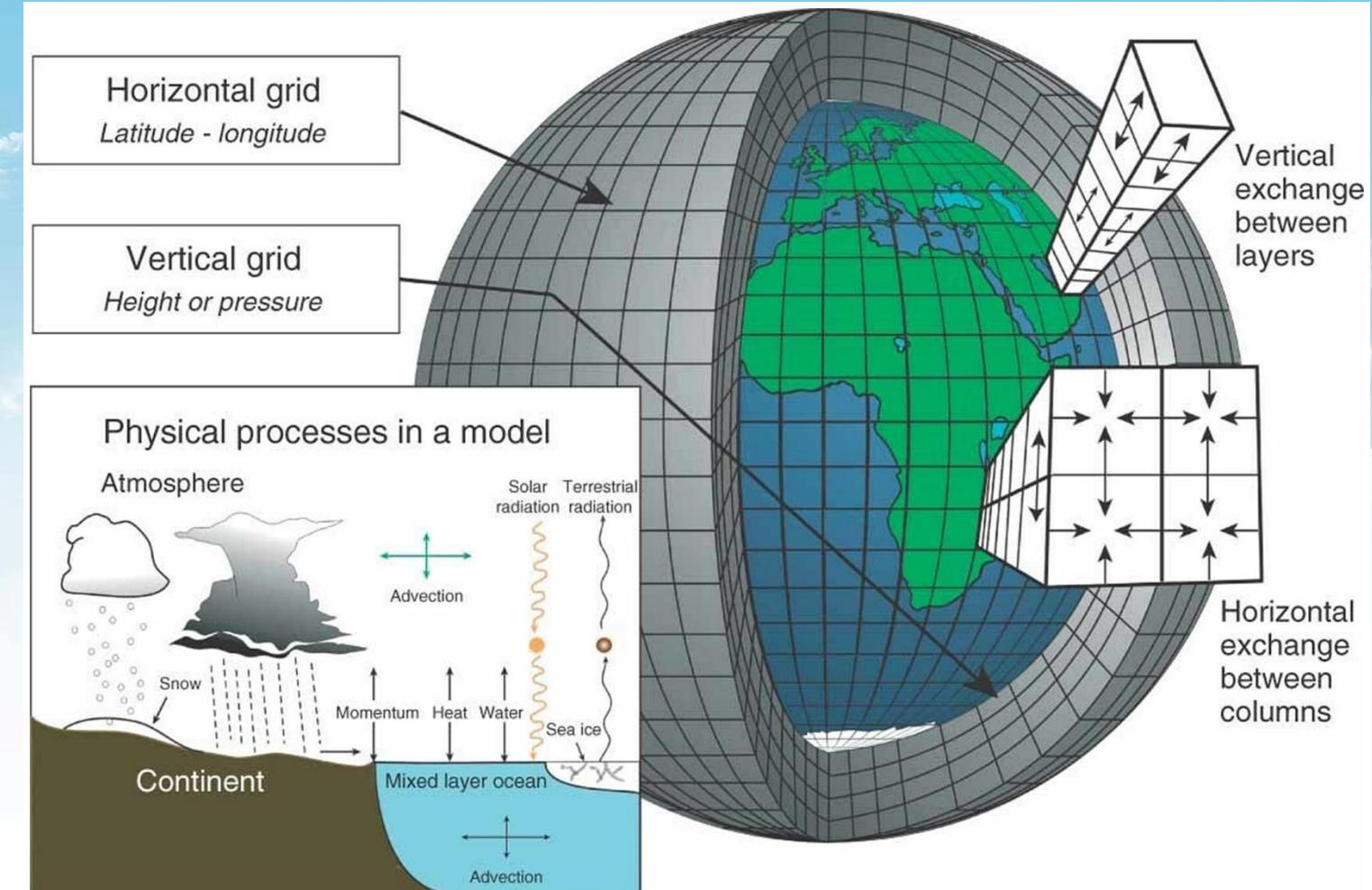
- **Система координат**

- **Тип горизонтальной сетки**

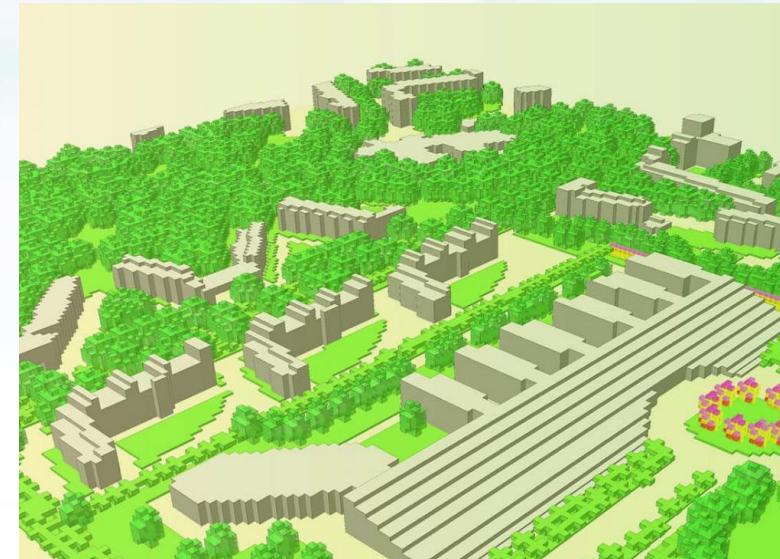
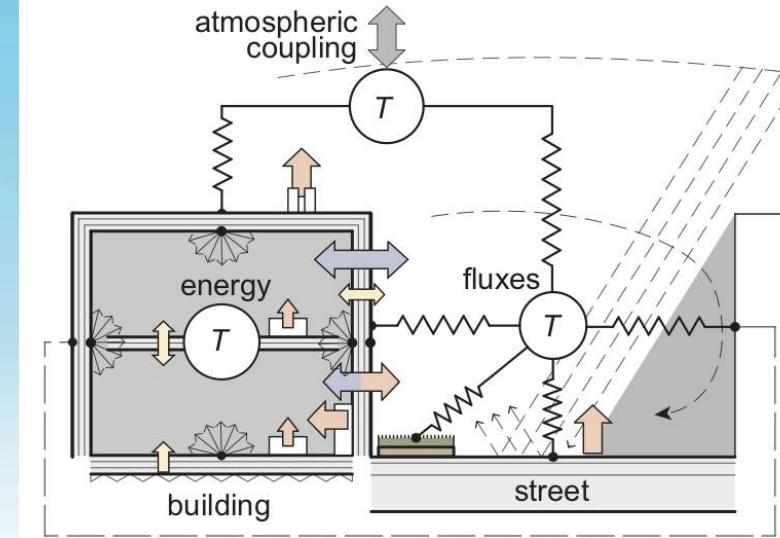
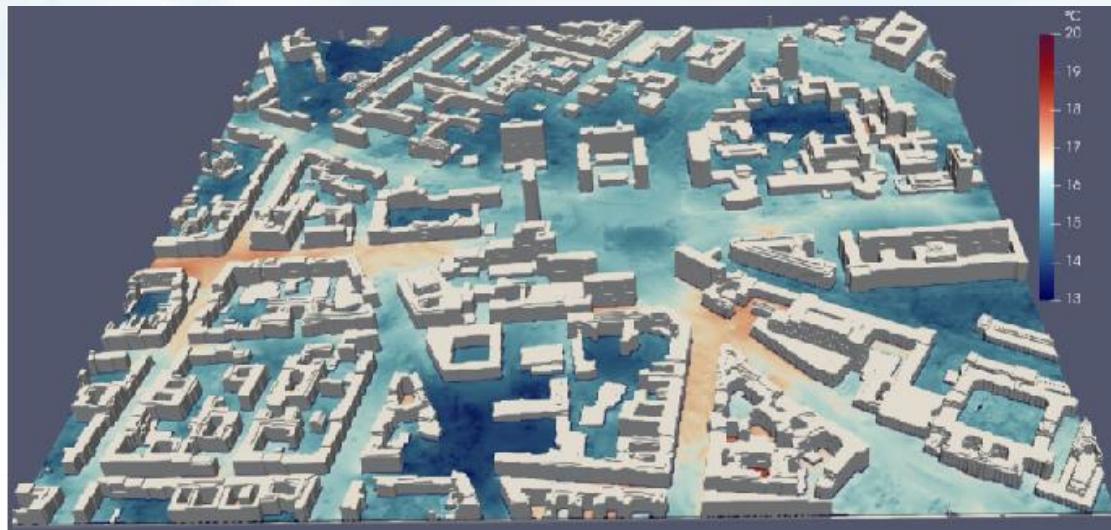
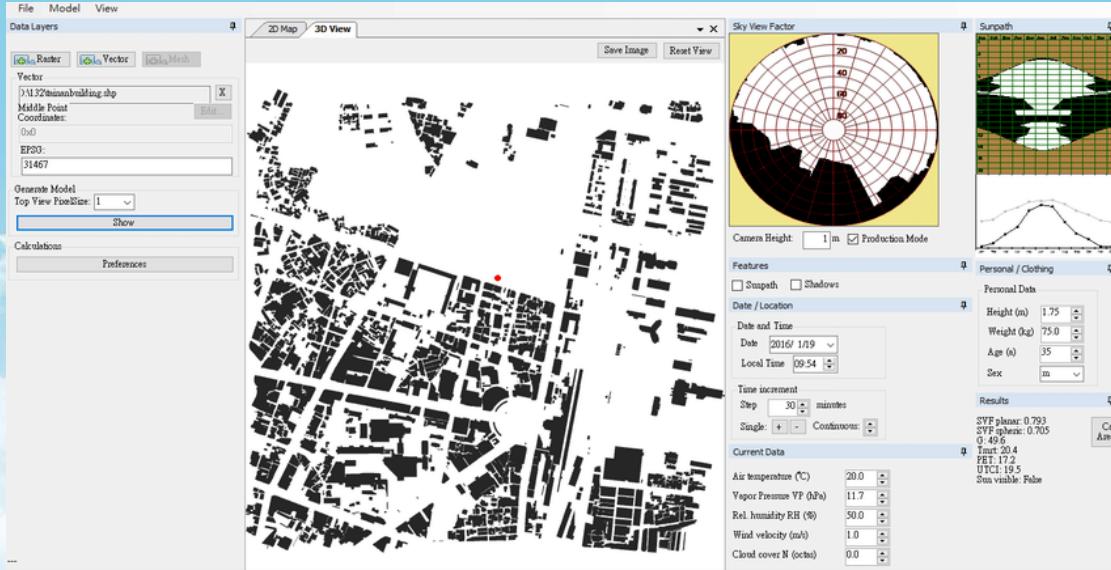
- **Тип вертикальной сетки**

- **Набор описываемых процессов**

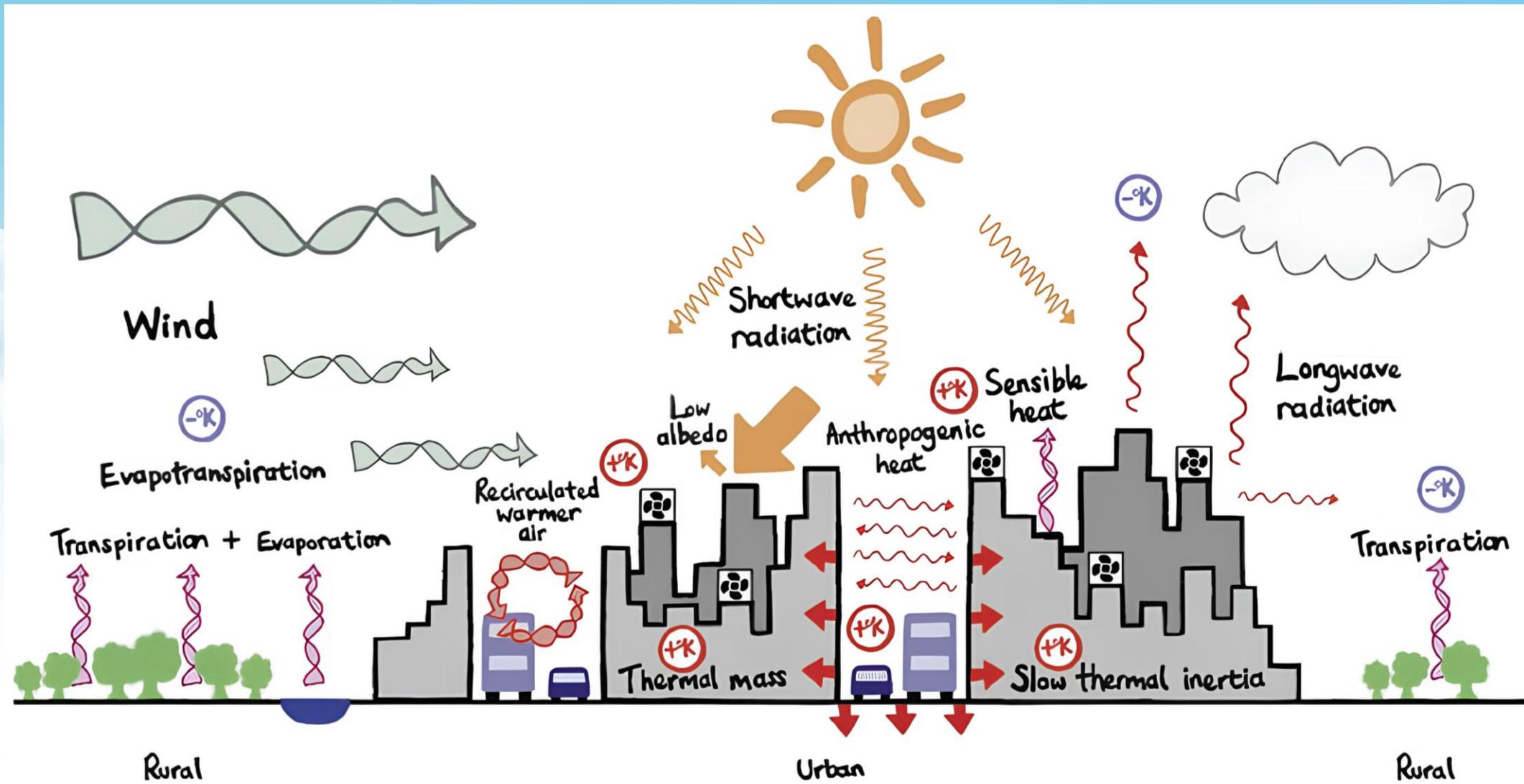
- Модели атмосферы,
- Модели климата
- Модели Земной системы



Что вообще называют моделью городского климата?



Какие процессы нужно моделировать?



Как классифицировать различные модели?

□ Пространственный масштаб моделируемых процессов

- Микромасштабные модели (здания явно разрешаются)
- Мезомасштабные модели (здания не разрешаются)

□ Размерность модели

- Локальные модели (0D/1D)
- Двумерные (2D, XZ/XY)
- Трехмерные (3D)

□ Сложность модели по количеству описываемых процессов:

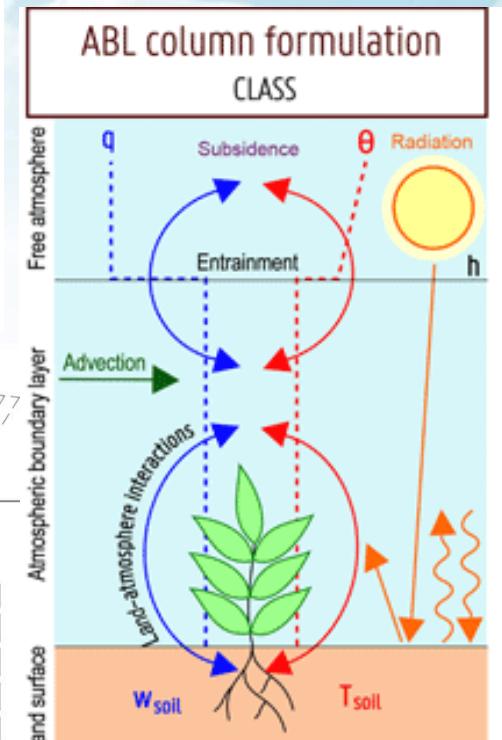
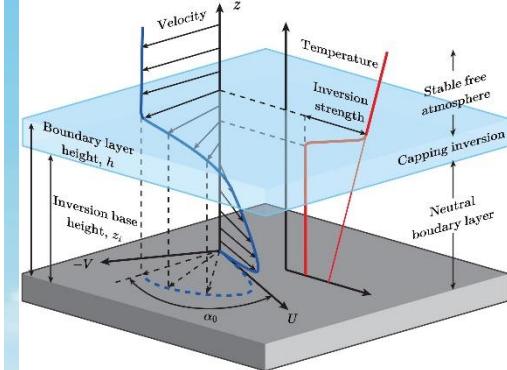
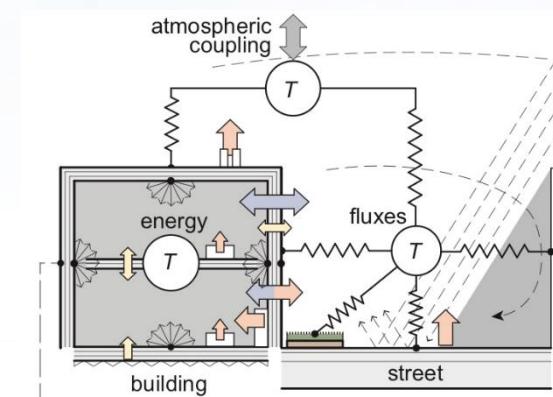
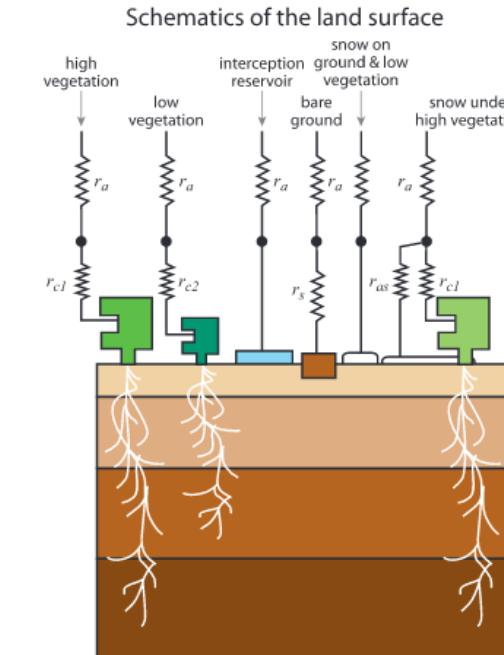
- «Совместные» модели атмосферы/погоды/климата
- Модели пограничного слоя атмосферы
- Модели деятельного слоя суши (land surface models)
- Модели городского полога (urban canopy models)
- Модели отдельных процессов (перенос радиации, энергетический баланс зданий, термический комфорт человека...)

□ Описание ветра и турбулентности:

- Отсутствует в принципе
- Осреднение по Рейнольдсу (RANS)
- Вихреразрешающие модели (LES - Large Eddy Simulations)
- Direct Numerical Simulations (DNS)

□ Принцип построения модели:

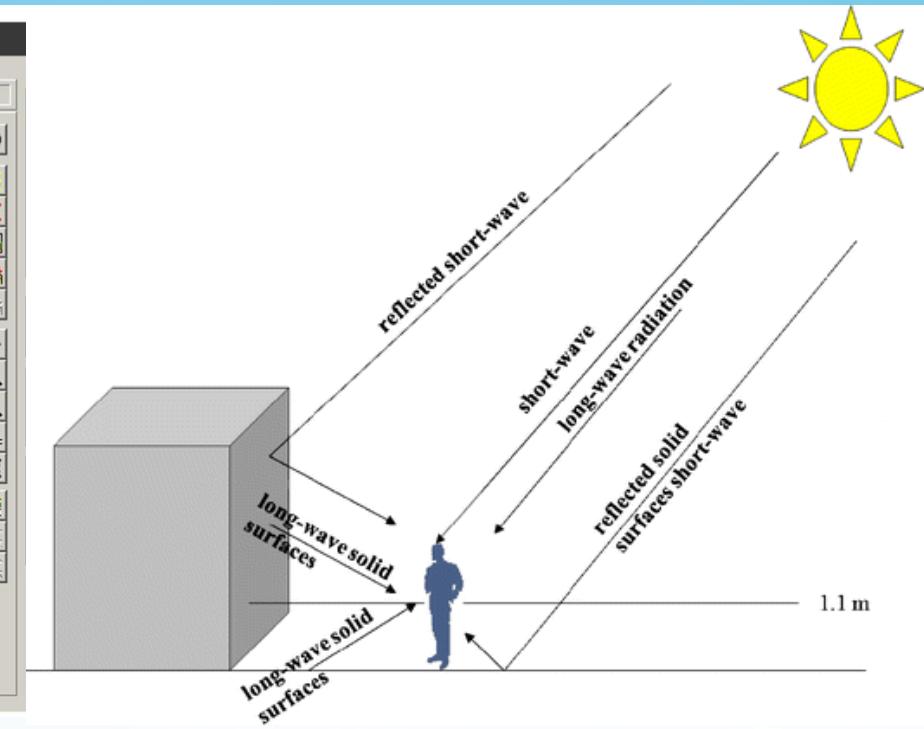
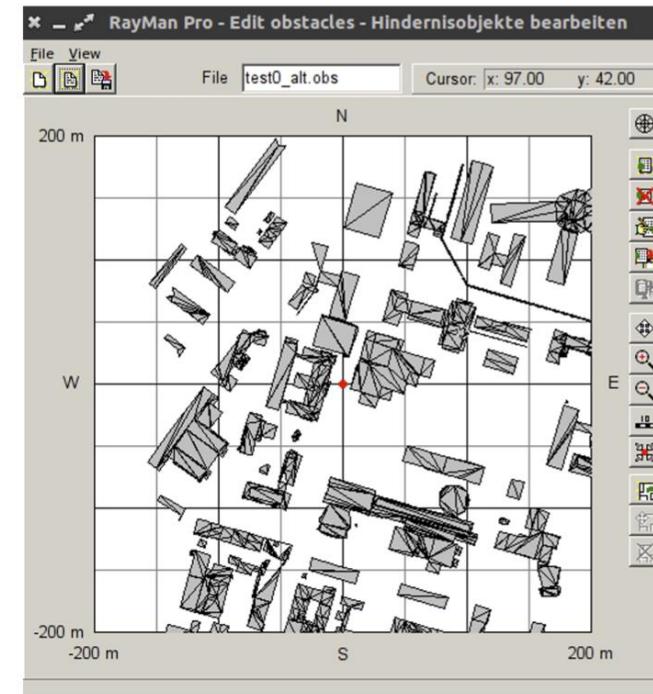
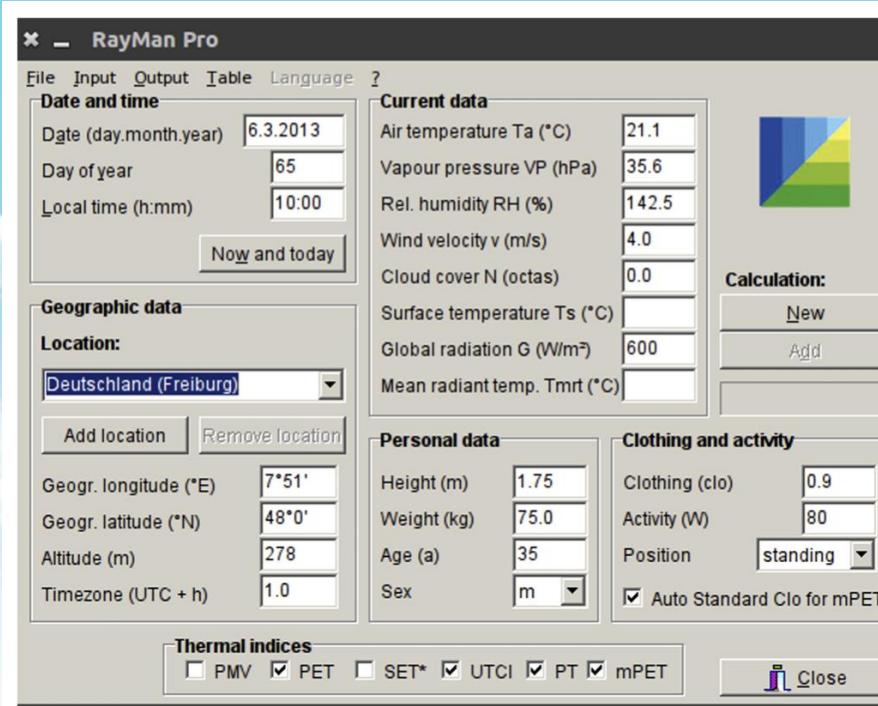
- физика (численное моделирование, гидродинамика)
- физика (параметризации)
- статистика, включая машинное обучение



Примеры моделей различных видов



Модели радиации в городской среде

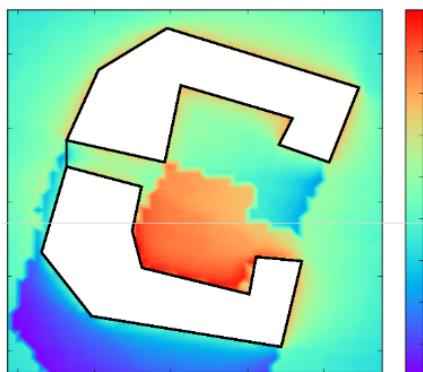


Сайт модели: <https://www.urbanclimate.net/rayman/index.htm>

Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51, 323–334 (2007).

Matzarakis, A., Rutz, F. & Mayer, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 54, 131–139 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>

Модели радиации в городской среде

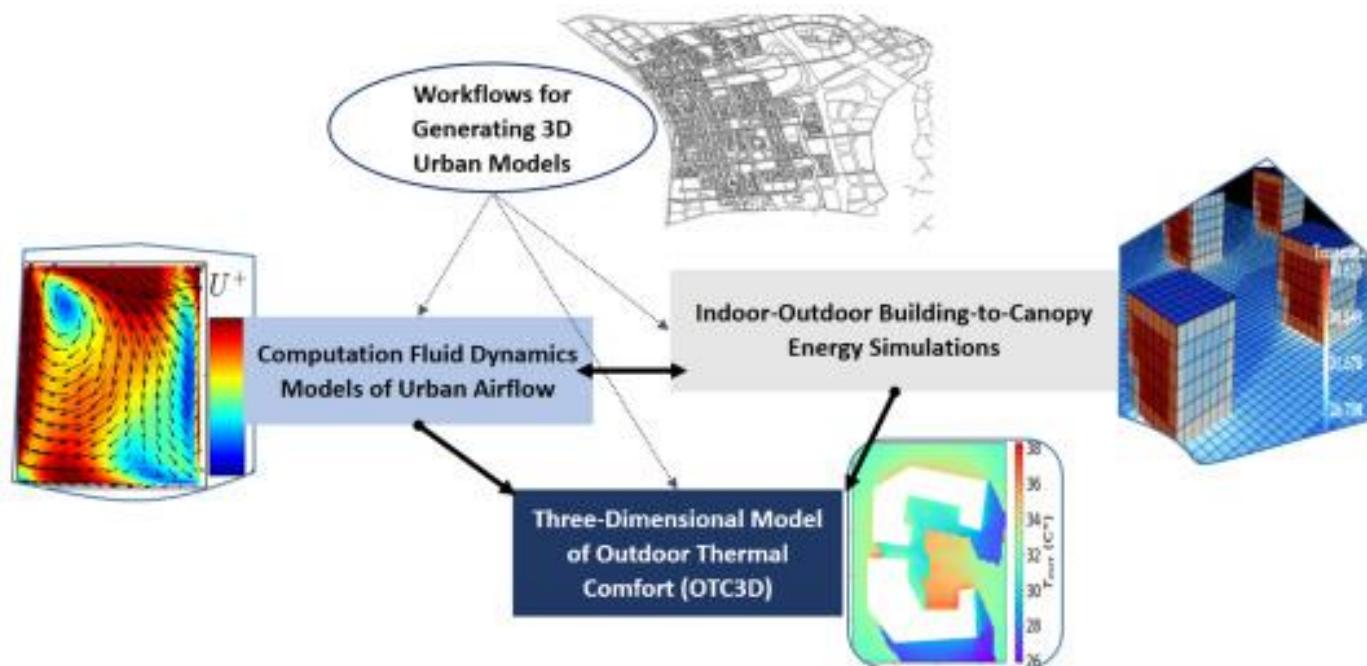


Outdoor Thermal Comfort in 3D (OTC3D)

[Description](#)

[Motivations](#)

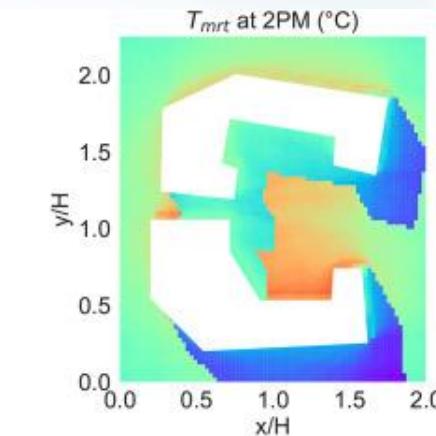
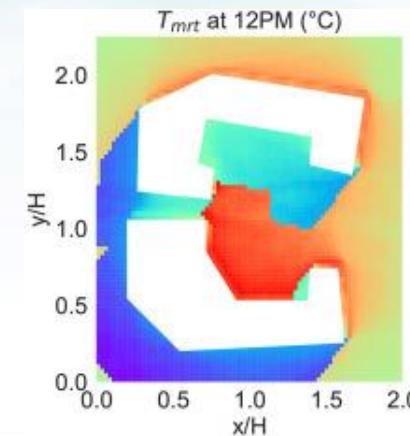
[Installation of OTC3D](#)



Outdoor Thermal Comfort in 3D is a numerical model for calculating the *spatial variability* of outdoor thermal comfort (OTC) in urban areas. OTC is currently described as **Standard Effective Temperature**, which is a comprehensive thermal comfort metric that represents the human response to the thermal environment.

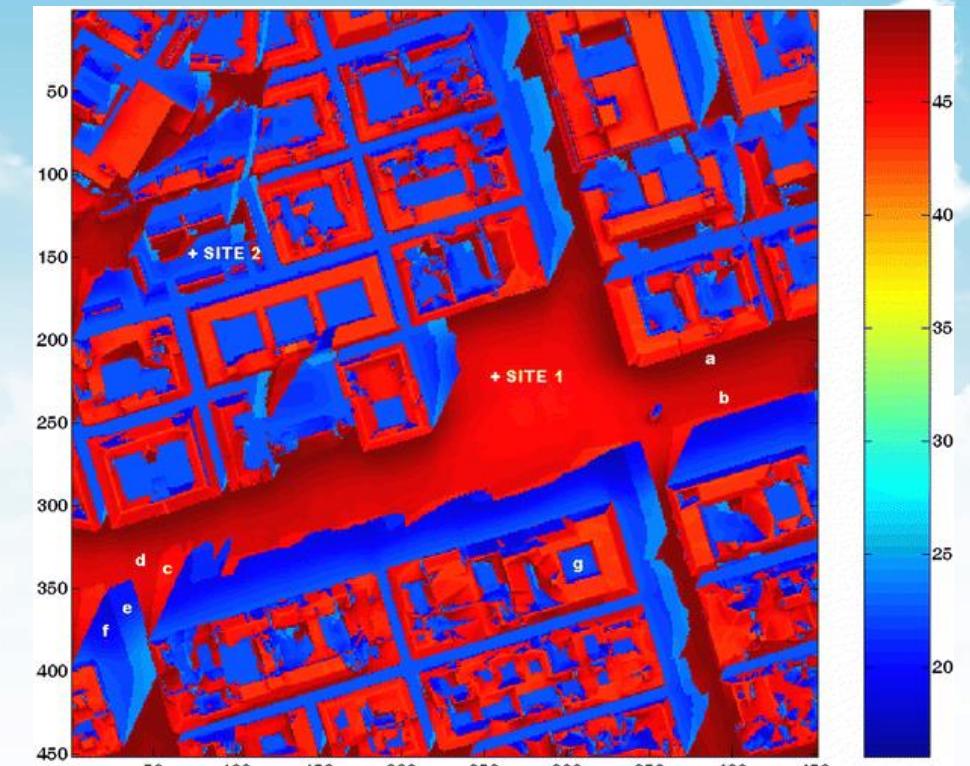
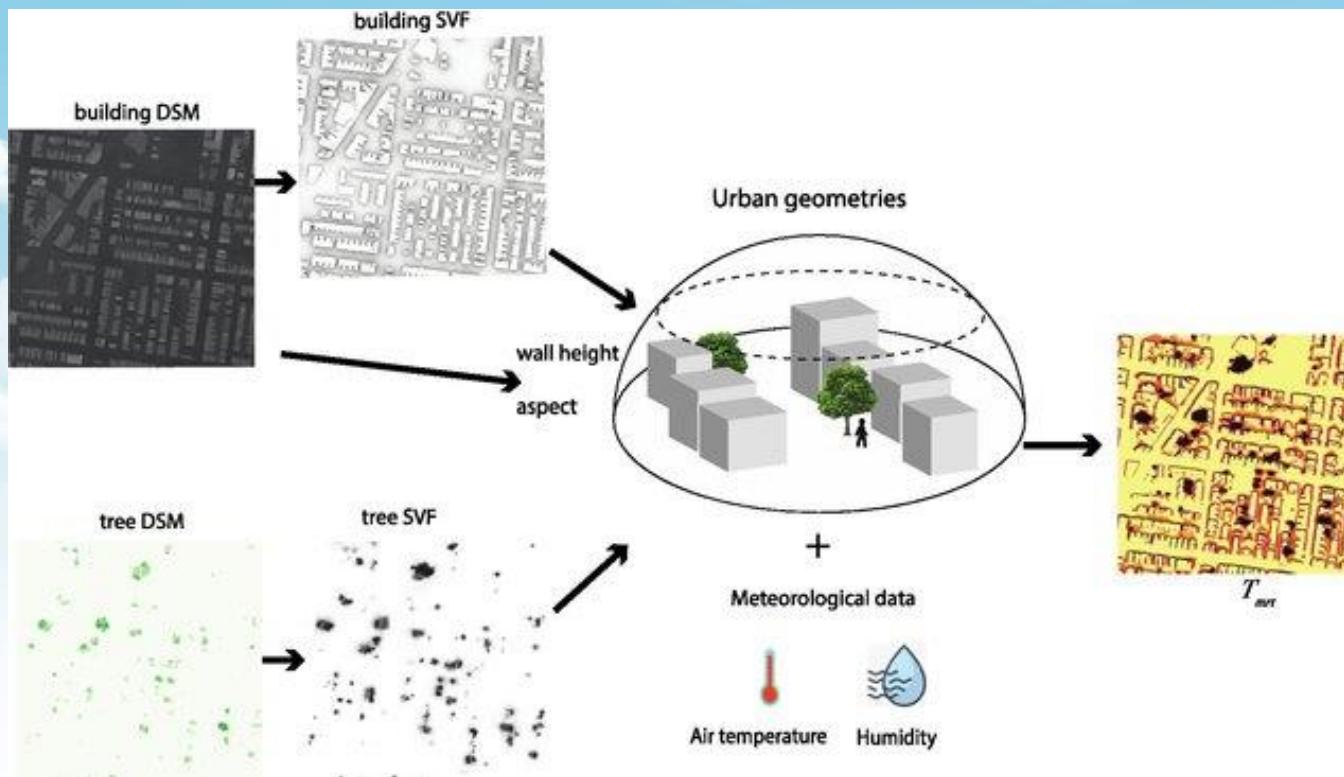
<https://github.com/tiffanys/OTC3D>

[Nazarian et al. \(2017\). Predicting outdoor thermal comfort in urban environments: A 3D numerical model for standard effective temperature. Urban Climate.](#)



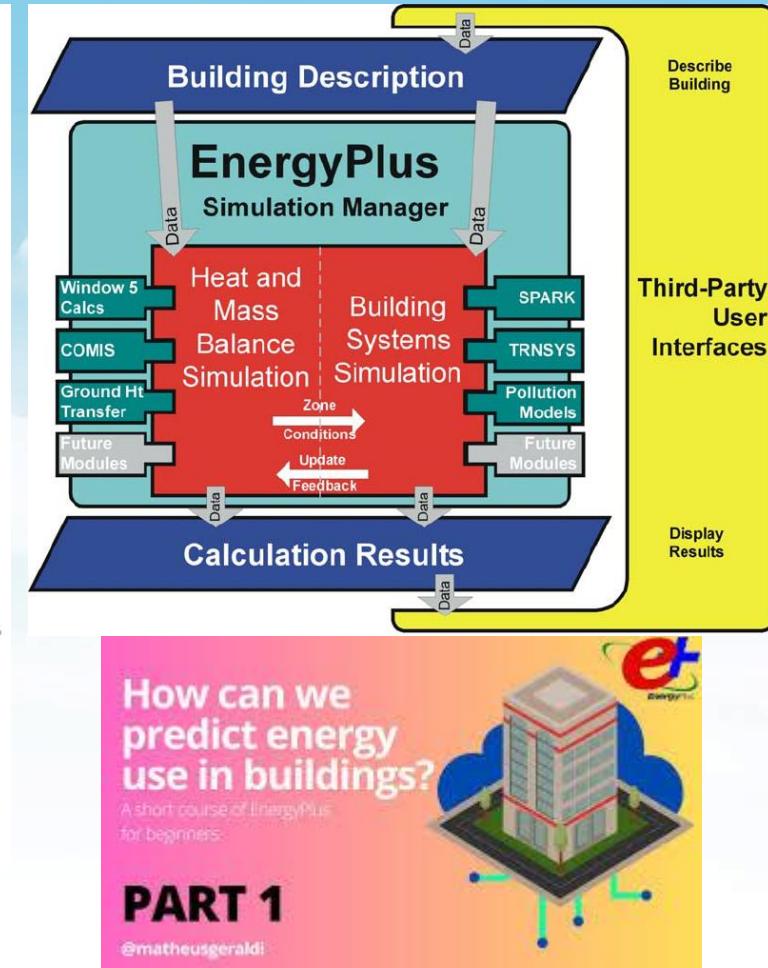
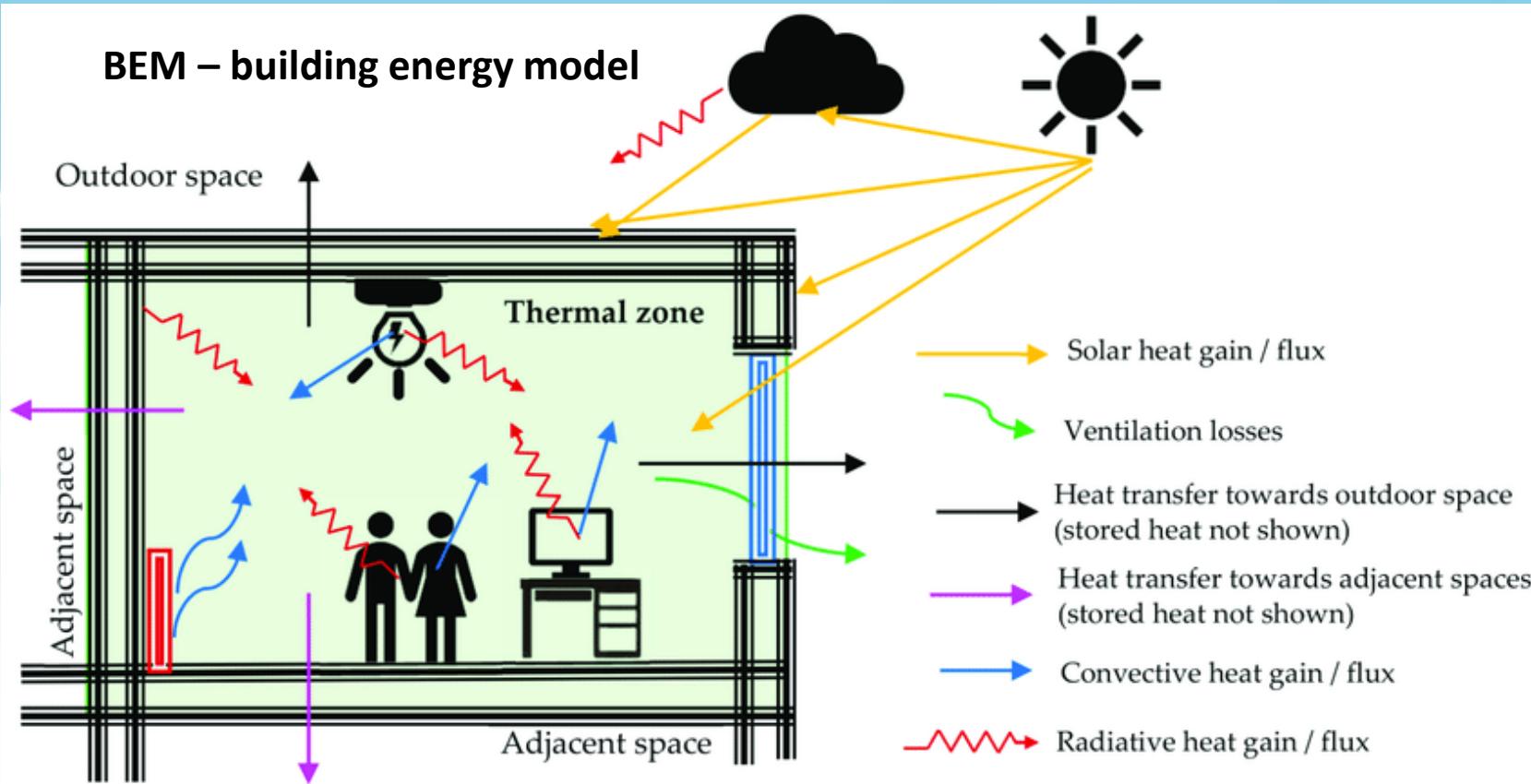
Модели радиации в городской среде

SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry model (SOLWEIG)



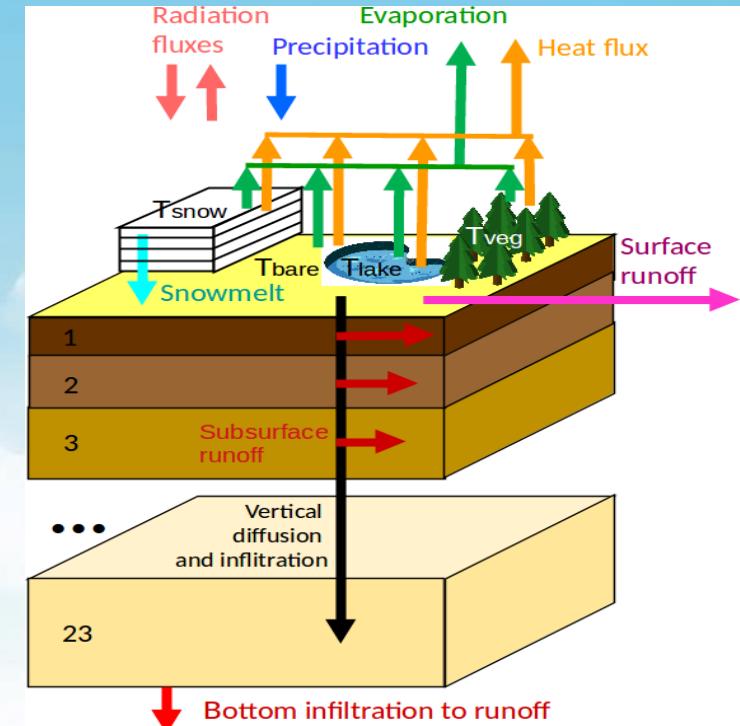
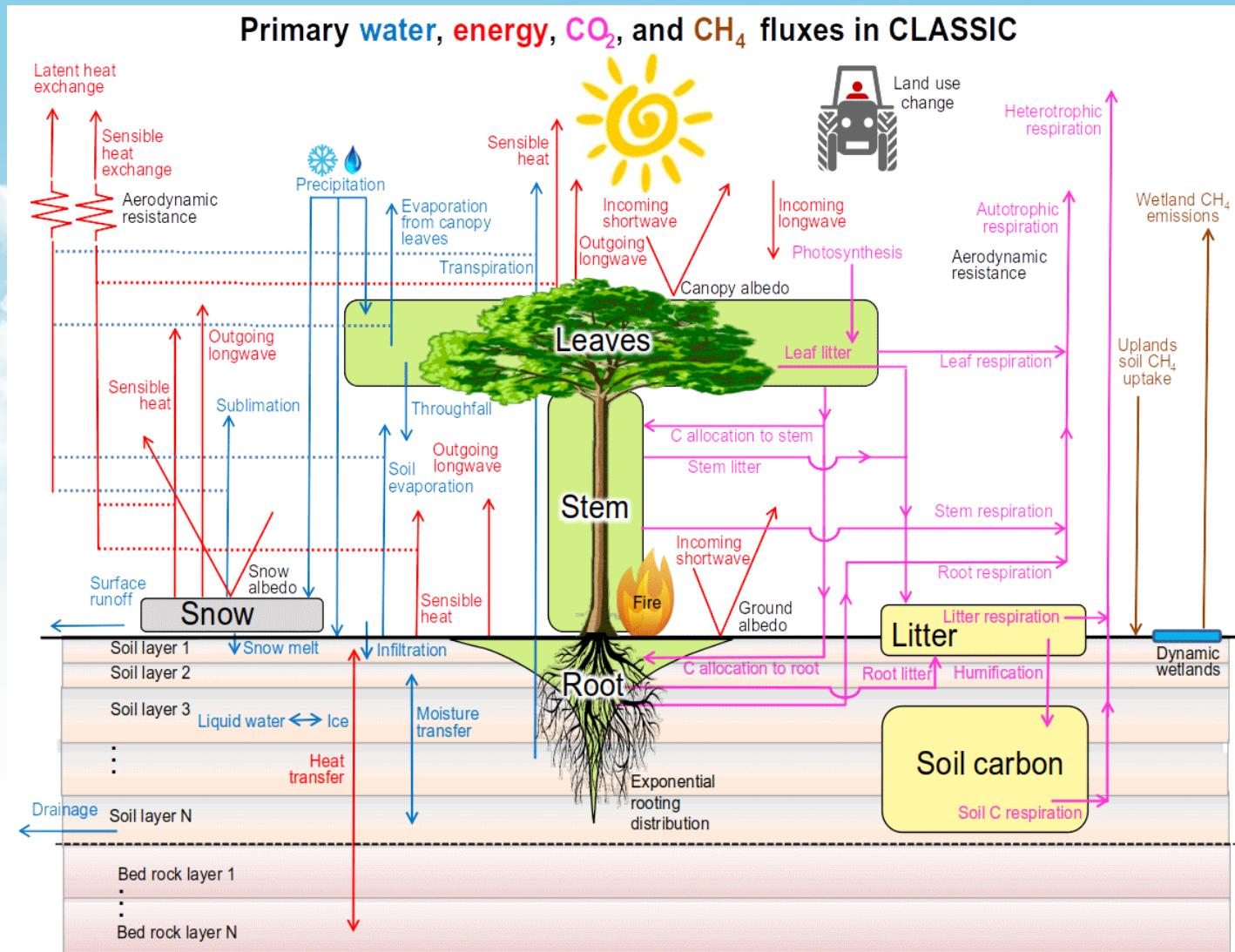
Lindberg, F., Holmer, B., and Thorsson, S. (2008). SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *Int J Biometeorol* 52, 697–713. doi: [10.1007/s00484-008-0162-7](https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7)

Модели теплового/энергетического баланса зданий



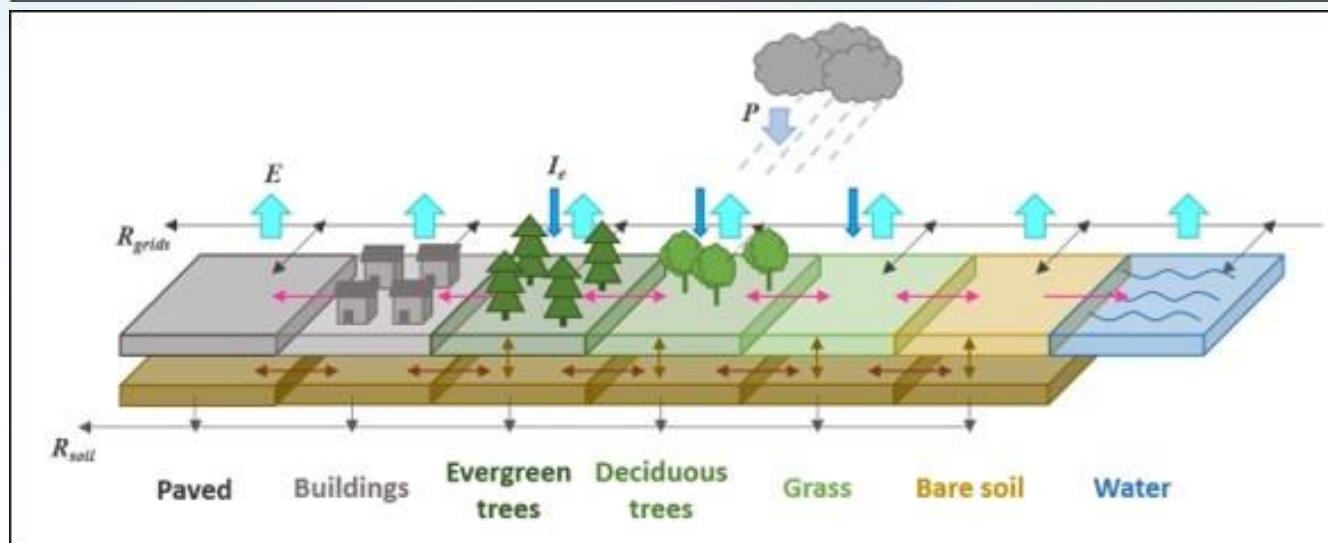
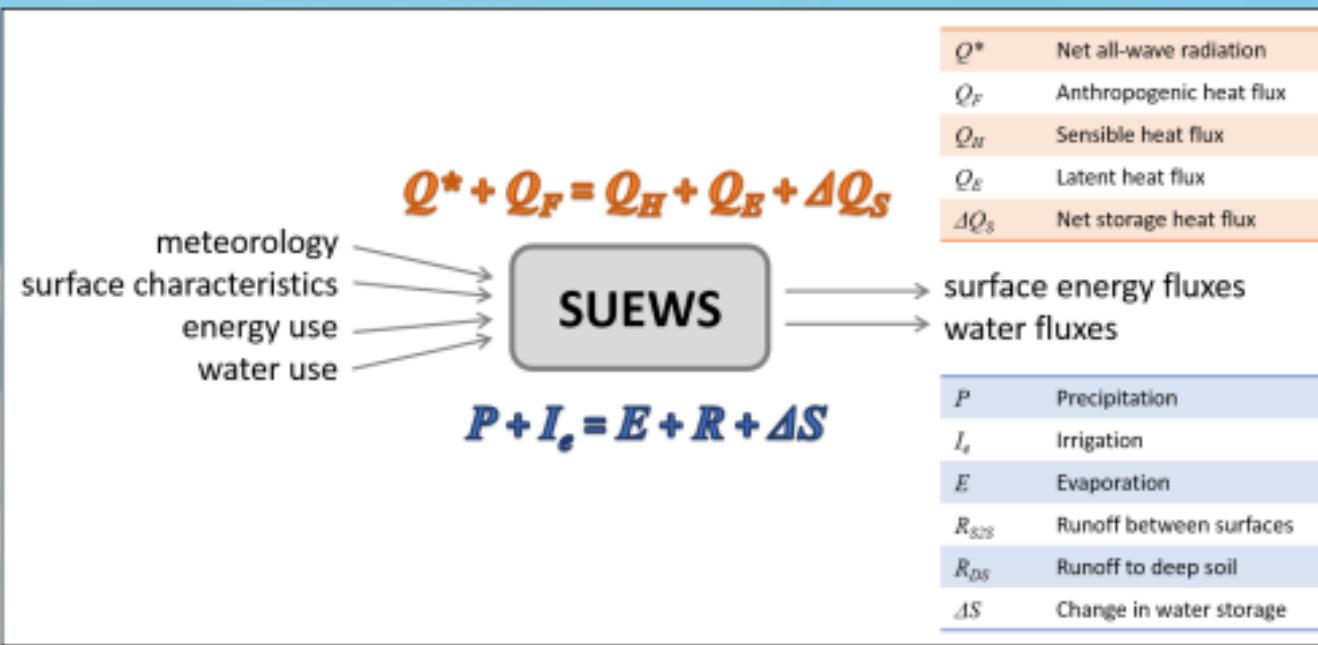
<https://energyplus.net/>

Модели деятельного слоя суши



Land surface scheme TerM
(Stepanenko t al., 2024)

Модели деятельного слоя суши



SUEWS: Surface Urban Energy and Water Balance Scheme

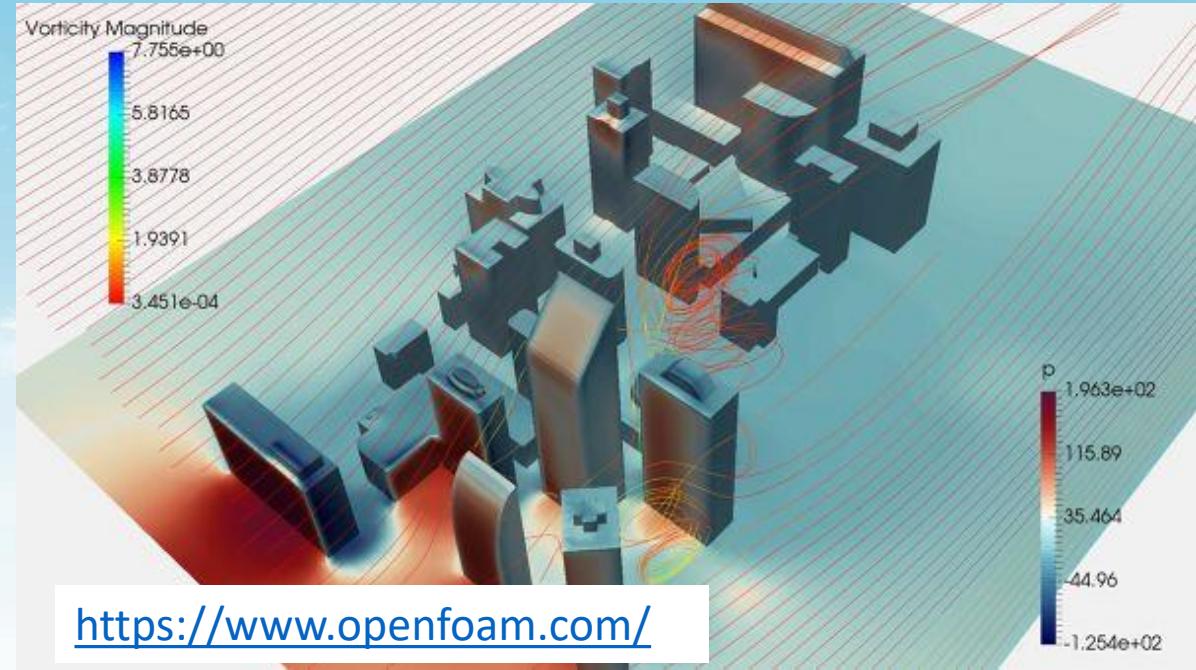
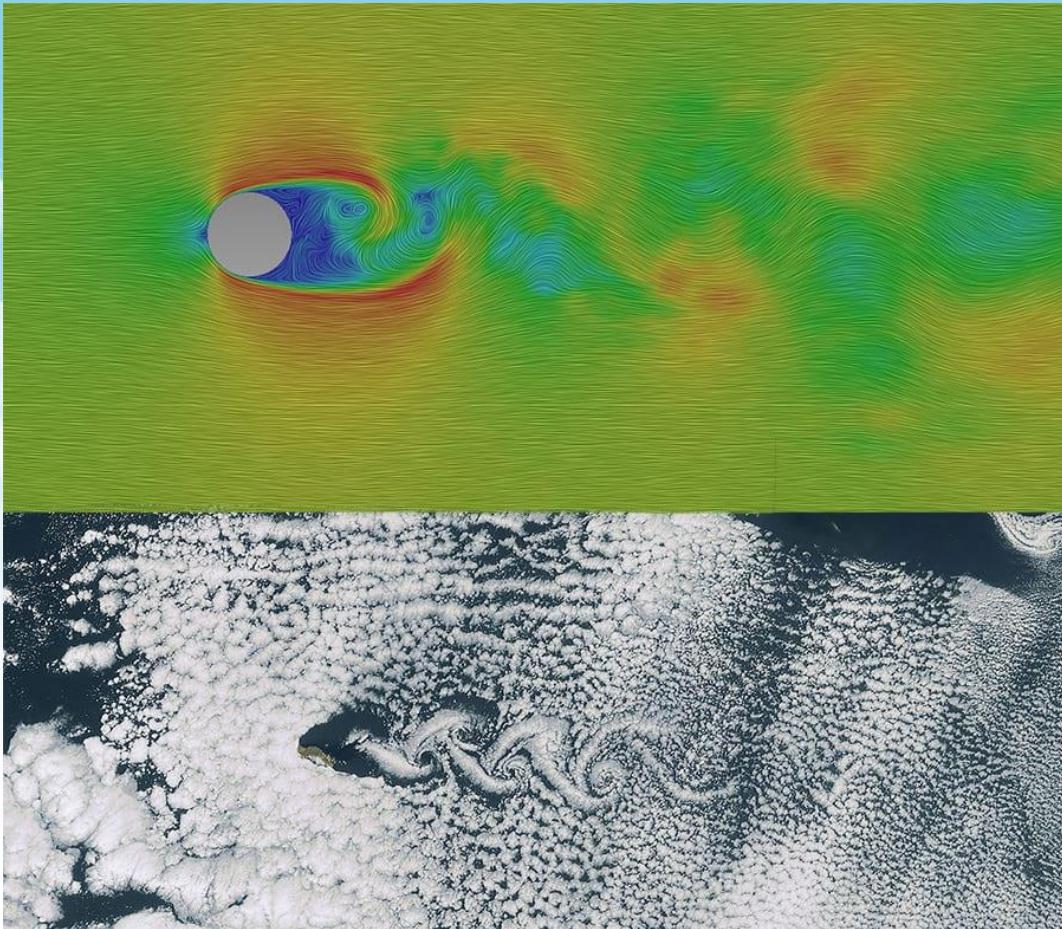
<https://suews.readthedocs.io/en/latest/>

Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS): Development and evaluation at two UK sites (2016). *Urban Climate* 18, 1–32. doi: [10.1016/j.uclim.2016.05.001](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.05.001)

Sun, T., and Grimmond, S. (2019). A Python-enhanced urban land surface model SuPy (SUEWS in Python, v2019.2): development, deployment and demonstration. *Geoscientific Model Development* 12, 2781–2795. doi: [10.5194/gmd-12-2781-2019](https://doi.org/10.5194/gmd-12-2781-2019)

Микромасштабные гидродинамические модели

Computational Fluid Dynamics (CFD)



<https://www.openfoam.com/>

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{Du}{Dt}$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{Dv}{Dt}$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{Dw}{Dt}$$

Navier-Stokes
Equation

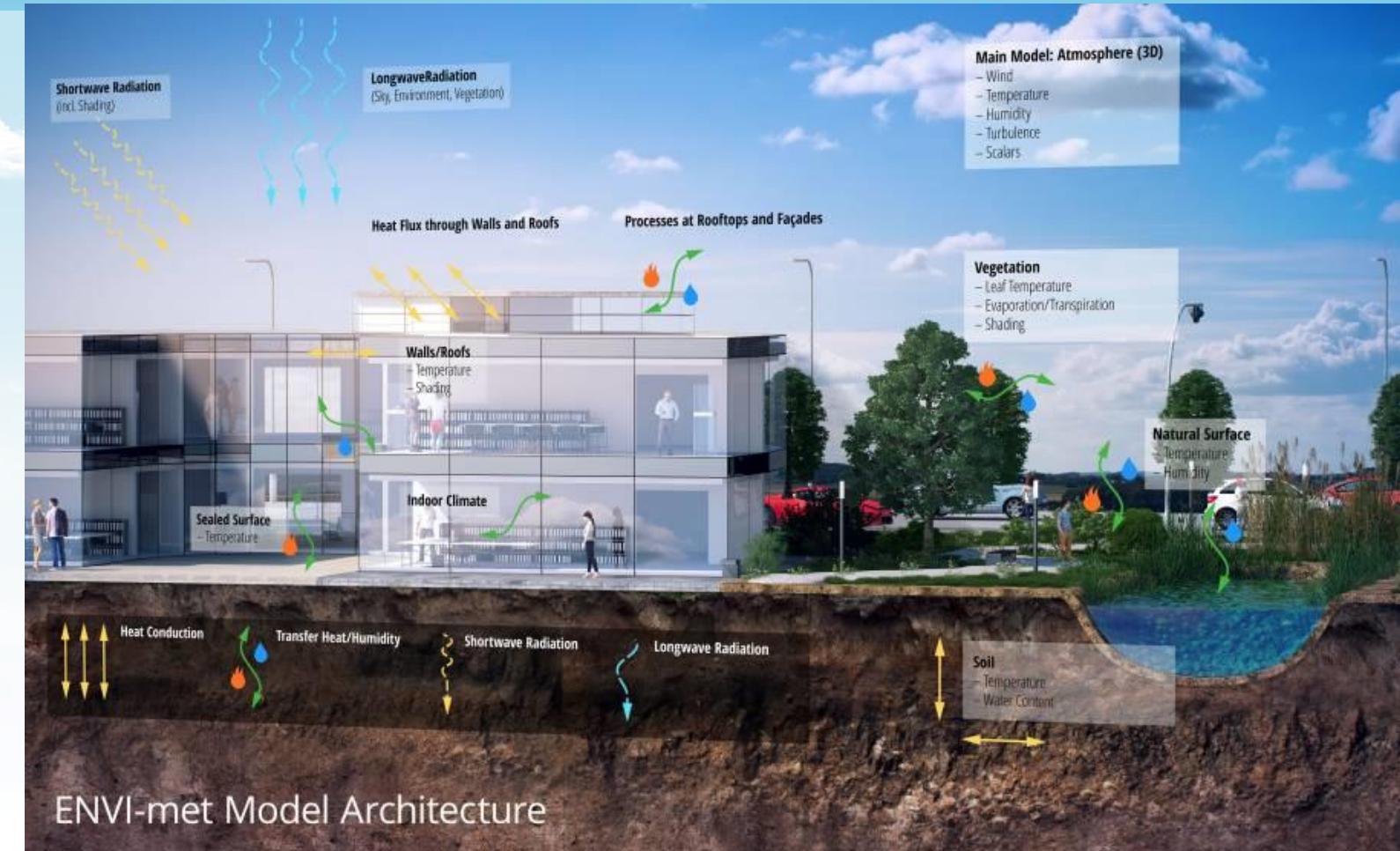
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

Continuity

Совместные микромасштабные модели

Модель ENVI-met

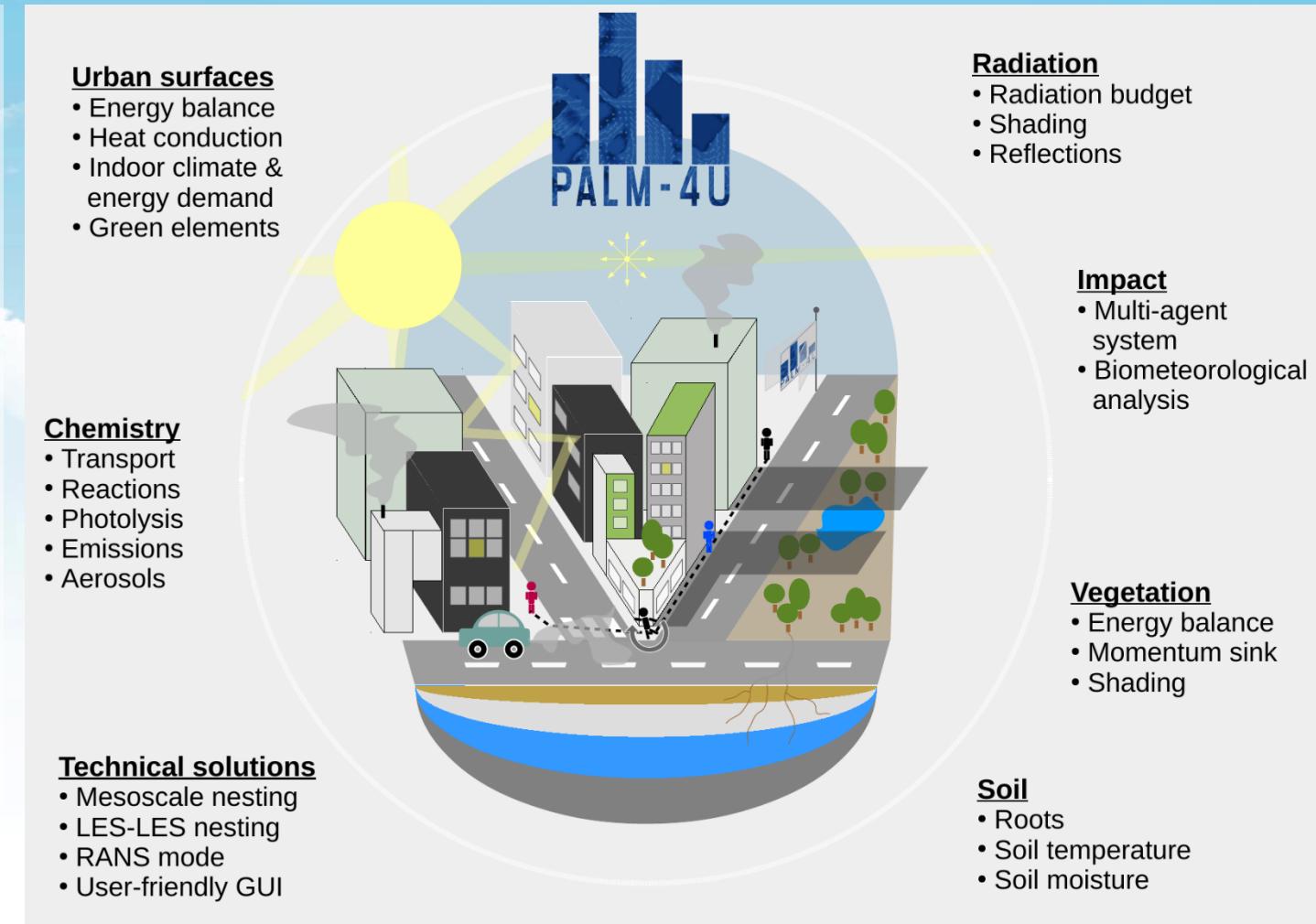
- Коммерческое ПО, есть демо-версия с ограничениями
- RANS модель атмосферы
- Интегрированы модели радиации, теплового баланса зданий, почвы, растительности, переноса загрязнений, термического комфорта
- Реализация под Windows, применение только на ПК
- Полностью графический интерфейс
- <https://www.envi-met.com/>



Совместные микромасштабные модели

PALM (Parallelized Large-eddy Simulation Model)

- Развивается в университете Ганновера
- Open-source ПО
- LES/RANS режимы
- В версию PALM-4U интегрированы модели радиации, теплового баланса зданий, почвы, растительности, переноса загрязнений, термического комфорта
- Реализация под Linux, ориентирована на мощные суперкомпьютеры
- Отдельные блоки имеют графический интерфейс
- <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/palm4u>



Совместные микромасштабные модели

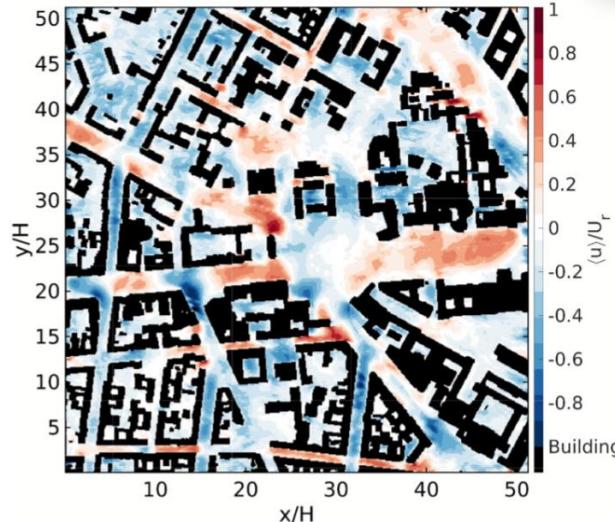


Fig. 3. Wind component v in the simulated area (Ernst-Reuter-Platz, Charlottenburg, Berlin) during a summer day.



Fig. 5. Near surface air temperature in the simulated domain (Ernst-Reuter-Platz in Charlottenburg, Berlin) during a summer night.

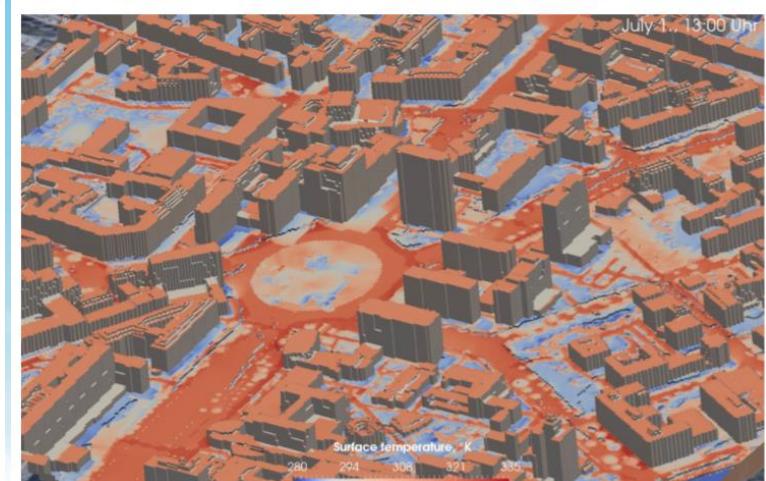
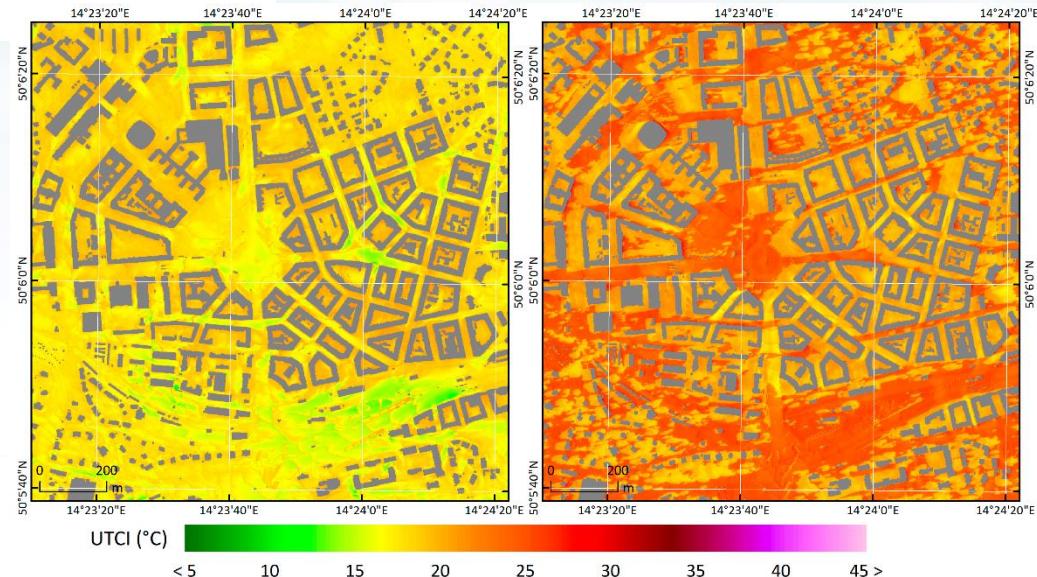


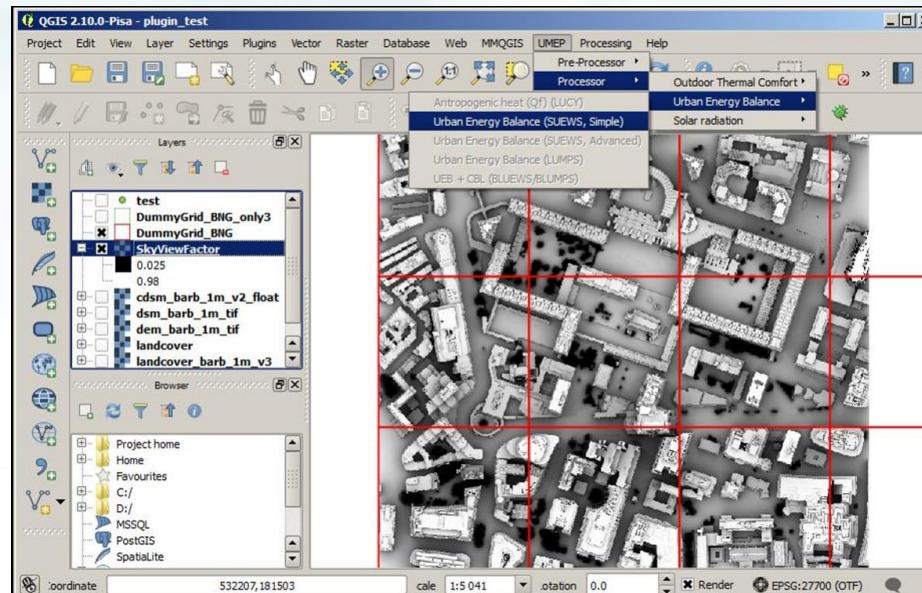
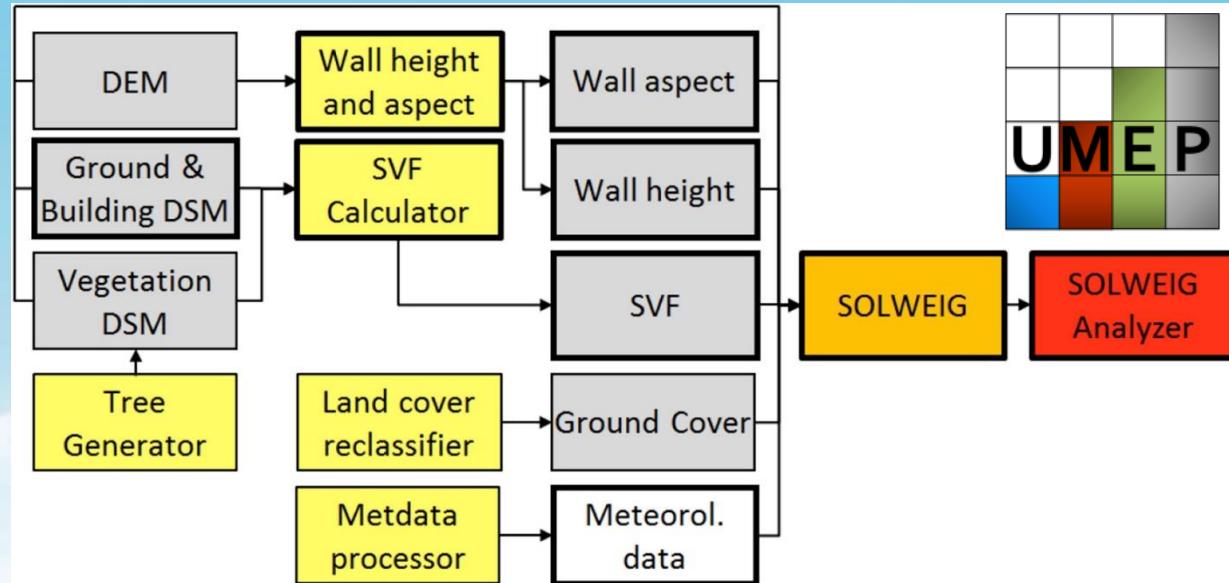
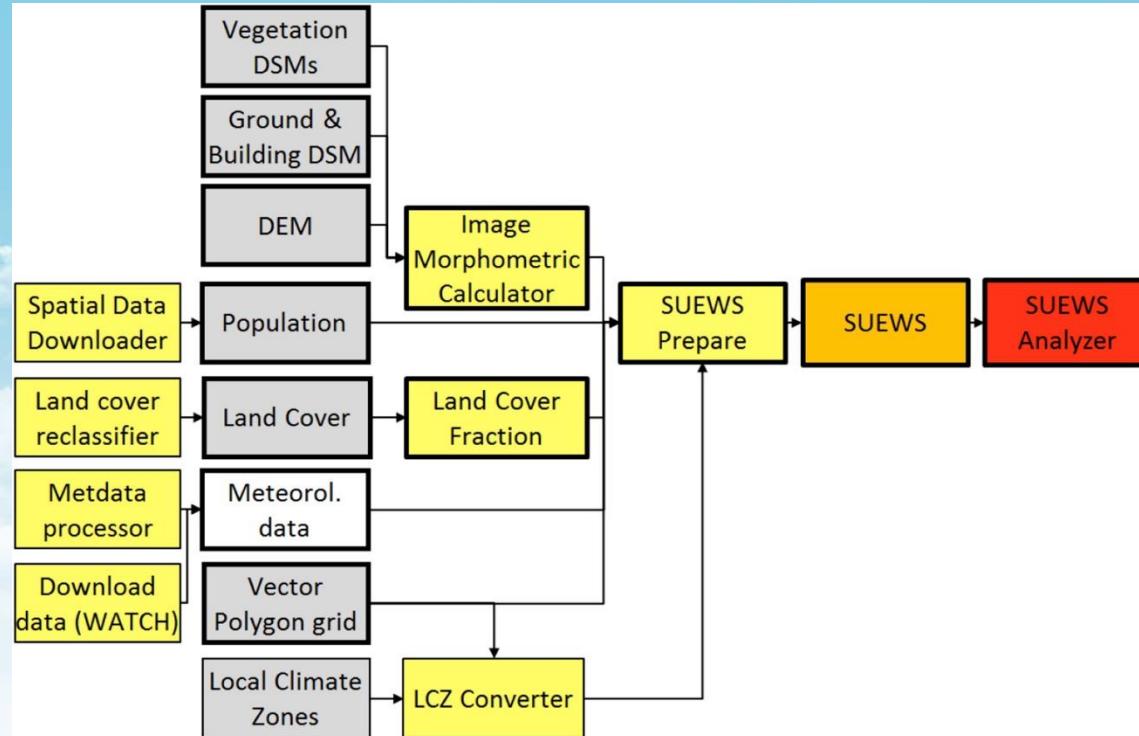
Fig. 6. Surface temperature of a focus domain in the simulated area (Ernst-Reuter-Platz in Charlottenburg, Berlin) during a summer day at 13:00.

Salim et al (2020). Introducing the Urban Climate Model PALM System 6.0. *International Journal of Applied Energy Systems*, 2(1), 15–18.
<https://doi.org/10.21608/IJAES.2020.169937>

Geletić et al (2021). High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic. *Atmosphere*, 12(2), 175. <https://doi.org/10.3390/atmos12020175>



Urban Multiscale Environmental Predictor (UMEP)



<https://umep-docs.readthedocs.io/en/latest/>

Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services (2018).

Environmental Modelling & Software 99, 70–87. doi:

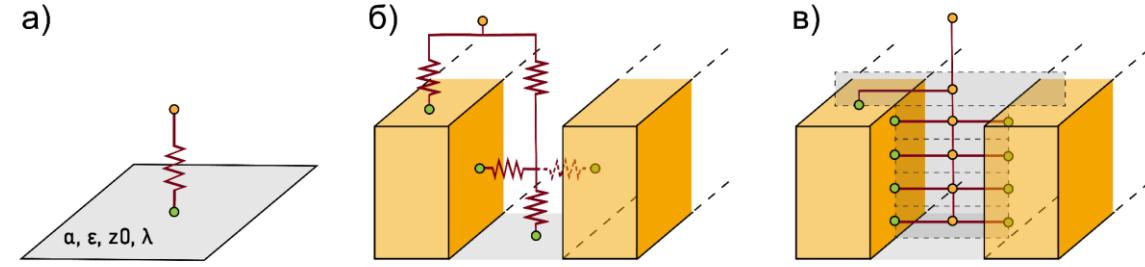
[10.1016/j.envsoft.2017.09.020](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.020)

Модели городского полога

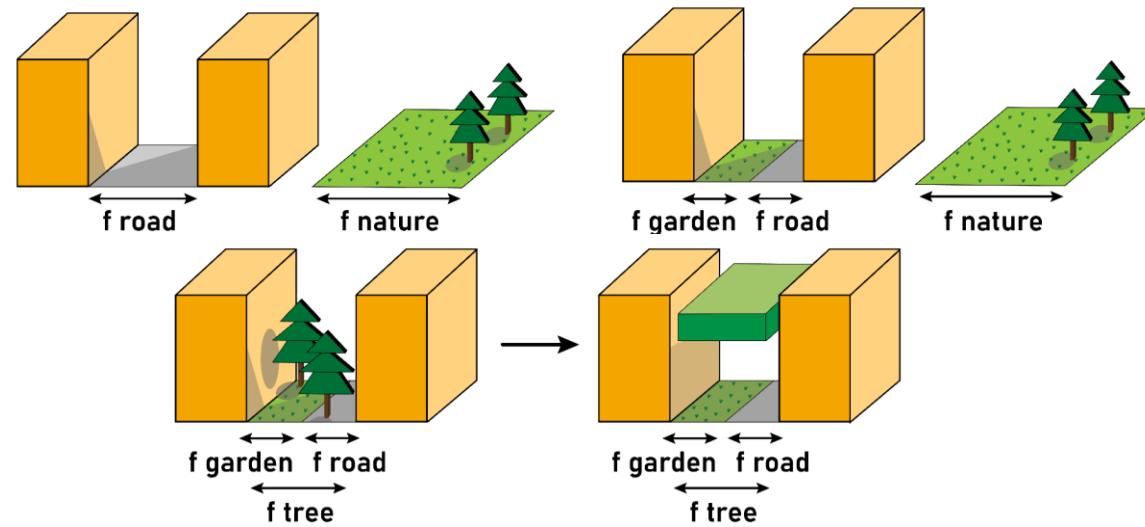
Физические процессы, описываемые городскими параметризациями (моделями городского полога, англ. urban canopy models):

- Тепло- и влагообмен в деятельном слое поверхности
- Радиационные взаимодействия между городской поверхностью и атмосферой:
 - Затенение зданиями
 - Переотражение и переизлучение коротковолновой и длинноволновой радиации
- Турбулентный обмен в городском пологе
- Баланс влаги на поверхности
- Антропогенные потоки тепла и влаги
- Городская растительность

Различия по сложности представления «городских каньонов»

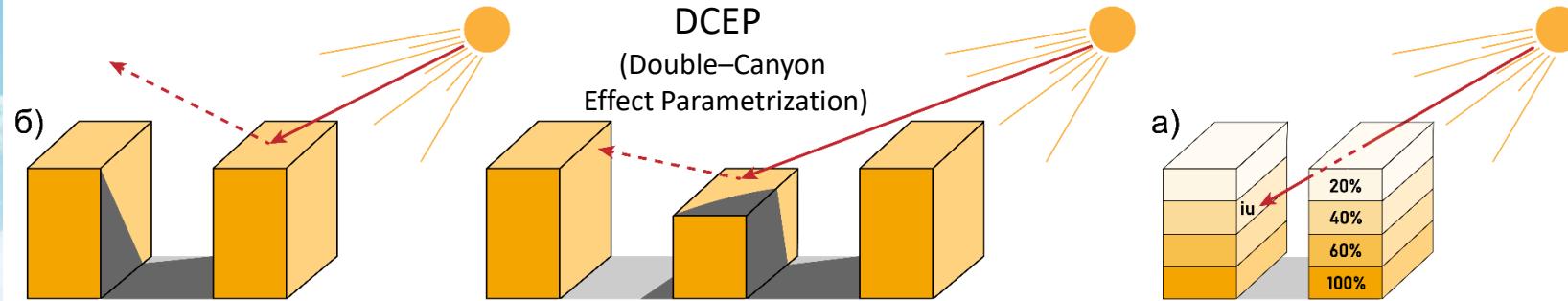


Различия по сложности представления растительности



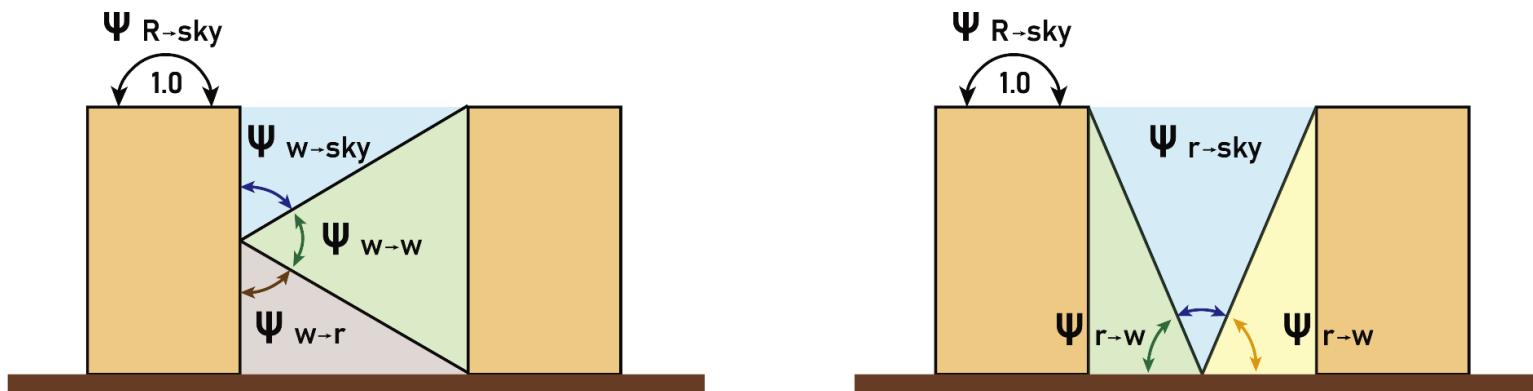
Модели городского полога

Различные подходы к описанию радиационных взаимодействий



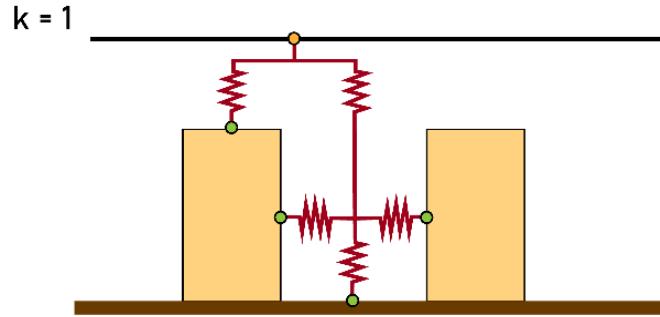
Urban form	H/W	λ_c	Albedo α	Change in absorption
	0	1	0.40	
	0.5	1.5	0.32	+17%
	1	2	0.27	+21%
	2	3	0.23	+27%

Понятие фактора видимости неба (sky view factor)



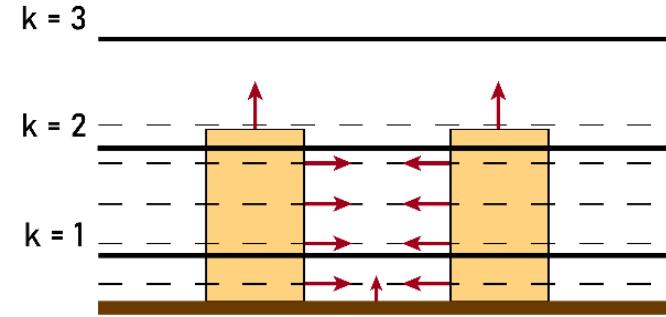
Модели городского полога

Различные подходы к описанию турбулентного энергообмена

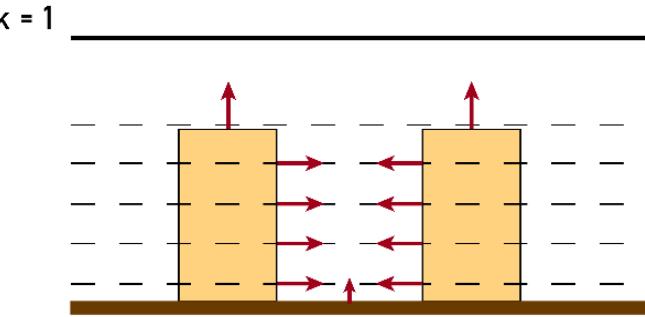


resistance approach

$$H_i = \rho c_{pd} (T_a - T_i) / RES_i$$

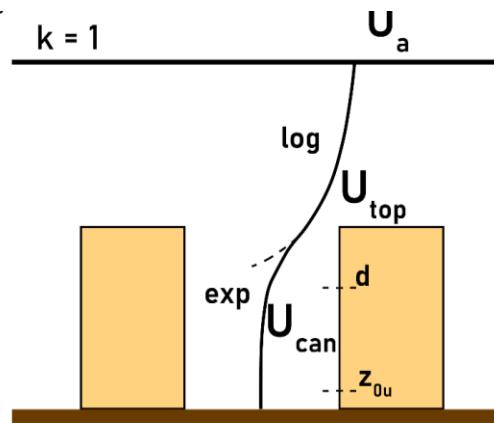


drag approach

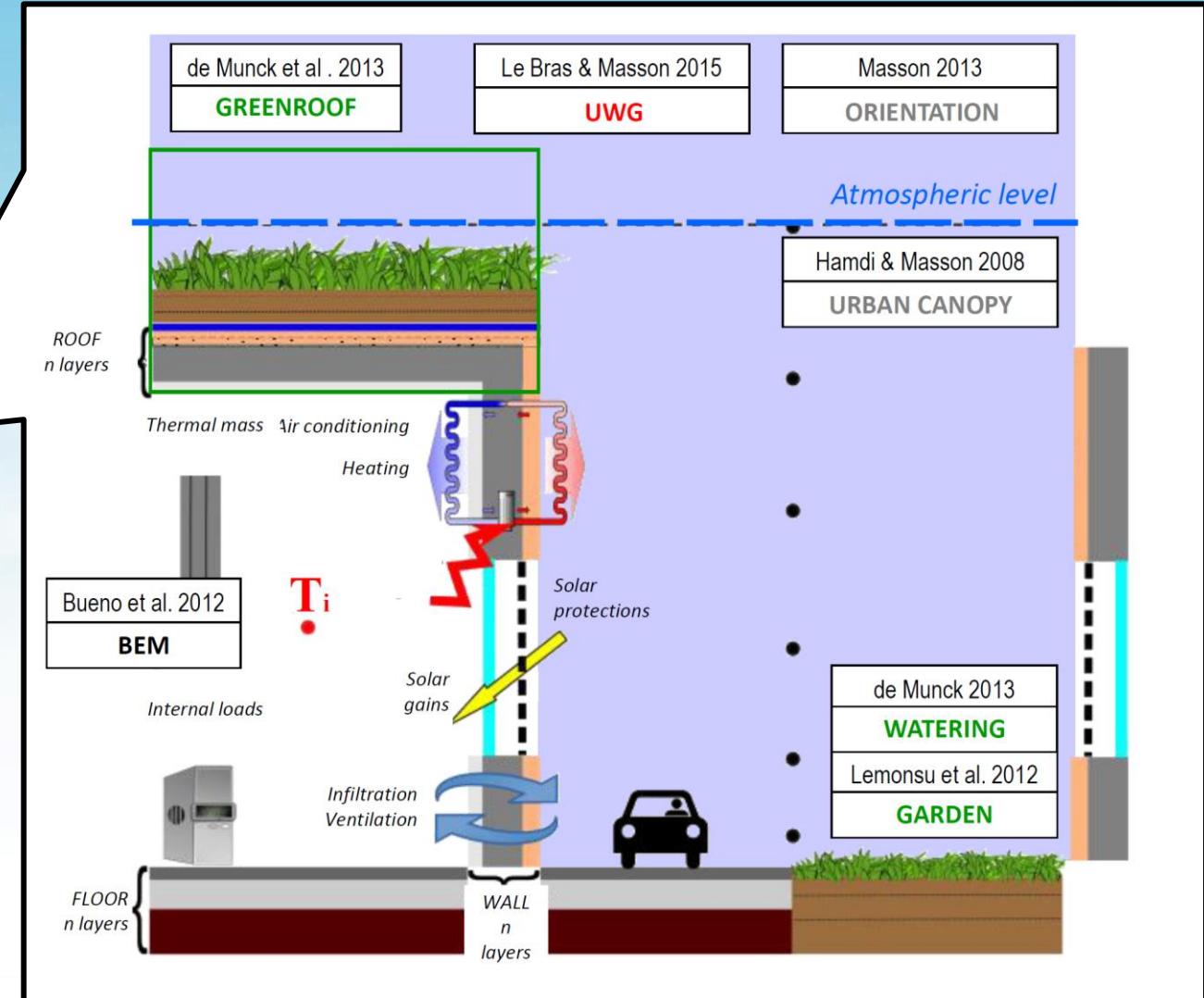
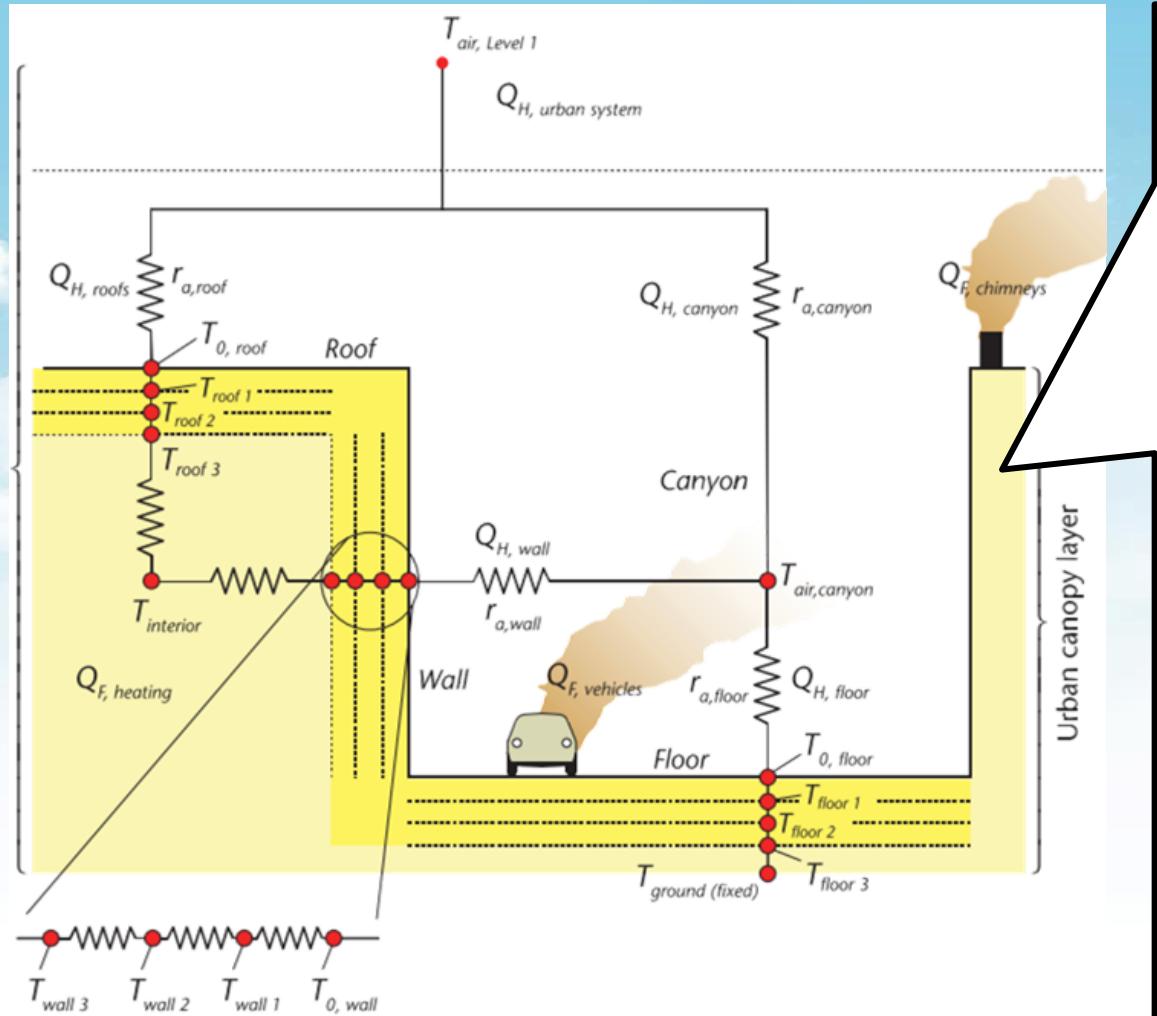


Расчет коэффициентов сопротивления/обмена:

- Теория подобия Монина-Обухова (формально неприменима) для крыш и дороги
- Эмпирические зависимости для стен, например $RES_w = (11.8 + 4.2U_{can})^{-1}$
- Полуэмпирический экспоненциальный профиль ветра в каньоне



Пример: модель ТЕВ



Masson, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94, 357–397. doi: [10.1023/A:1002463829265](https://doi.org/10.1023/A:1002463829265)

Пример: параметризация TERRA_URB

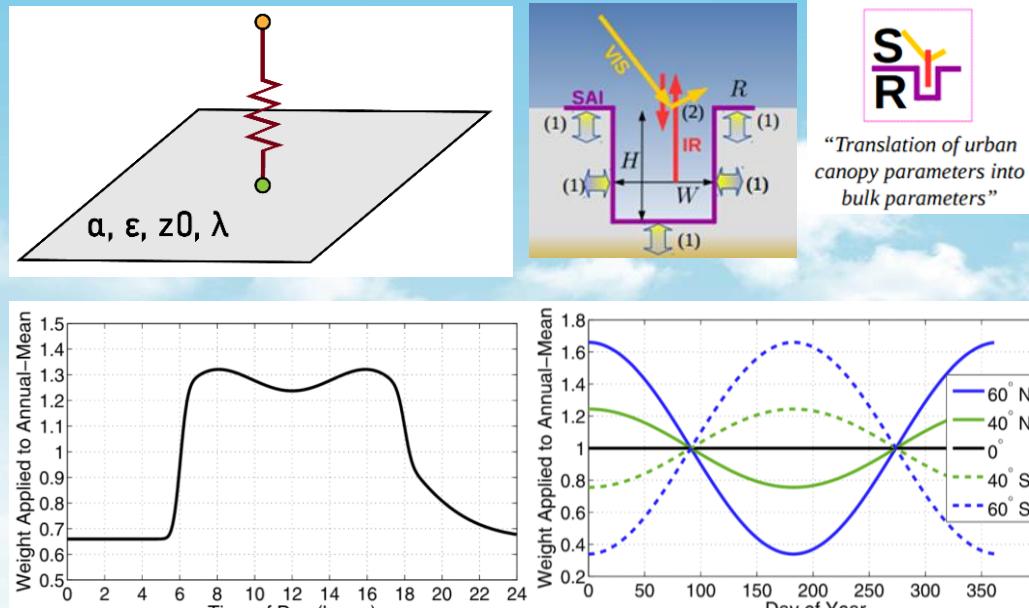
Модификация модели деятельного слоя суши TERRA в параметризации TERRA_Urb (Wouters et al., 2015; 2016):

- Коррекция альбедо и излучательной способности с учетом геометрии городских каньонов зависимостей: $\Psi_{bulk} = \delta_R + (1 - \delta_R) * \exp\left(-0.6 \frac{H}{W}\right)$,
- Увеличение теплоемкости и теплопроводности пропорционально увеличению площади поверхности: $c_{bulk} = c * \left[\left(1 + 2 \frac{H}{W}\right) (1 - \delta_R) + \delta_R \right]$
- Изменение параметра термической шероховатости: $z_{0u} = 0.075H$
- Городская поверхность непроницаемая для влаги, реализована параметризация луж
- Антропогенный поток тепла задается на основе среднегодового значения и предопределенного суточного и сезонного хода (Flanner, 2009)

Parameter name	Symbol	Default values
Surface albedo	α	0.101
Surface emissivity	ϵ	0.86
Surface heat conductivity	λ_s	$0.767 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Surface heat capacity	$C_{v,s}$	$1.25 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
Building height	H	15 m
Canyon height-to-width ratio	$\frac{h}{w_c}$	1.5
Roof fraction	R	0.667



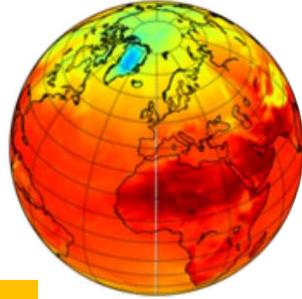
Albedo	0.081 (snow-free)
Emissivity	0.89 (snow-free)
Heat conductivity	$1.55 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Heat capacity	$2.50 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$



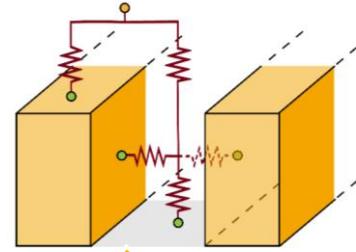
Совместные мезомасштабные модели

Крупномасштабный форсинг

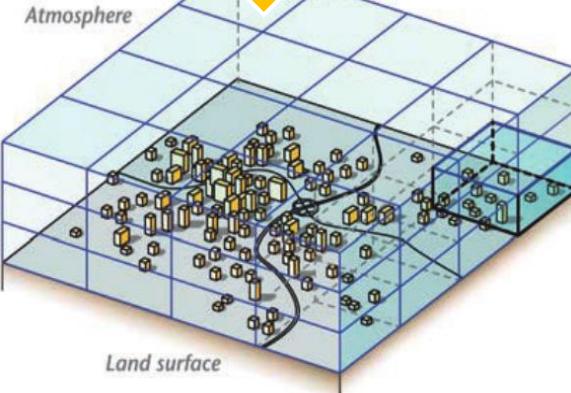
- Реанализ
- Прогноз
- Сценарии изменений климат



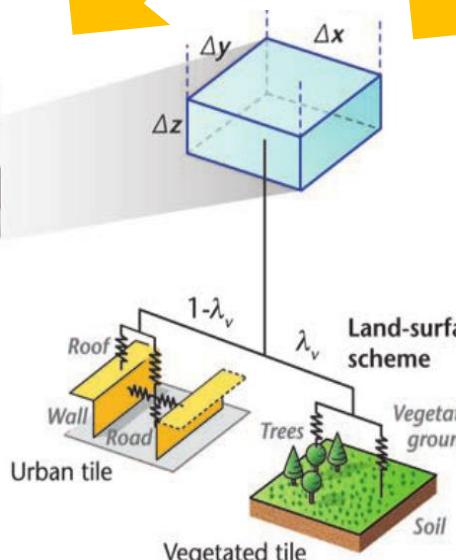
Городская параметризация



Параметры поверхности и городской среды

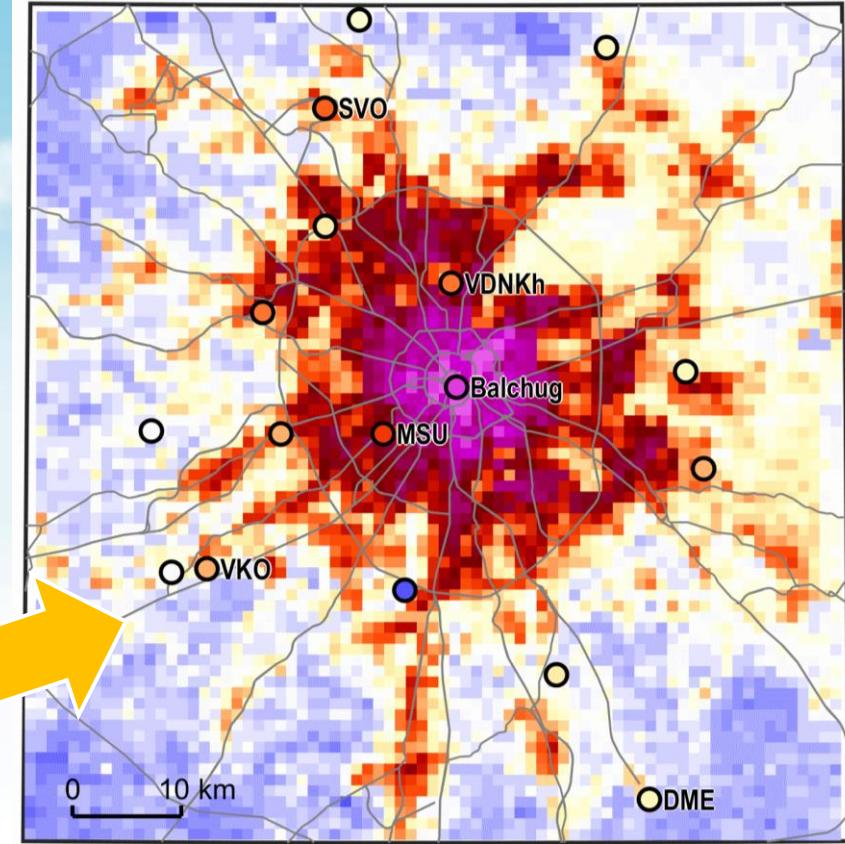


Региональная модель атмосферы

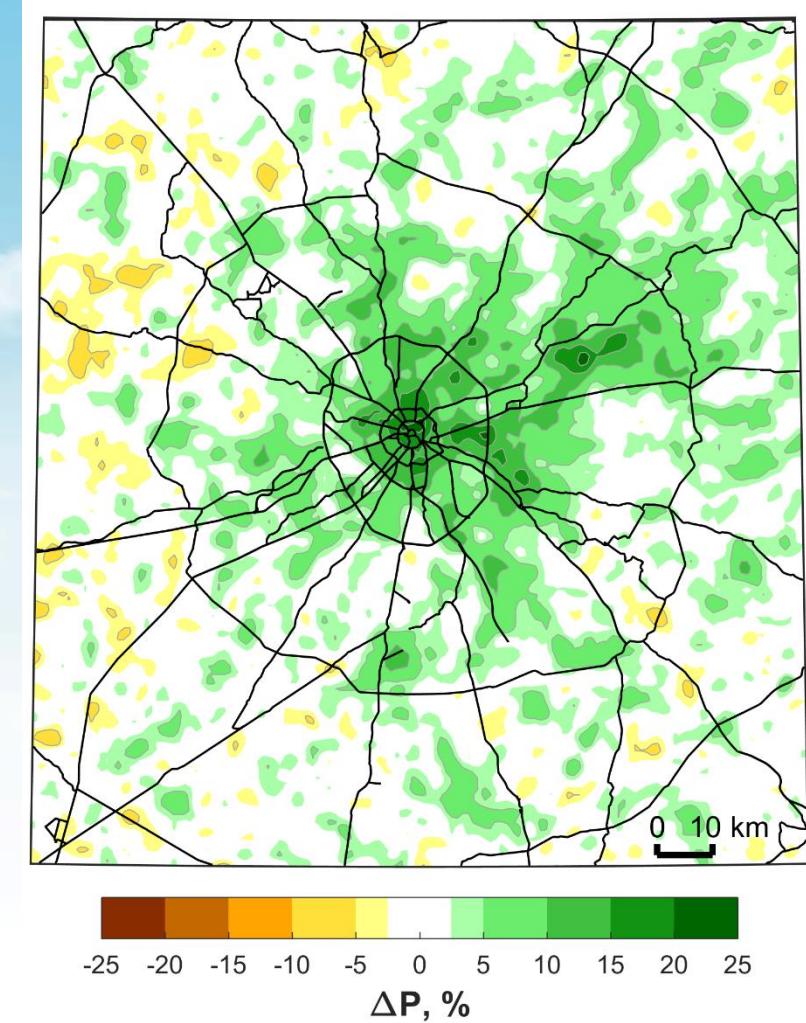
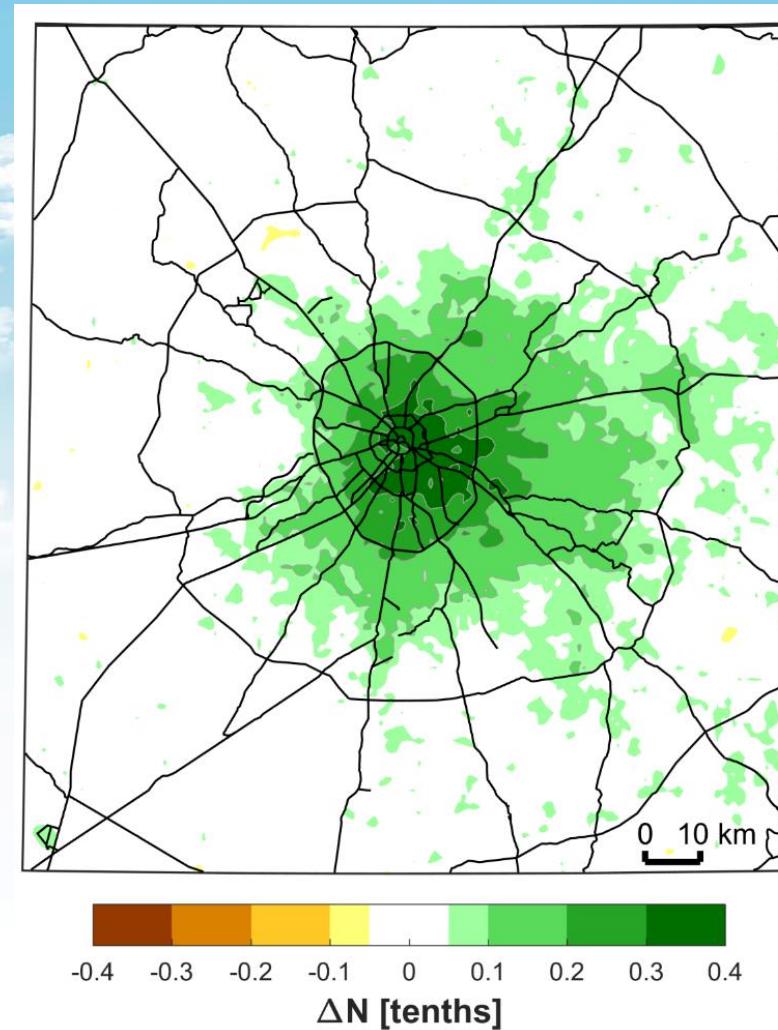
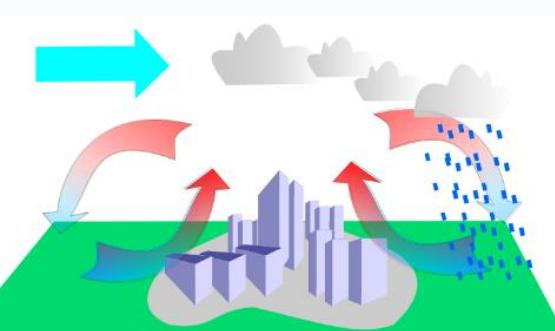
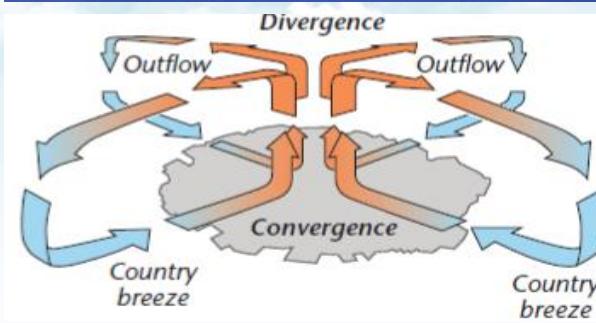
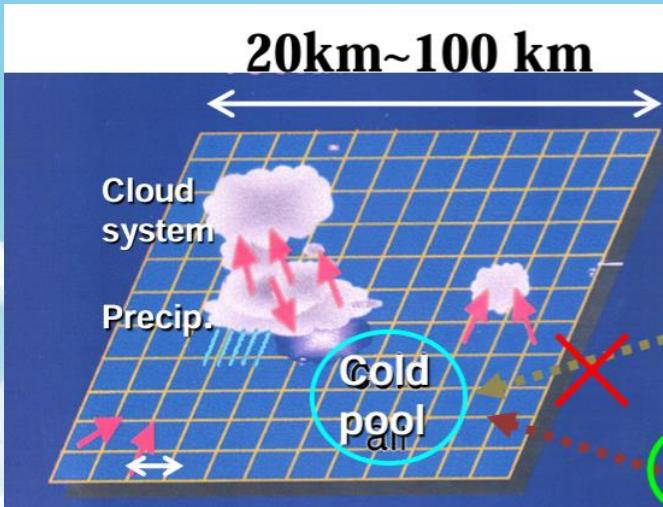


Вычислительные ресурсы

$\Delta X=1\text{km}$

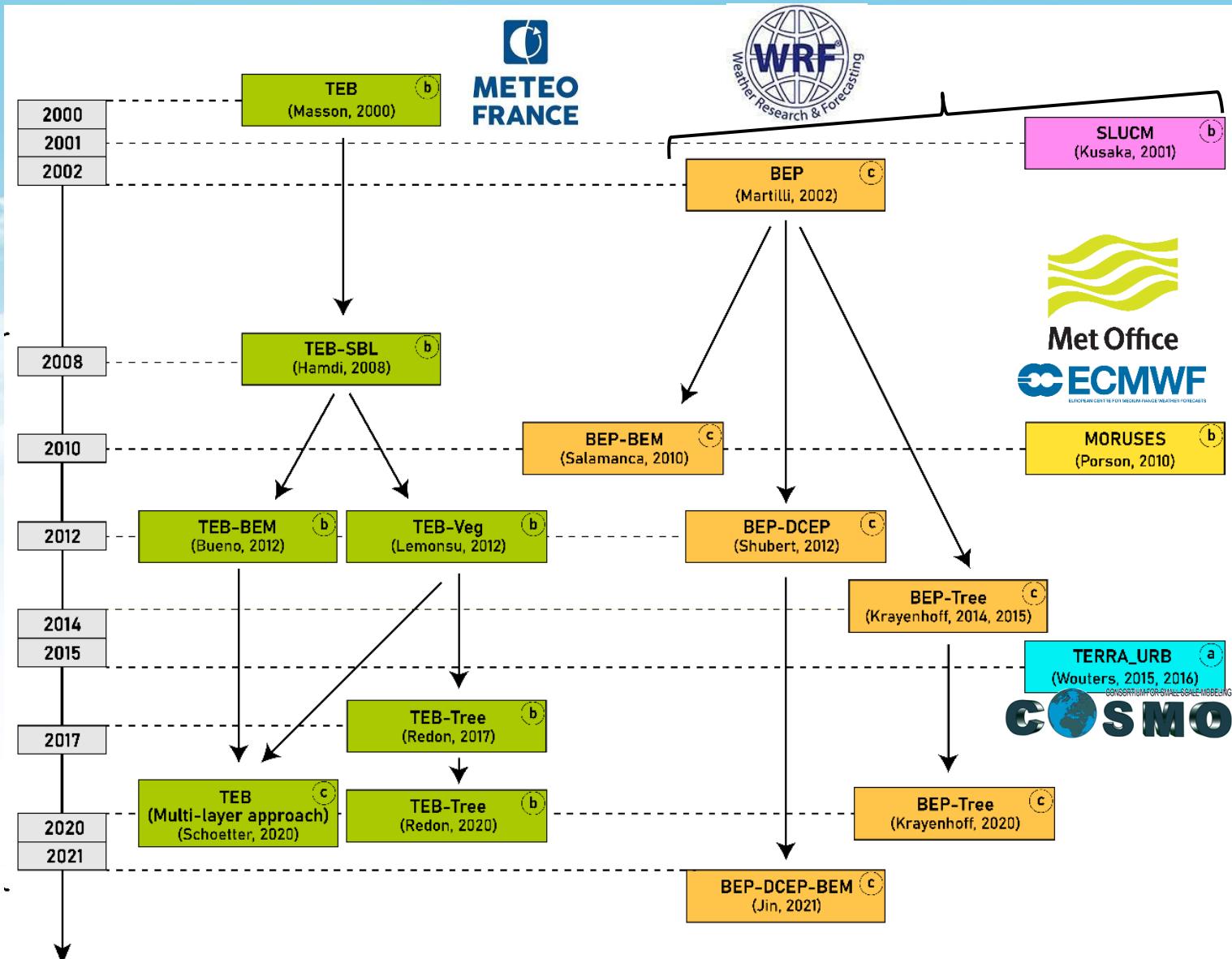


Совместные мезомасштабные модели



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

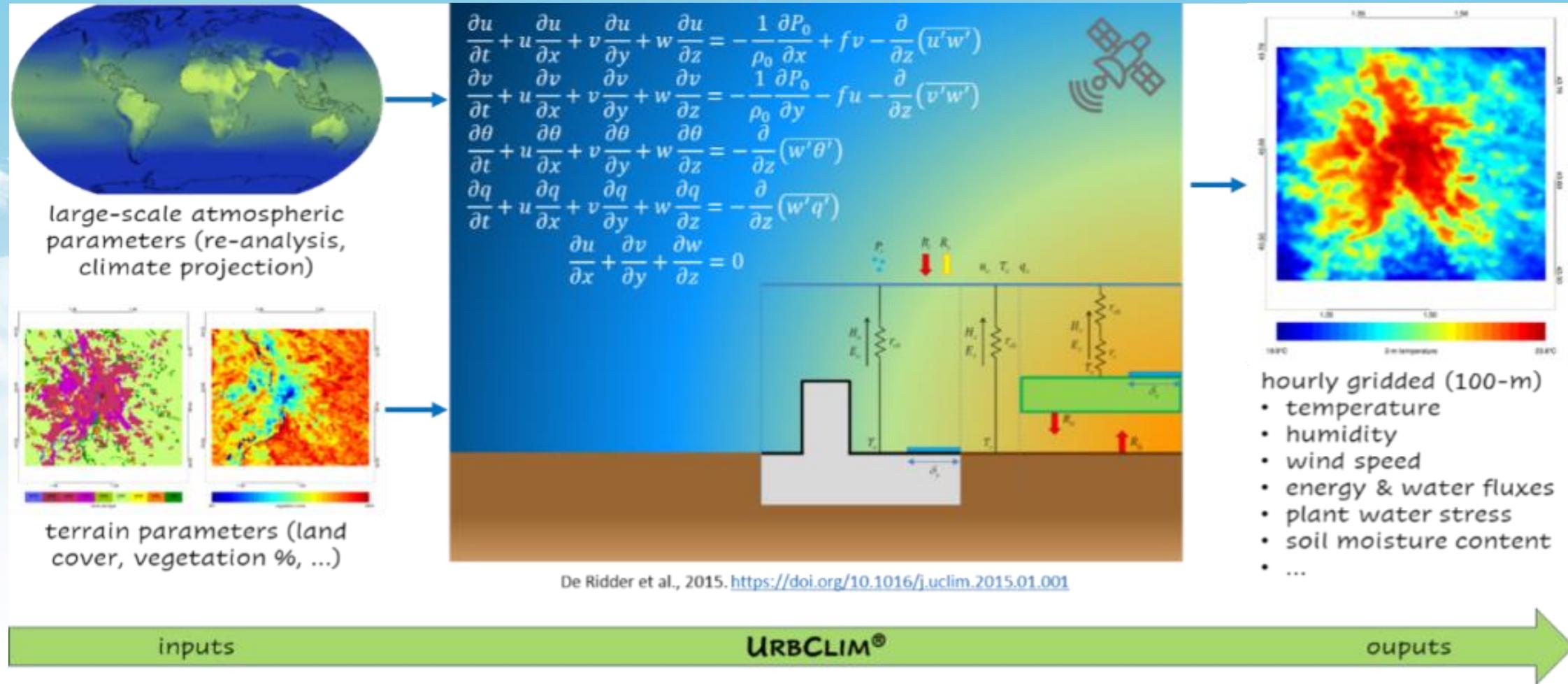
Городские параметризации в моделях



Некоторые региональные мезомодели с городскими параметризациями:

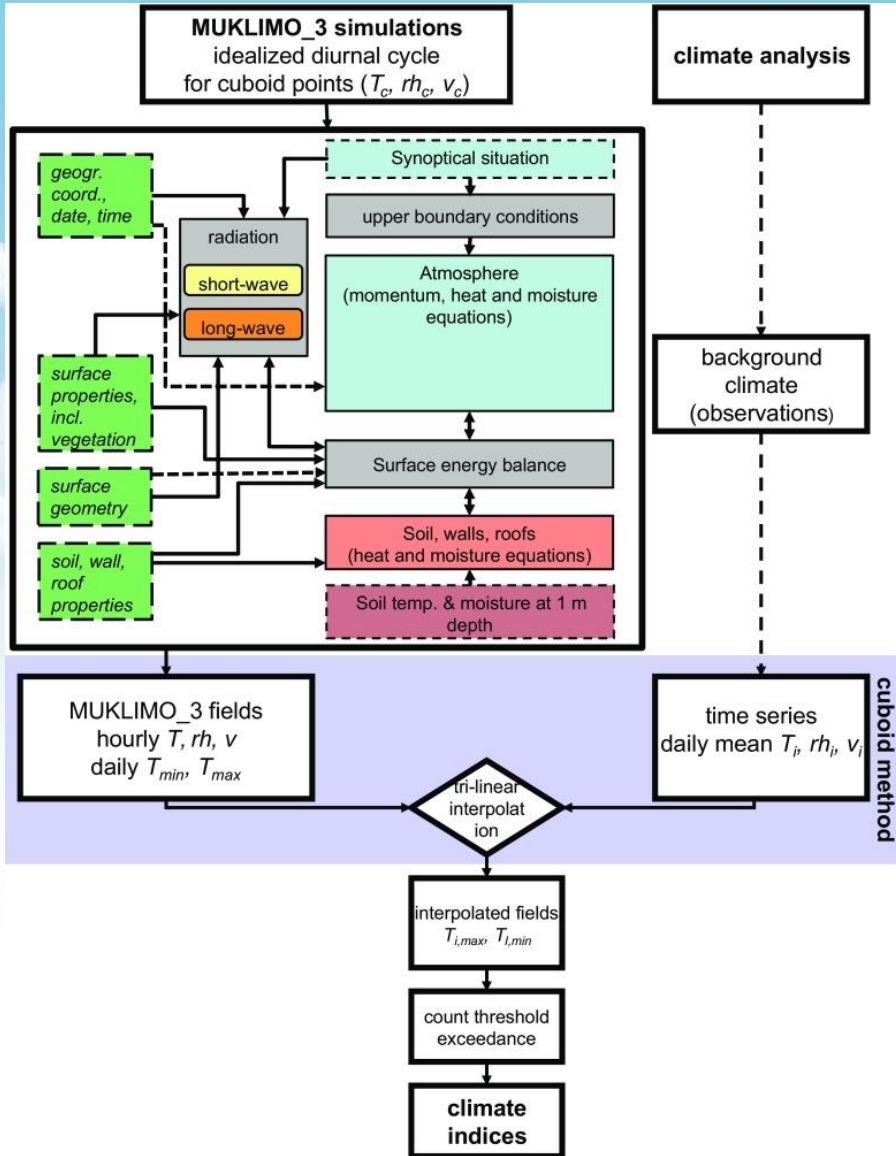
- Weather Research and Forecast (WRF & WRF-Chem, <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>)
- COSMO & COSMO-ART (<https://www.cosmo-model.org/>)
- Hirlam
- Unified Model ([UK Met Office](#))
- Meso-NH ([MeteoFrance](#))

Модели пограничного слоя атмосферы

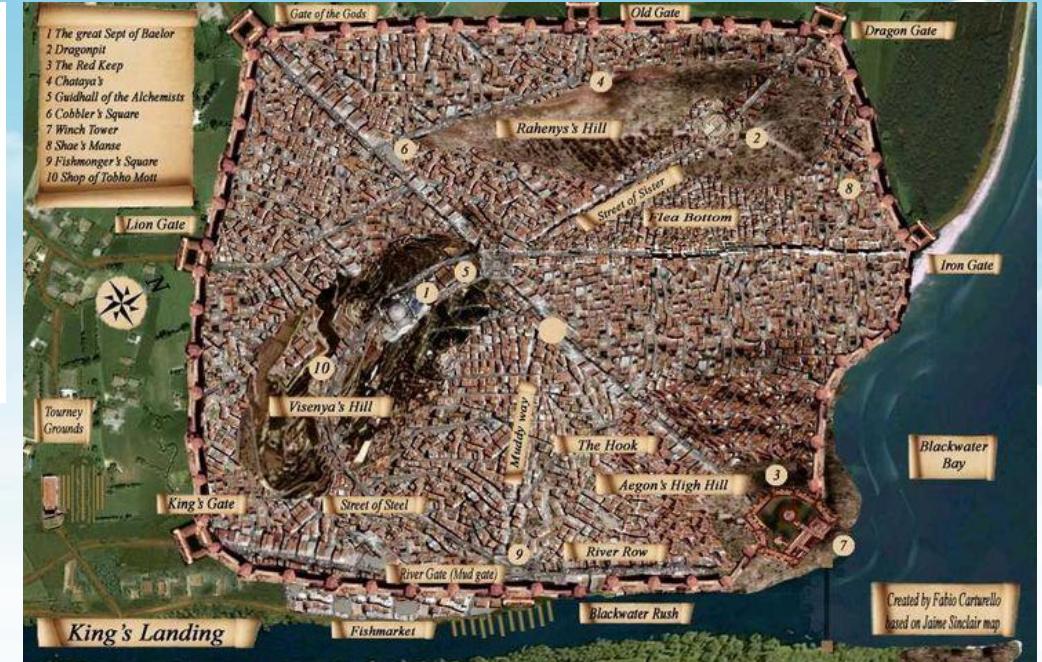
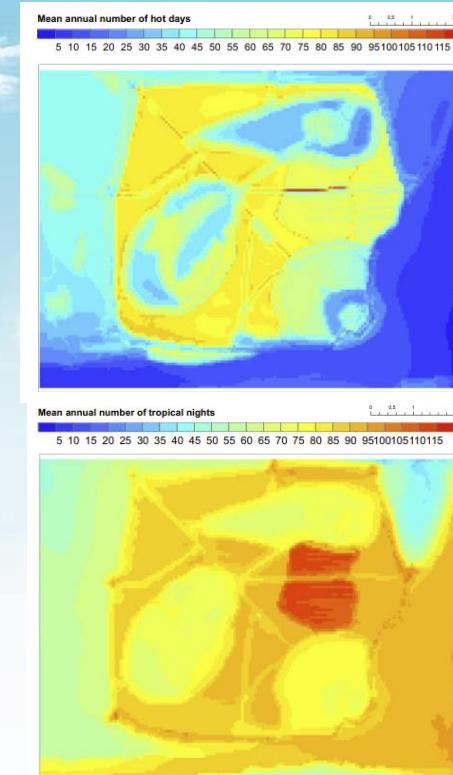


De Ridder, K., Lauwaet, D., and Maiheu, B. (2015). UrbClim - A fast urban boundary layer climate model. *Urban Climate* 12, 21–48.
doi: [10.1016/j.uclim.2015.01.001](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001)
<https://www.urban-climate.eu>

Модели пограничного слоя атмосферы



MUKLIMO_3 (in German: Mikroskaliges Urbanes KLImaMOdell)



Int J Biometeorol (2017) 61:527–539
DOI 10.1007/s00484-016-1230-z

ORIGINAL PAPER

Enhancement of urban heat load through social inequalities on an example of a fictional city King's Landing

M Žuvela-Aloise¹

Домашняя работа №4

Эссе на тему «Анализ публикации по моделированию городского климата»

- Выбрать статью в рецензируемом научном журнале на тему моделирования городского климата/погоды/метеорологического режима для реалистичных (не идеализированных) условий.
- Дать характеристику постановки задачи моделирования:
 - Какая решается прикладная проблема
 - Что есть целевая моделируемая переменная (переменные) – температура, влажность и пр.
- Дать характеристику используемой модели:
 - Масштаб описываемых процессов
 - Размерность
 - Степень сложности модели
 - Принцип построения модели
 - Какие важные, на ваш взгляд, процессы модель не учитывает?
- Дать характеристику входных данных для модели:
 - Метеорологический форсинг
 - Данные о застройке

Объем эссе 3-6 стр.



А теперь хакатон