



Учет аэрозольного эффекта в численных экспериментах с использованием системы COSMO-Ru-ART

*Кирсанов А.А.,
Чубарова Н.Е., Варенцов М.И.,
Ривин Г.С., Ольчев А.В.*

V Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата»,
19–21 ноября 2024 г. Москва



Актуальность моделирования атмосферного аэрозоля и газовых примесей



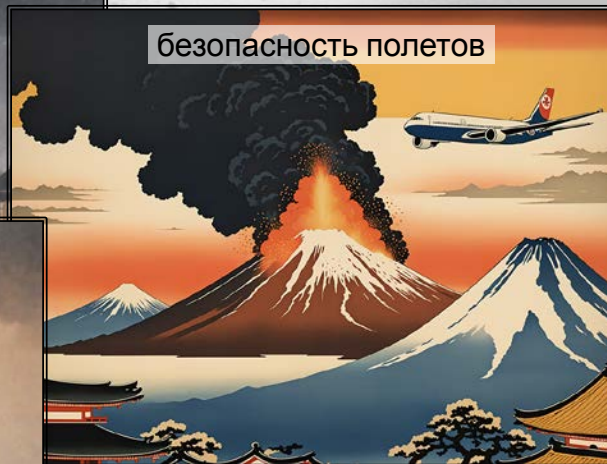
экосистемы и климат



образование осадков



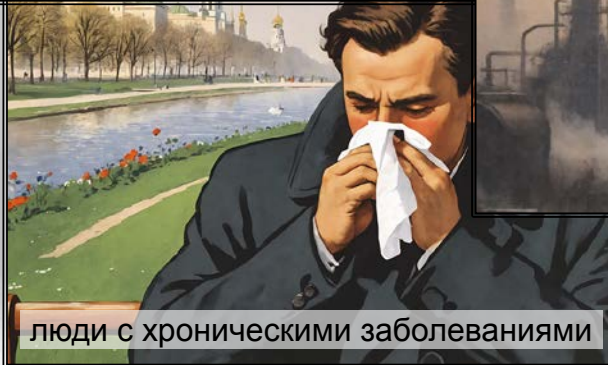
безопасность полетов



хозяйственная деятельность



люди с хроническими заболеваниями



здоровье населения



солнечная радиация





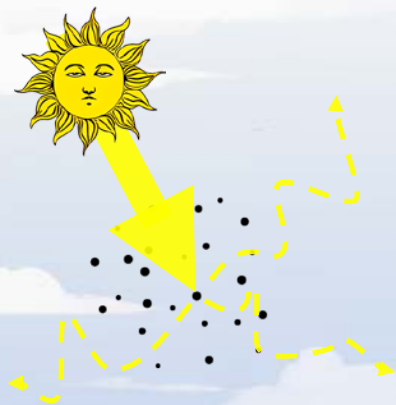
Взаимодействие между аэрозолем, газовыми примесями и компонентами Земной Системы



(Baklanov et al., 2014, <https://doi.org/10.5194/acp-14-317-2014>)

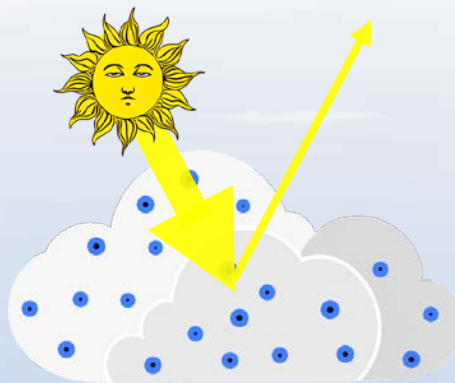


Взвешенные частицы в атмосфере: Влияние на погоду и климат



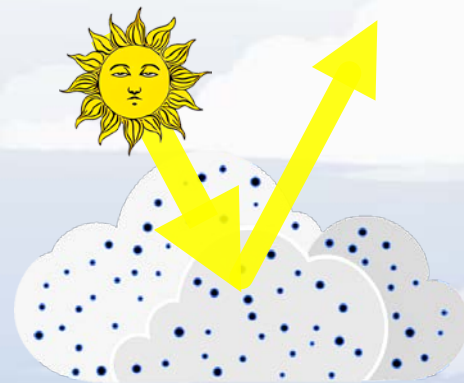
Прямой
эффект:

Поглощение
и рассеяние
радиации



1-й непрямой
эффект
(альбедный):
Увеличение
концентрации
облачных
капель

Больше ядер
конденсации



2-й непрямой
эффект:
Подавление
мороси,
Увеличение
высоты и времени
жизни облака

Полупрямой
эффект:

Испарение
облачных
капель

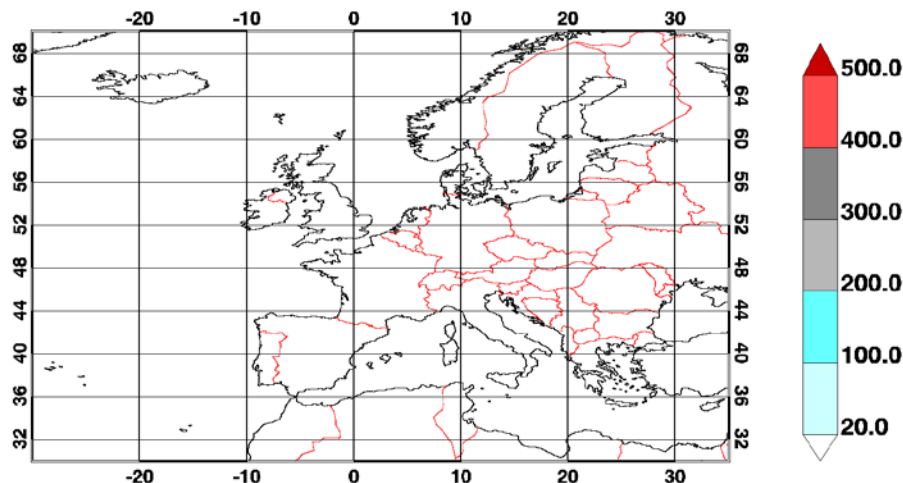


Моделирование случаев с высоким содержанием аэрозоля в атмосфере



Извержение вулкана Эйяфьядлайёкюдль, вулканический пепел

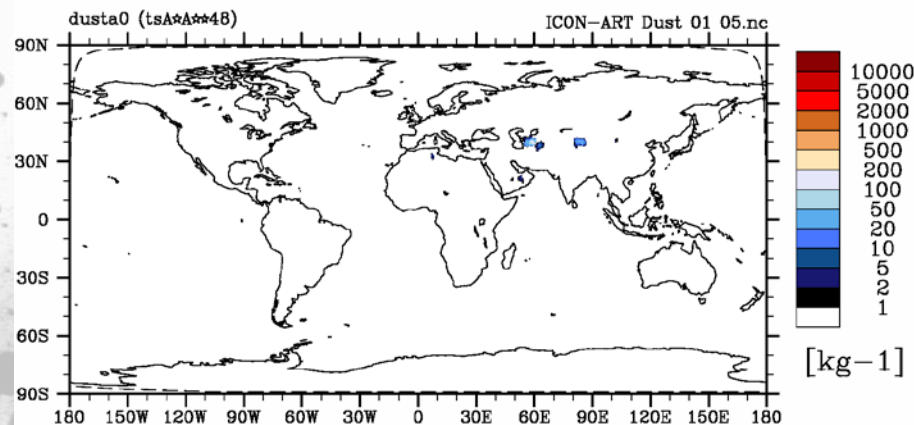
2010041400 UTC + 0 h
mean: 0.00 std: 0.00 min: 0.00 max: 0.00



ICON-ART, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, шаг сетки ~ 40 км,
высота уровня ~ 2300 м

Моделирование распространения минеральной пыли

Dust Mode a Number Conc. t=01



ICON-ART, число частиц пыли

(Bernhard Vogel, 2013, KIT/DWD)

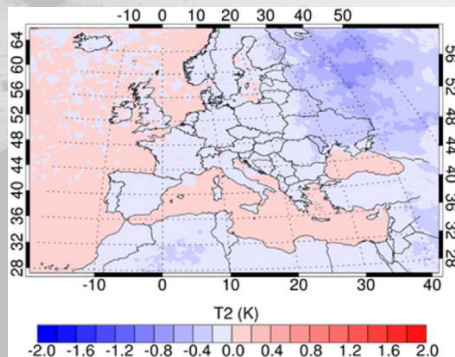


Моделирование случаев с высоким содержанием аэрозоля в атмосфере

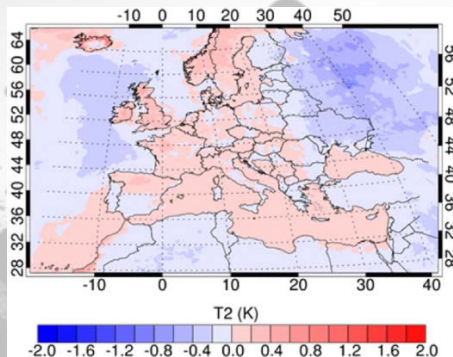


Эффект на температуру на уровне 2 м
лесных пожаров 2010 года

Влияние на осадки
морской соли (6.-7.11.11)



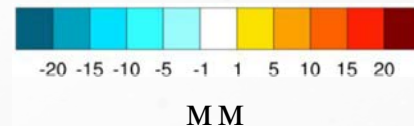
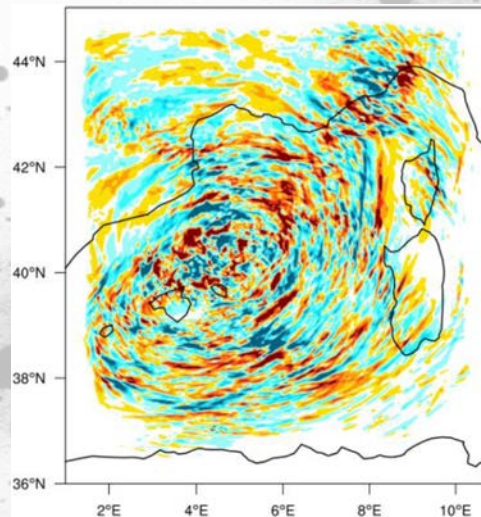
Прямой



Прямой + Непрямой

(Kong et al., 2015)

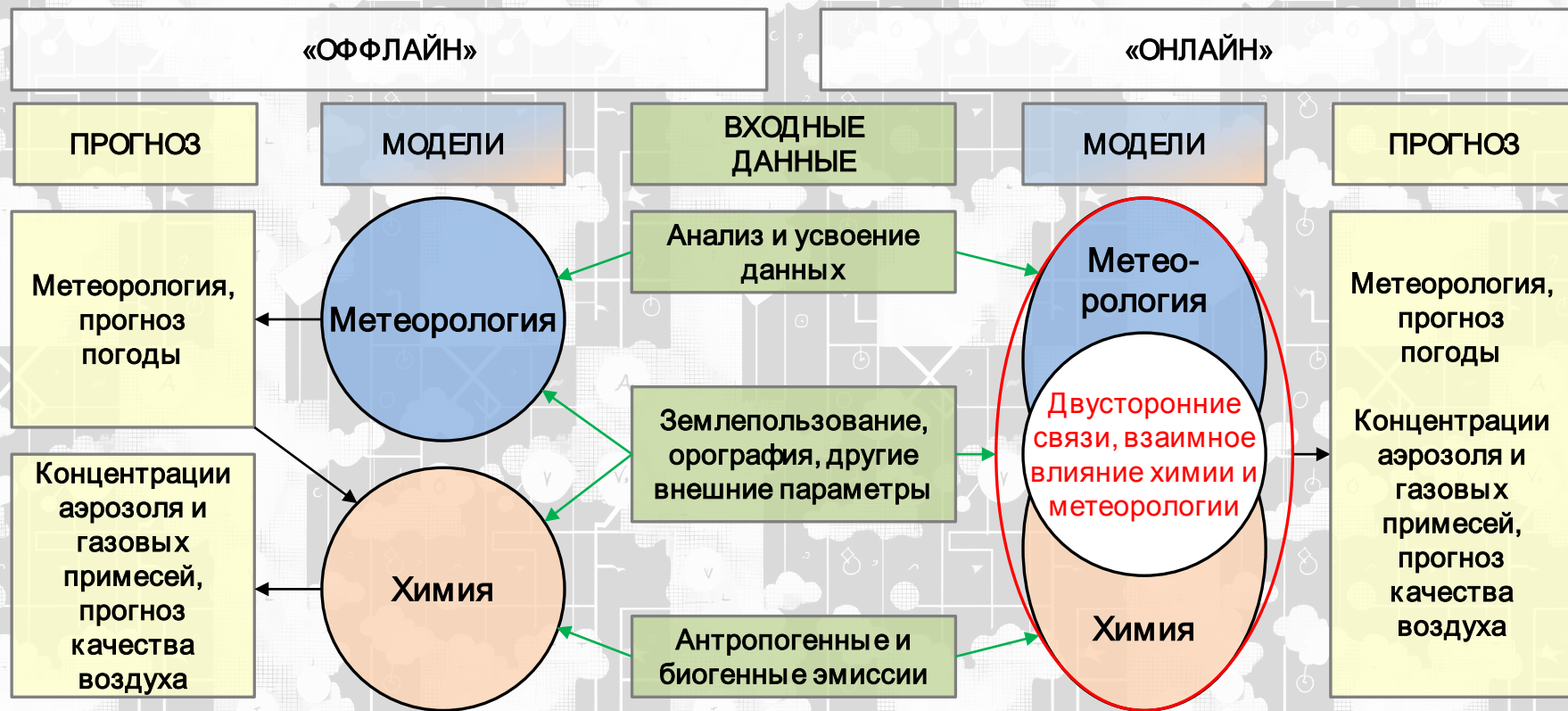
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.020>



(Bernhard Vogel, 2013, KIT/DWD)



Совместный расчет атмосферной динамики и атмосферной химии



(Baklanov et al., 2014, <https://doi.org/10.5194/acp-14-317-2014>)



COSMO-ART

COSMO

Consortium for **S**mall-scale
Modelling

ART

Aerosols and **R**eactive
Trace gases

метеорология

«online» подход

атмосферная
химия



ART (Aerosols and Reactive Trace gases)

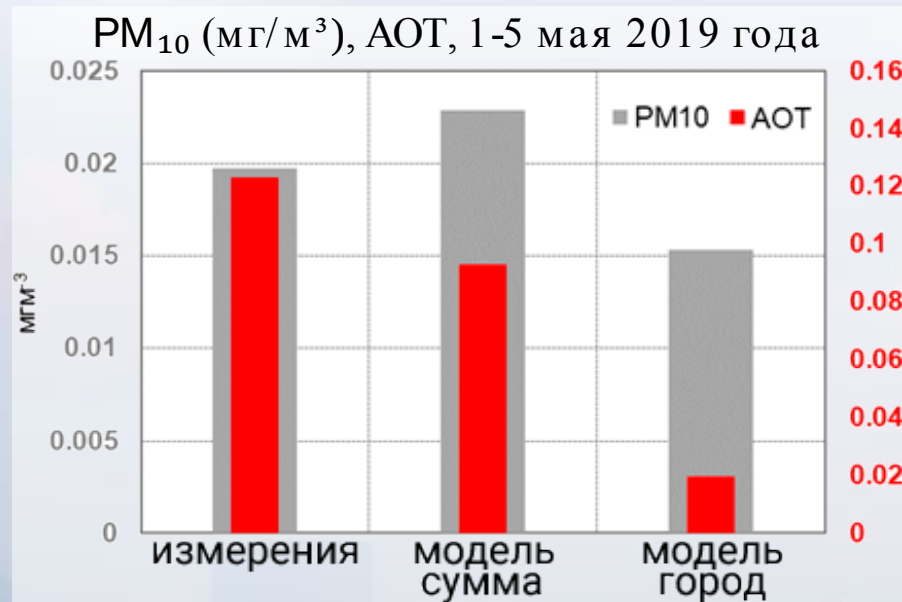


- негидростатическая мезометеорологическая модель
- химические реакции
- фотодиссоциация
- коагуляция
- конденсация
- нуклеация
- осаждение
- вымывание
- **обратные связи:**

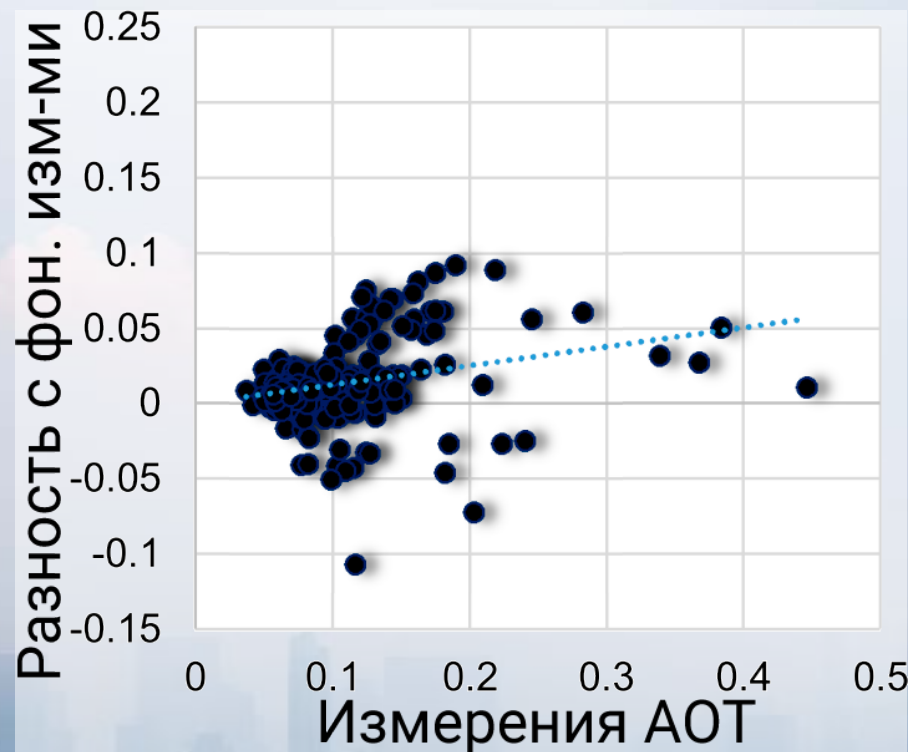
о коэффициент ослабления, альbedo
однократного рассеяния, фактор асимметрии
передаются для расчета **потоков радиации**
о число частиц и массовая концентрация
передаются для учета **ядер конденсации**



Исследования свойств аэрозоля: Метеорологическая Обсерватория МГУ



Город значительно влияет на приземные концентрации аэрозоля, но его влияние на AOT (Аэрозольную Оптическую Толщину) не определяющее

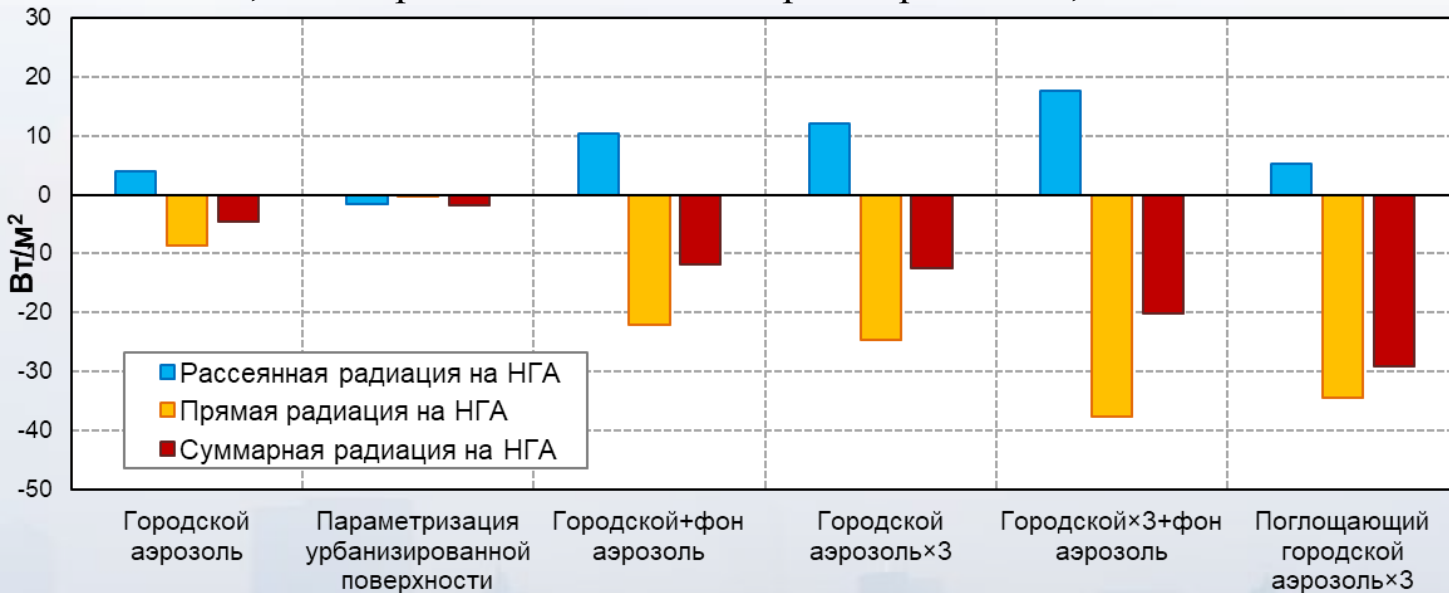




Средние различия в прямой, рассеянной, суммарной радиации на ниж ней границе атмосферы в различных экспериментах



Ясное небо, Метеорологическая Обсерватория МГУ, 28.4.2019-7.5.2019



TERRA_URB впервые запущена совместно с блоком ART (COSMO 6.0)

Под влиянием
атмосферного
аэрозоля:

- Снижение
приходящей прямой
коротковолновой
радиации
- Повышение
приходящей
рассеянной радиации
- При повышении
доли поглощающего
аэрозоля меньше
рассеянной радиации

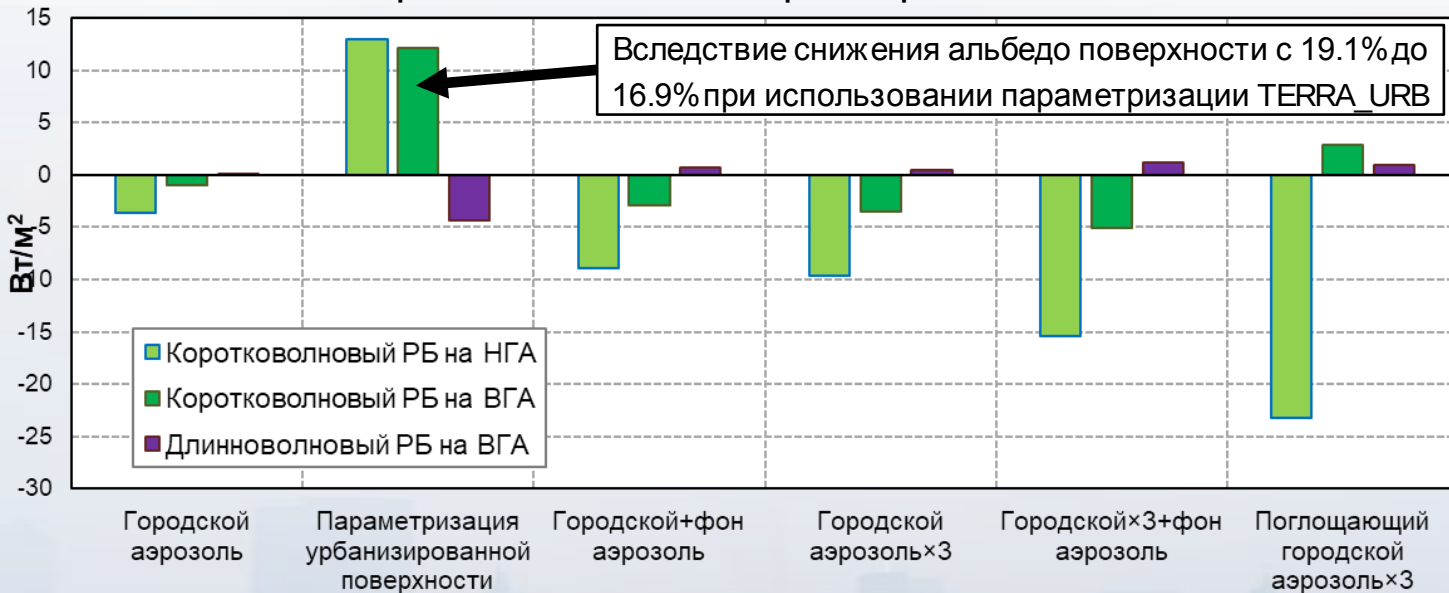
(Chubarova et al., 2022; Chubarova et al., 2024; Varentsov et al., 2020)



Средние различия в радиационном балансе на ниж ней/верхней границе атмосферы в различных экспериментах



Ясное небо, Метеорологическая Обсерватория МГУ, 28.4.2019-7.5.2019



Под влиянием атмосферного аэрозоля:

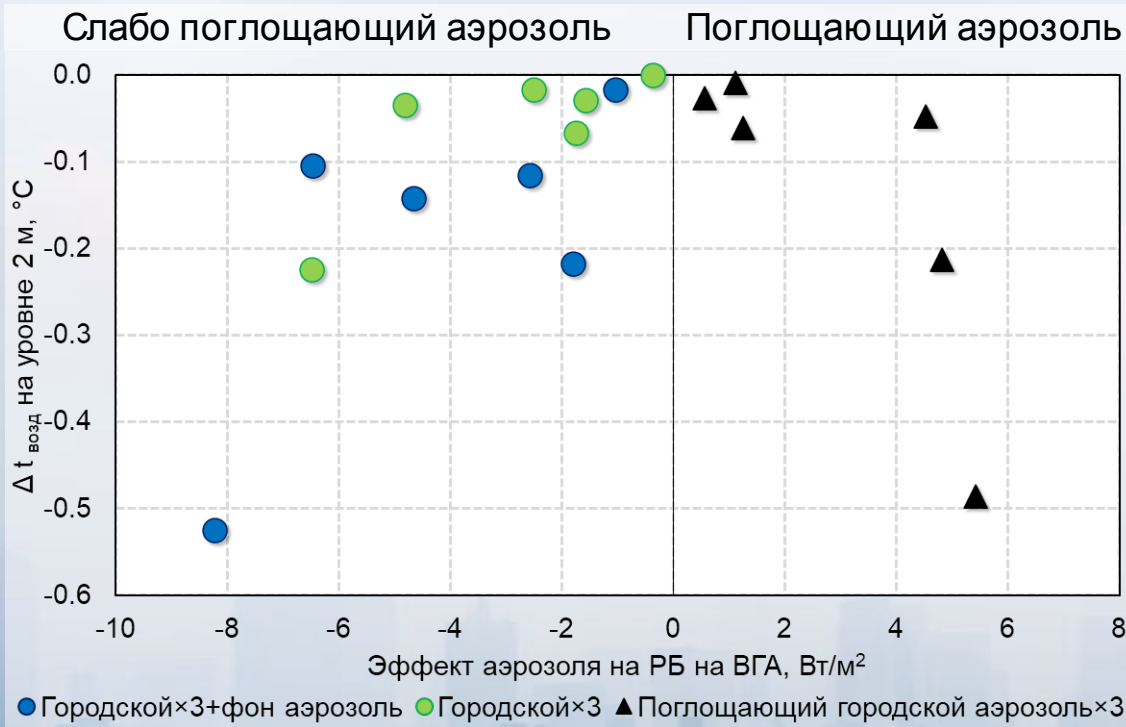
- Снижение коротковолнового радиационного баланса на НГА
- При повышении доли поглощающего аэрозоля коротковолновый РБ на ВГА повышается

TERRA_URB впервые запущена совместно с блоком ART (COSMO 6.0)

(Chubarova et al., 2022; Chubarova et al., 2024; Varentsov et al., 2020)



Аэрозольный эффект на температуру воздуха на уровне 2 м



- При повышенной доли поглощающего аэрозоля его эффект повышает значения радиационного баланса на верхней границе атмосферы
- Как слабо поглощающий аэрозоль, так и при повышенной доли черного углерода аэрозольный эффект приводит к снижению температуры воздуха на уровне 2 м

Ясное небо, Метеорологическая
Обсерватория МГУ, 28.4.2019-7.5.2019

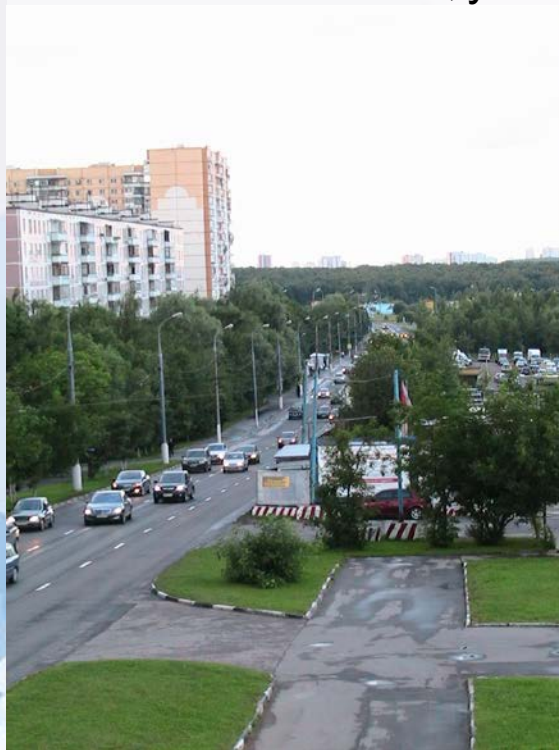


Пожары лета 2010 года на территории ЦФО



Москва, ул. Айвазовского

17 июня
2010



7 августа
2010





Расчет эмиссий от пожаров

$$E = \varphi \cdot \alpha \cdot FRP$$

MODIS FRP
(Fire Radiative Power)

Тип земной
поверхности MODIS

α – эмпирический коэффициент

Локализация лесных
пожаров и скорость
сгорания биомассы
($\alpha \cdot FRP$)

Эмиссионные
коэффициенты
(факторы эмиссии, φ)

Пирогенные эмиссии,
связанные с лесными
пожарами (E)

- Данные MODIS FRP (Fire Radiative Power) появляются в **открытом доступе**
- Задержка появления данных как правило менее суток, что делает их **актуальными для прогноза**
- Возможно использование данных для **любой территории**
- Очаги лесных пожаров могут **недооцениваться** при задымлении и облачности
- Встречаются **«ложные тревоги»** из-за работы промышленности



Механизмы влияния лесных пожаров на региональные условия погоды



Выделение тепла и влаги во время пожара:

- сверхвысокие приземные температуры
- конвективные потоки
- высота выброса аэрозоля

Изменение свойств подстилающей поверхности:

- повреждение растительности
- изменение альбедо

Выброс дымового аэрозоля в атмосферу:

- поглощение потоков радиации
- ядра конденсации



Сценарии численных экспериментов



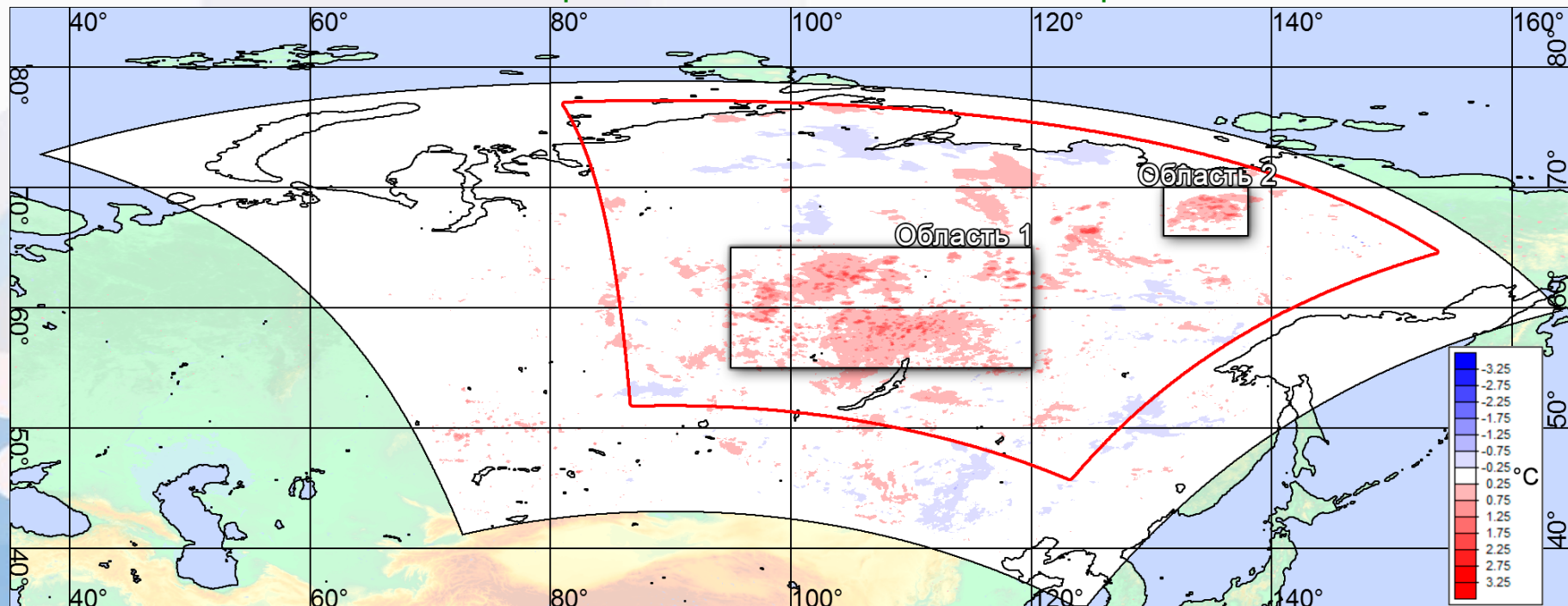
Контрольный эксперимент	Лесные пожары (без ART)	Лесные пожары (с ART)
Нет изменений подстилающей поверхности. Нет дымового аэрозоля. Стандартные настройки запуска модели.	Влияние на подстилающую поверхность: - сокращение лесного покрова до нуля - уменьшение листового индекса (LAI) до нуля - снижение альбедо поверхности до 10% Не учитывается дымовой аэрозоль.	Влияние на подстилающую поверхность и дымовой аэрозоль: - сокращение лесного покрова до нуля - уменьшение листового индекса (LAI) до нуля - снижение альбедо поверхности до 10% влияние дымового аэрозоля



Температура на уровне 2 м (средняя за период), разность лесные пожары (без ART) – контрольный эксперимент



Влияние повреждения подстилающей поверхности



Область 1: $+0.2^{\circ}\text{C}$ ($+1.1^{\circ}\text{C}$, выгоревшие ячейки); Область 2: $+0.2^{\circ}\text{C}$ ($+0.8^{\circ}\text{C}$, выгоревшие ячейки)

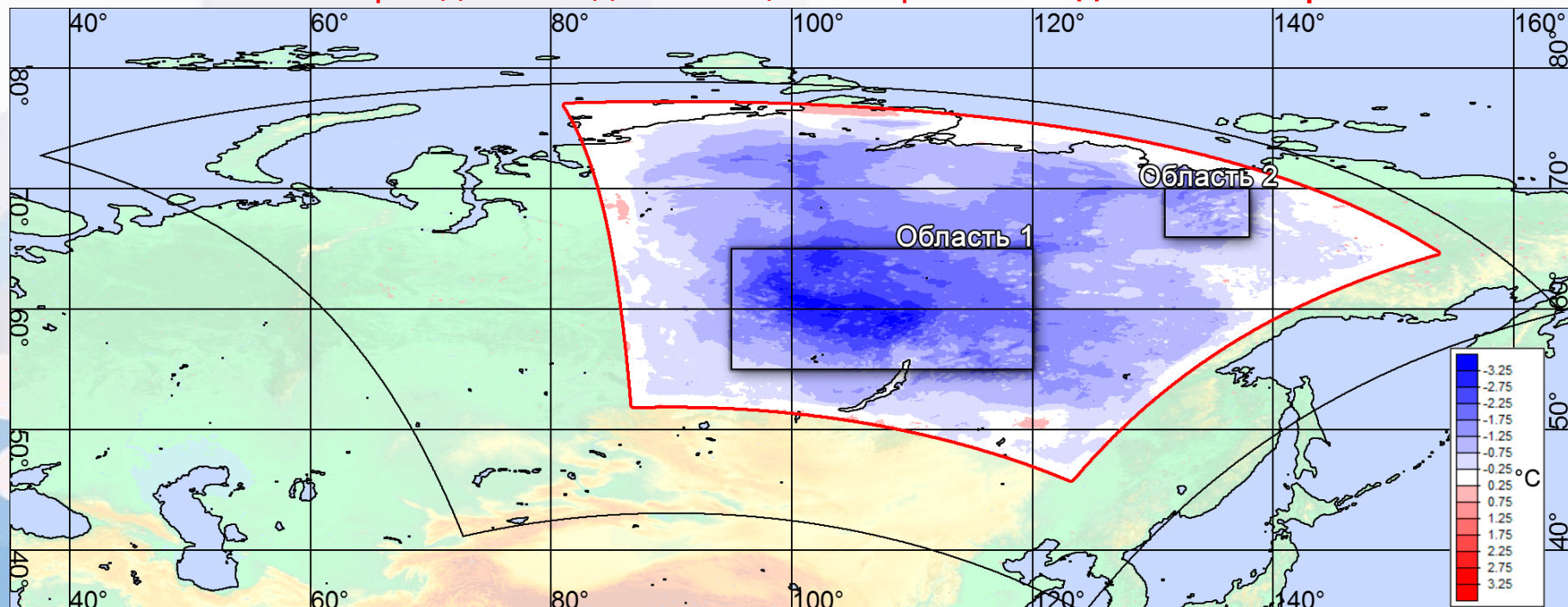
Основные различия наблюдаются на участках, пострадавших от лесных пожаров

(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Температура на уровне 2 м (средняя за период), разность лесные пожары (с ART) – контрольный эксперимент

Влияние повреждения подстилающей поверхности и дымового аэрозоля



Область 1: -2.0°C (-1.4°C , выгоревшие ячейки); Область 2: -1.1°C (-0.2°C , выгоревшие ячейки)
Основные различия наблюдаются в областях наибольшей аэрозольной оптической толщины

(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Воспроизведенное моделью влияние лесных пожаров на погодные условия





Воспроизводимое моделью влияние аэрозоля на осадки



Больше ядер
конденсации

Капли меньшего
размера при той же
водности облака

Возрастает оптическая толщина облака

Отложенные или
не выпавшие
осадки

Размер капель
продолжает расти?

Более
интенсивные
осадки



Заключение



- Атмосферный аэрозоль поглощает и рассеивает проходящую солнечную радиацию (прямой эффект), а также оказывает влияние на облачные характеристики, оптическую плотность облаков (непрямой эффект), эти эффекты воспроизводятся в модели COSMO-ART
- Расчеты системы COSMO-Ru-ART показывают, что в Москве фоновый аэрозоль оказывает большее влияние на аэрозольную оптическую толщину, чем городской аэрозоль, в то время как на приземные концентрации PM_{10} город оказывает большее влияние
- Как поглощающий, так и слабо поглощающий аэрозоль приводят к снижению приземной температуры
- Расчеты показали, что в случае интенсивных лесных пожаров 2019 года в Сибири атмосферный аэрозоль снижает приземную температуру сильнее, чем она повышается вследствие повреждения растительности



Спасибо за внимание!

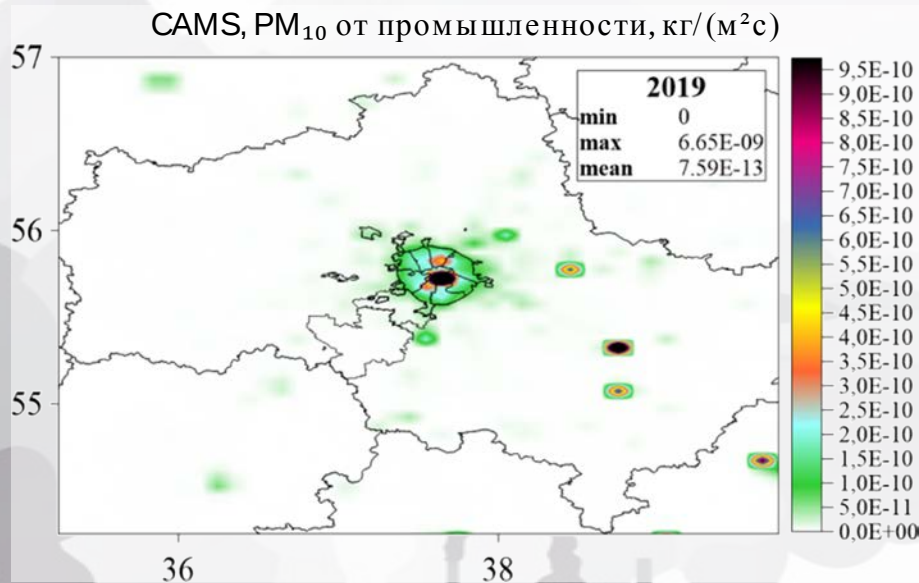


Уточнение инвентаризаций эмиссий

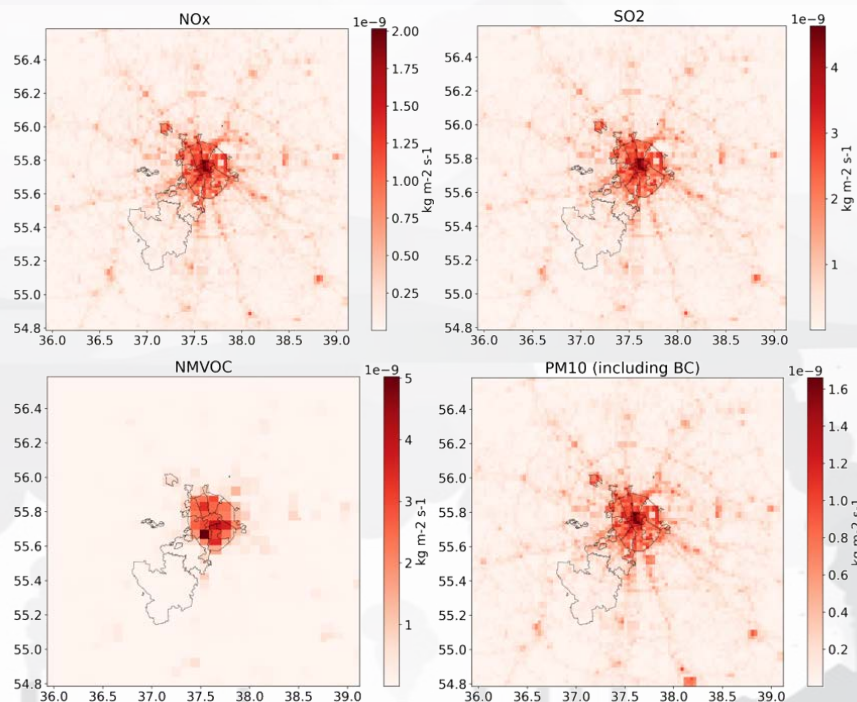


ДО

ПОСЛЕ



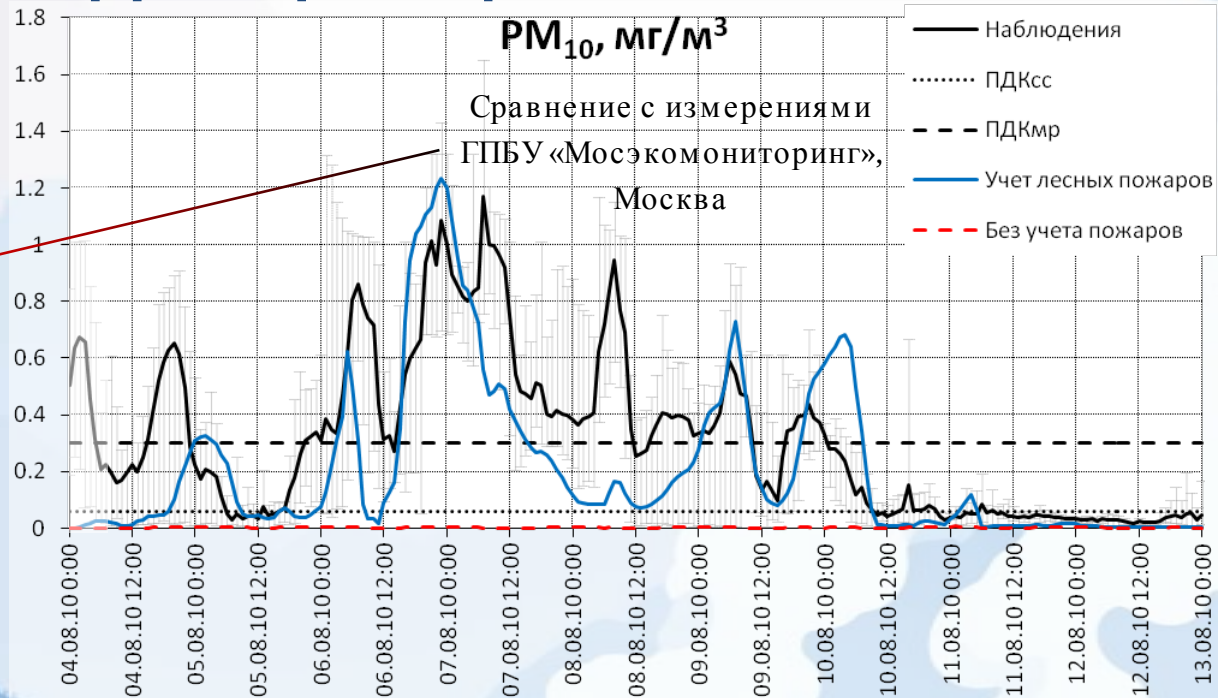
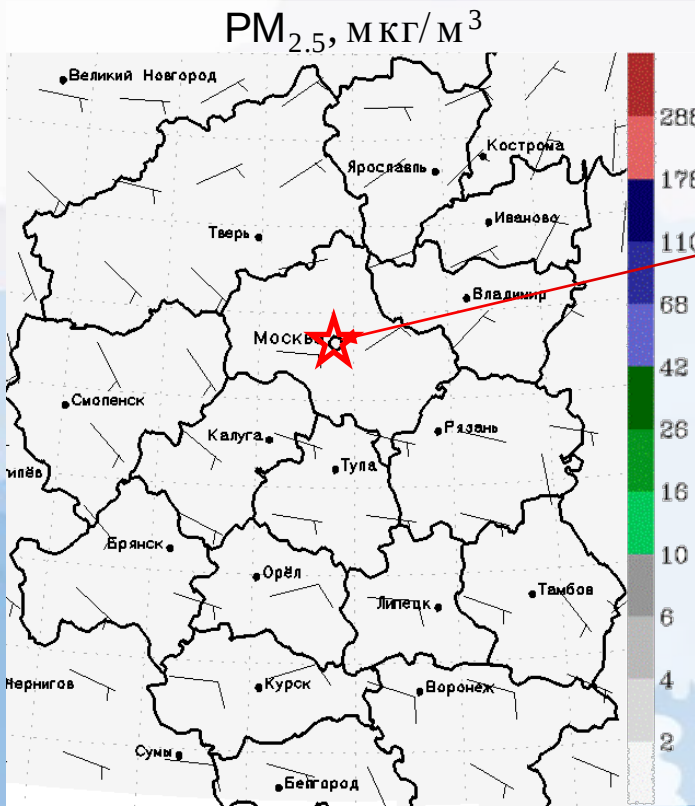
С использованием картографических данных, сведений из доклада о состоянии окружающей среды в городе Москве, анализа данных измерений



(Chubarova et al., 2024, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101762>)



Пожары лета 2010 года на территории ЦФО



Значительные превышения ПДК
воспроизведены моделью



Сценарии численных экспериментов



Контрольный
эксперимент

Лесные пожары
(без ART)

Лесные пожары
(с ART)

Влияние на
подстилающую
поверхность



Влияние
дымового
аэрозоля

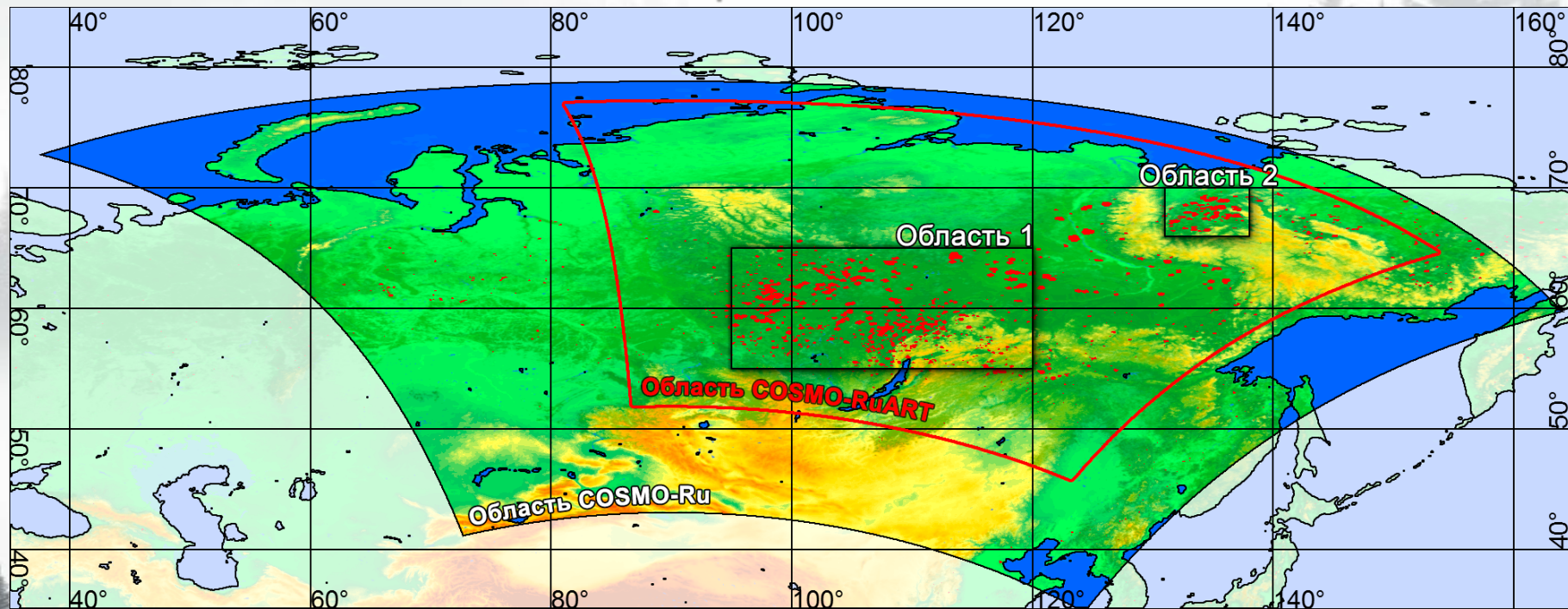




Влияние лесных пожаров на погодные условия: пожары 2019 года в Сибири



1 – 14 августа 2019 года, **Красные** точки на карте – **очаги лесных пожаров** по данным MODIS:
«выгоревшие ячейки»



COSMO-Ru: 735 × 600 узлов, шаг сетки 6,6 км, 40 уровней по вертикали, ICBC – ICON

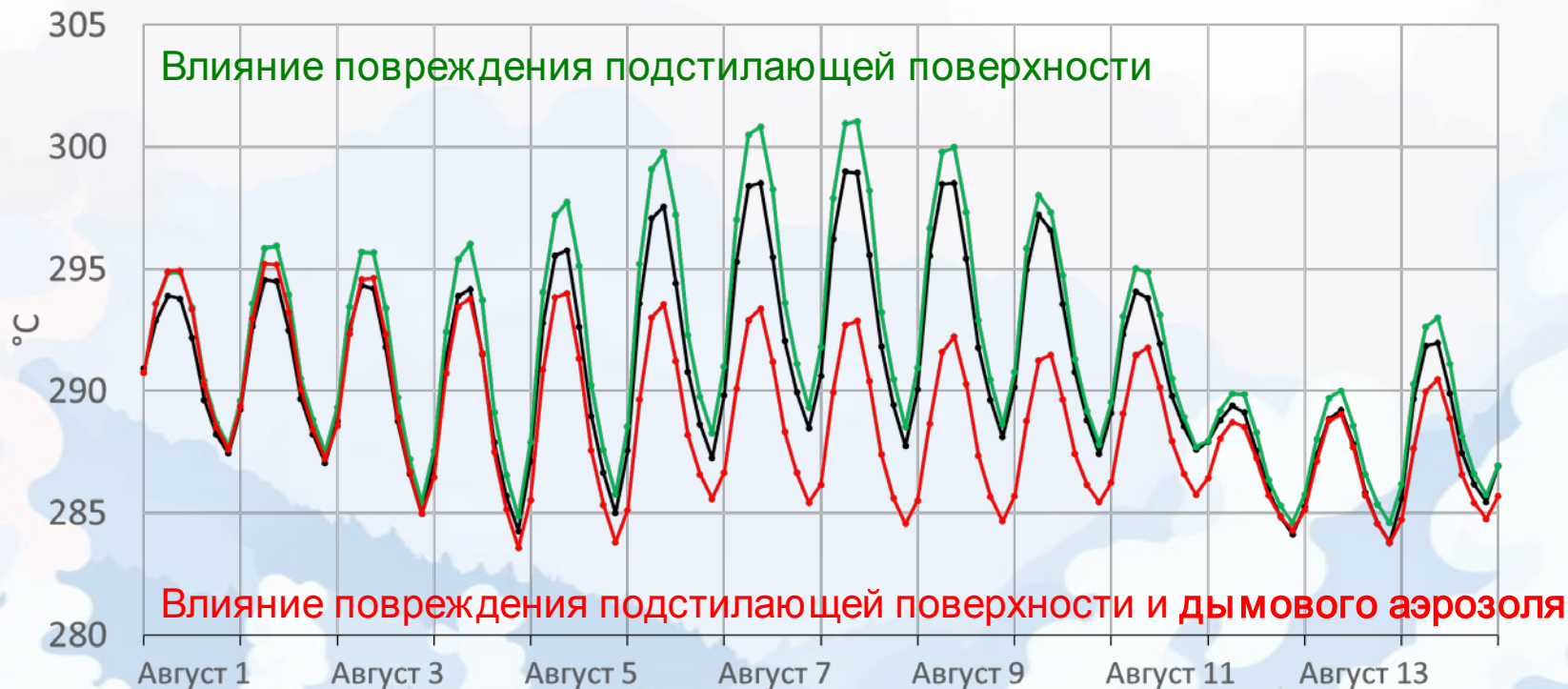
COSMO-RuART: 420 × 420 узлов, шаг сетки 6,6 км, 40 уровней по вертикали, ICBC – COSMO-Ru



Температура на уровне 2 м, Область 1 (только выгоревшие ячейки)



— Контрольный эксперимент — Лесные пожары (без ART) — Лесные пожары (с ART)



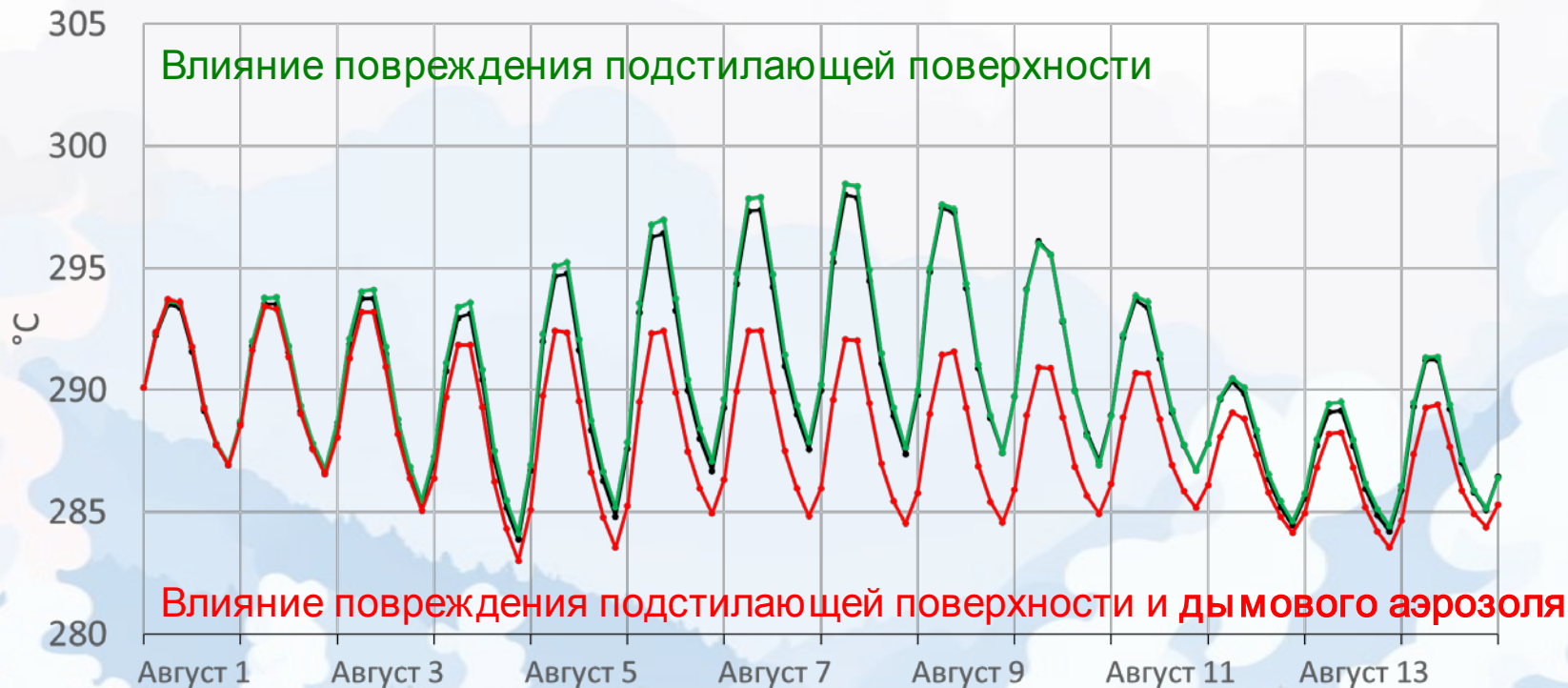
(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Температура на уровне 2 м, Область 1 (все ячейки)

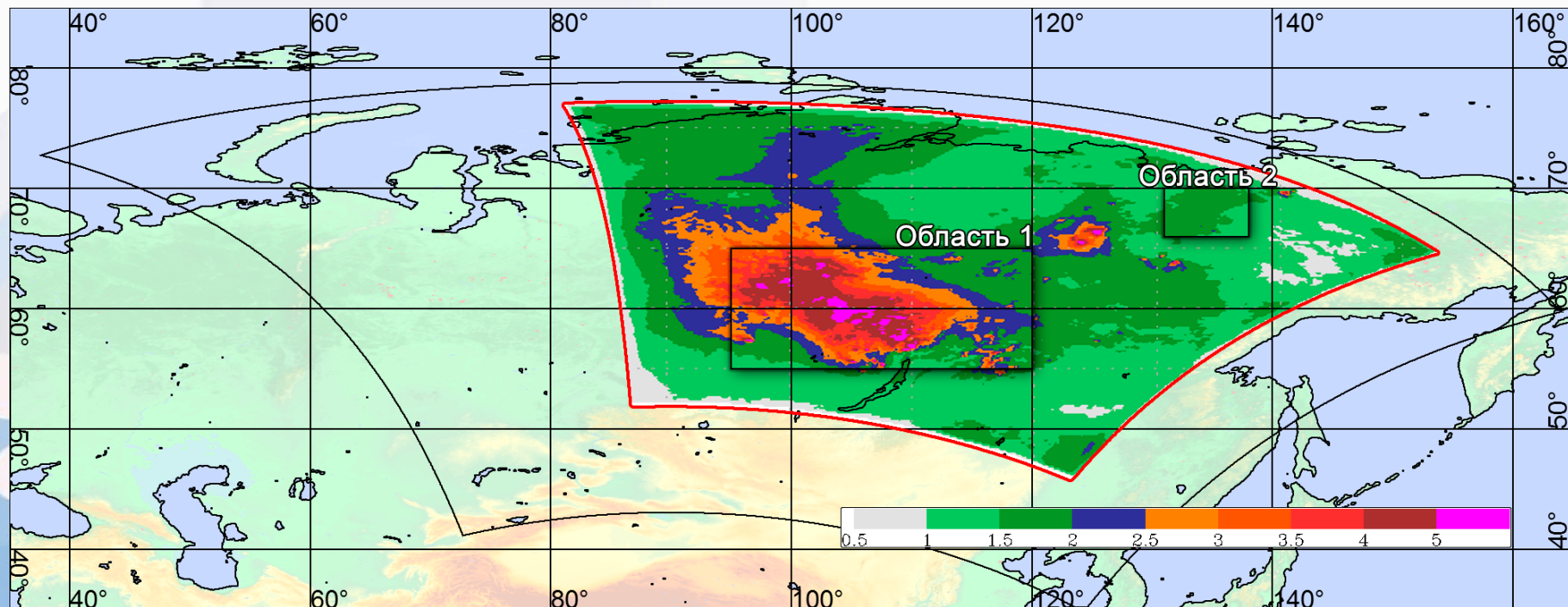


— Контрольный эксперимент — Лесные пожары (без ART) — Лесные пожары (с ART)





Рассчитанная COSMO-RuART аэрозольная оптическая толщина в исследуемый период



Особенно высокие значения в Области 1

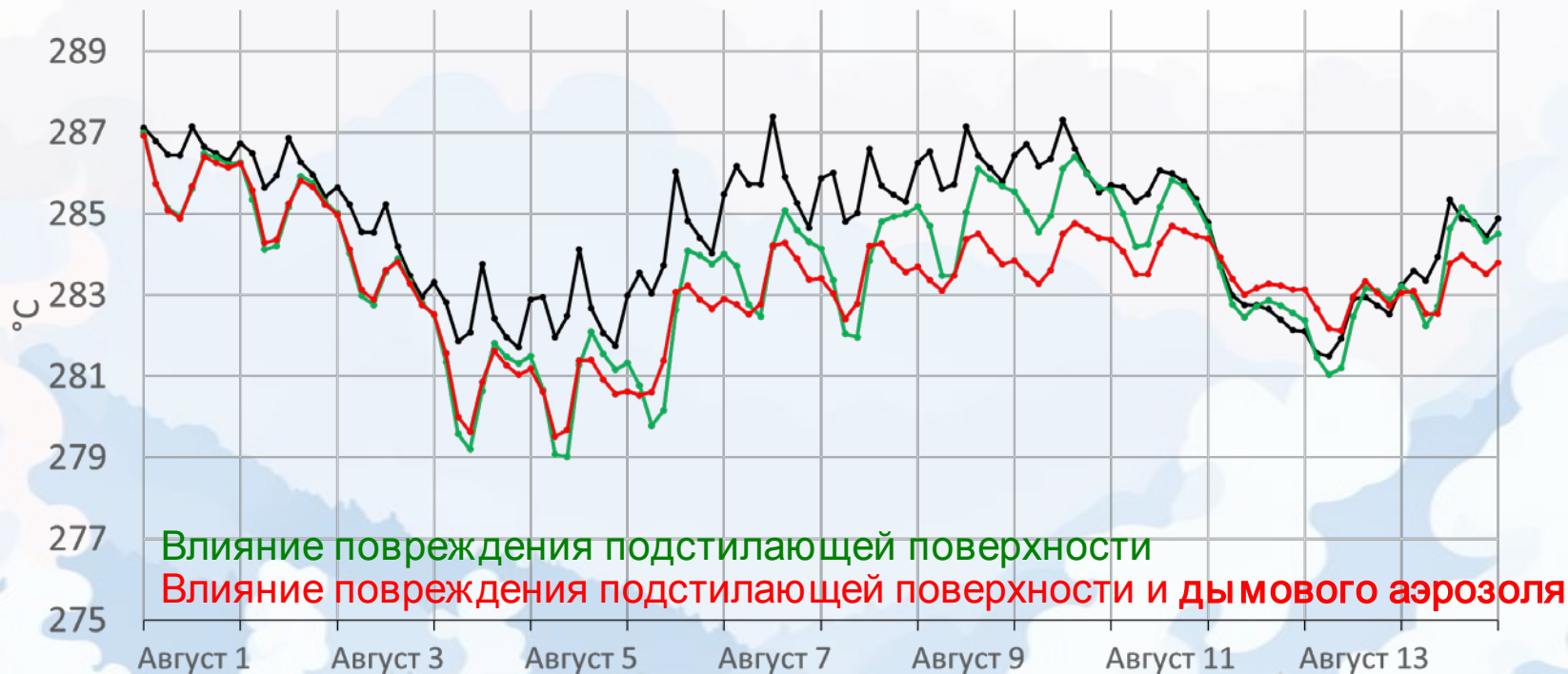
(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Температура точки росы на уровне 2 м, Область 1 (только выгоревшие ячейки)



— Контрольный эксперимент — Лесные пожары (без ART) — Лесные пожары (с ART)



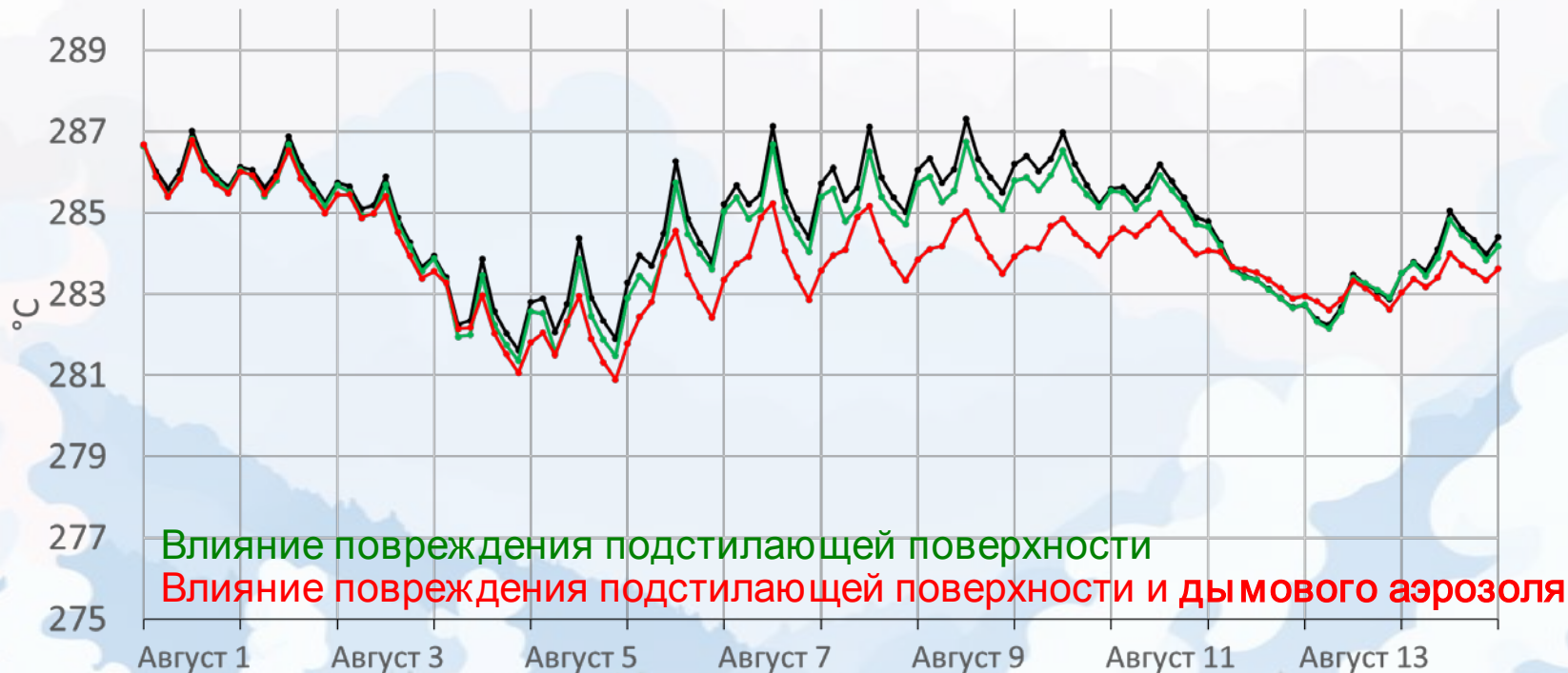
(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Температура точки росы на уровне 2 м, Область 1 (все ячейки)

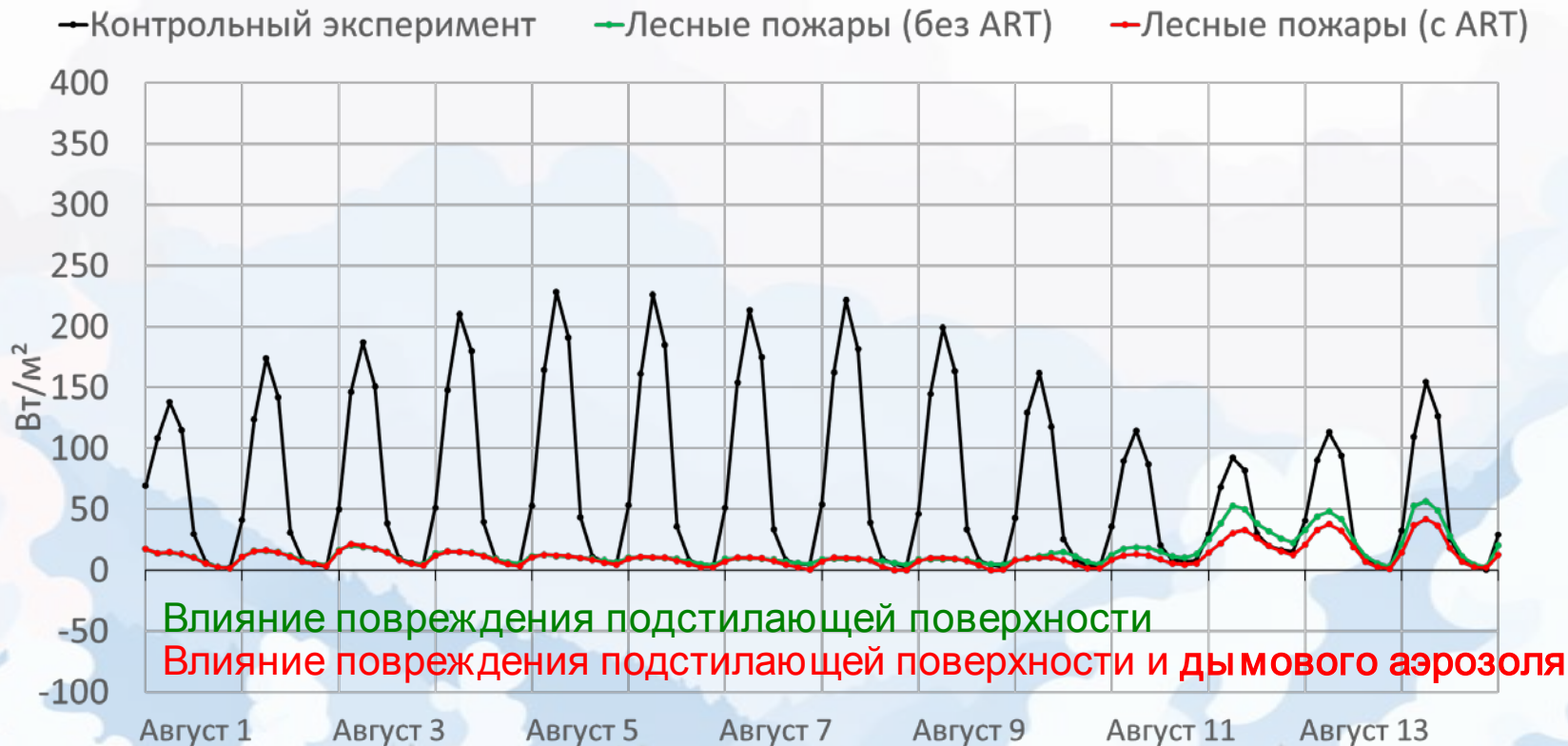


— Контрольный эксперимент — Лесные пожары (без ART) — Лесные пожары (с ART)





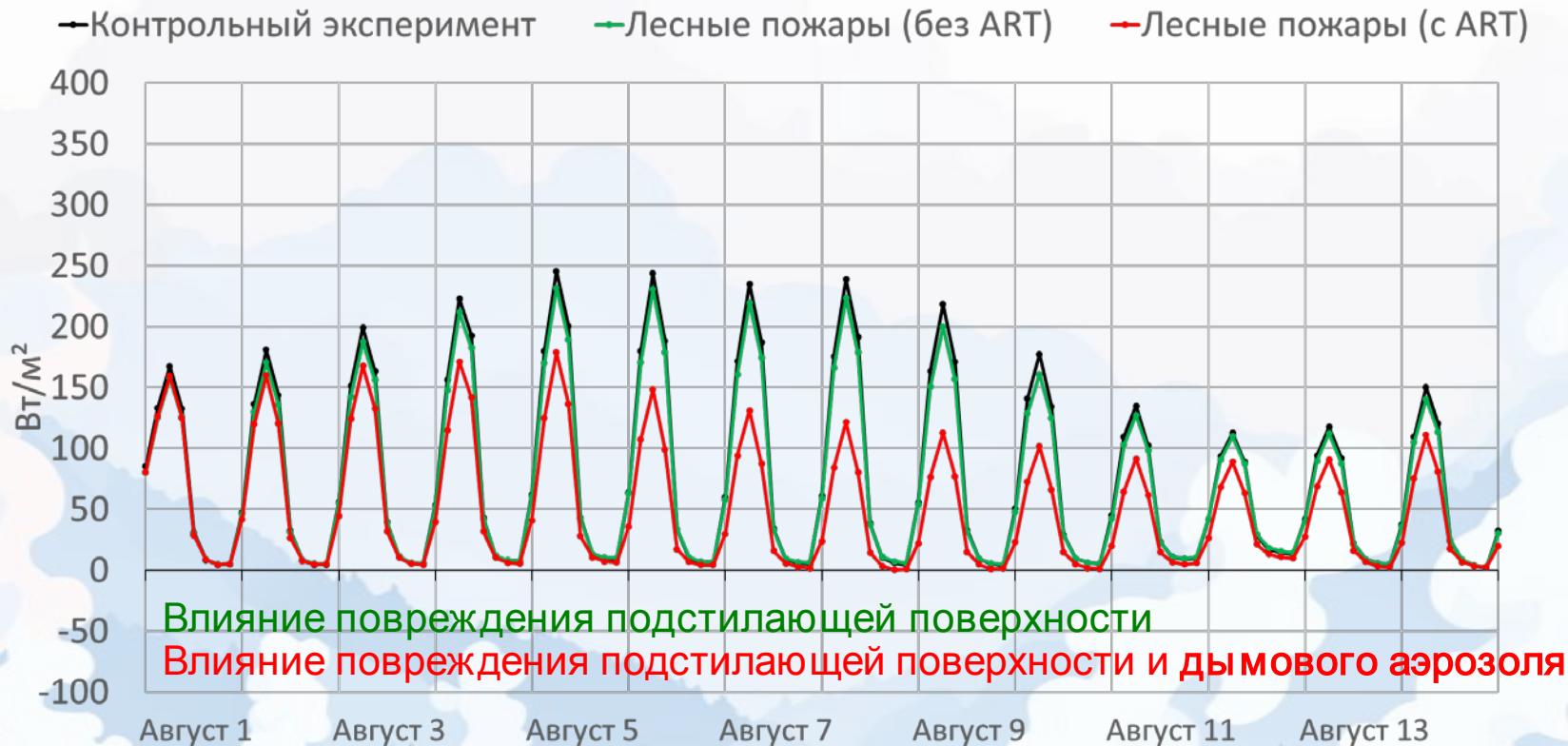
Поток скрытого тепла (вверх), Область 1 (только выгоревшие ячейки)



(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



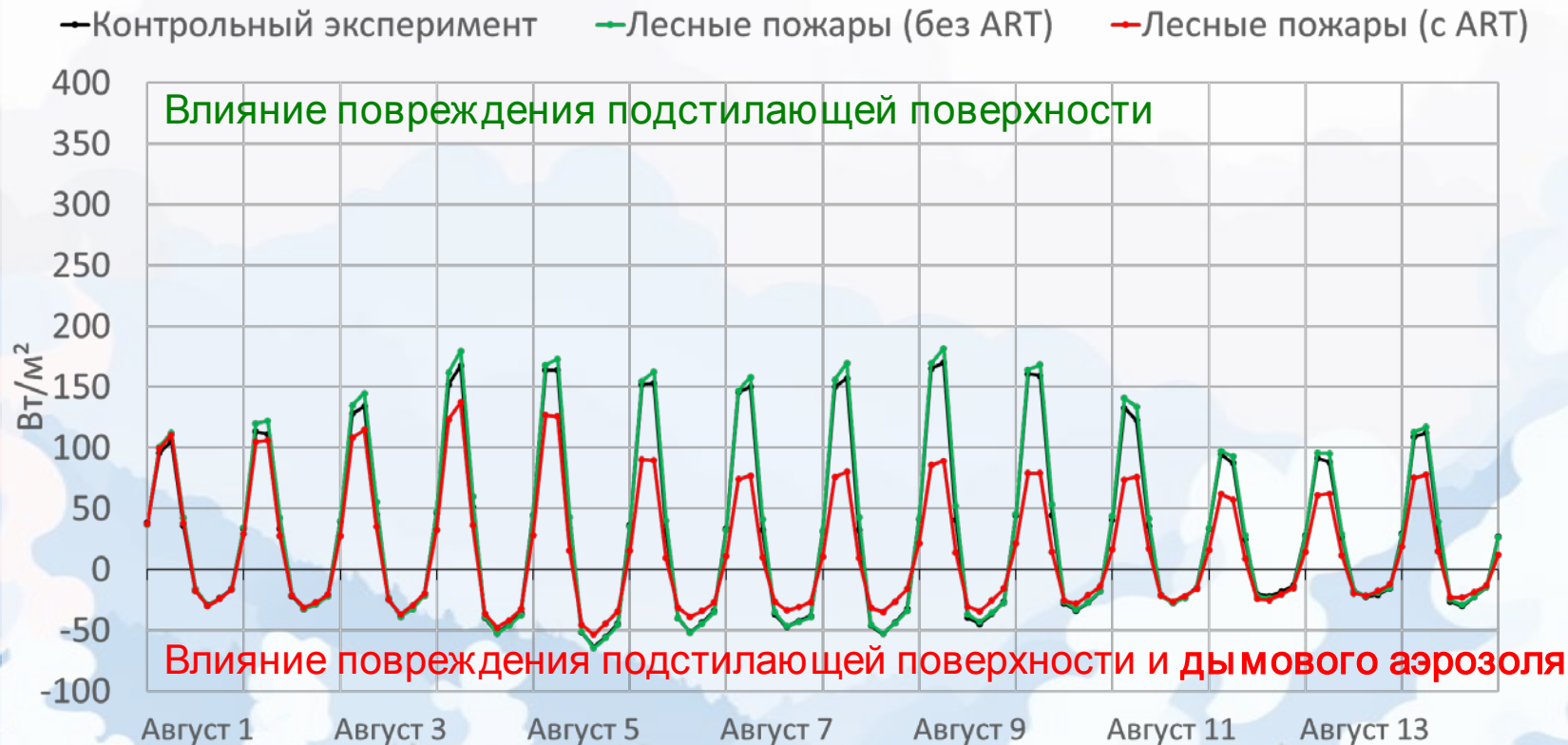
Поток скрытого тепла (вверх), Область 1 (все ячейки)



(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Поток явного тепла (вверх), Область 1 (все ячейки)





Поток явного тепла (вверх), Область 1 (только выгоревшие ячейки)



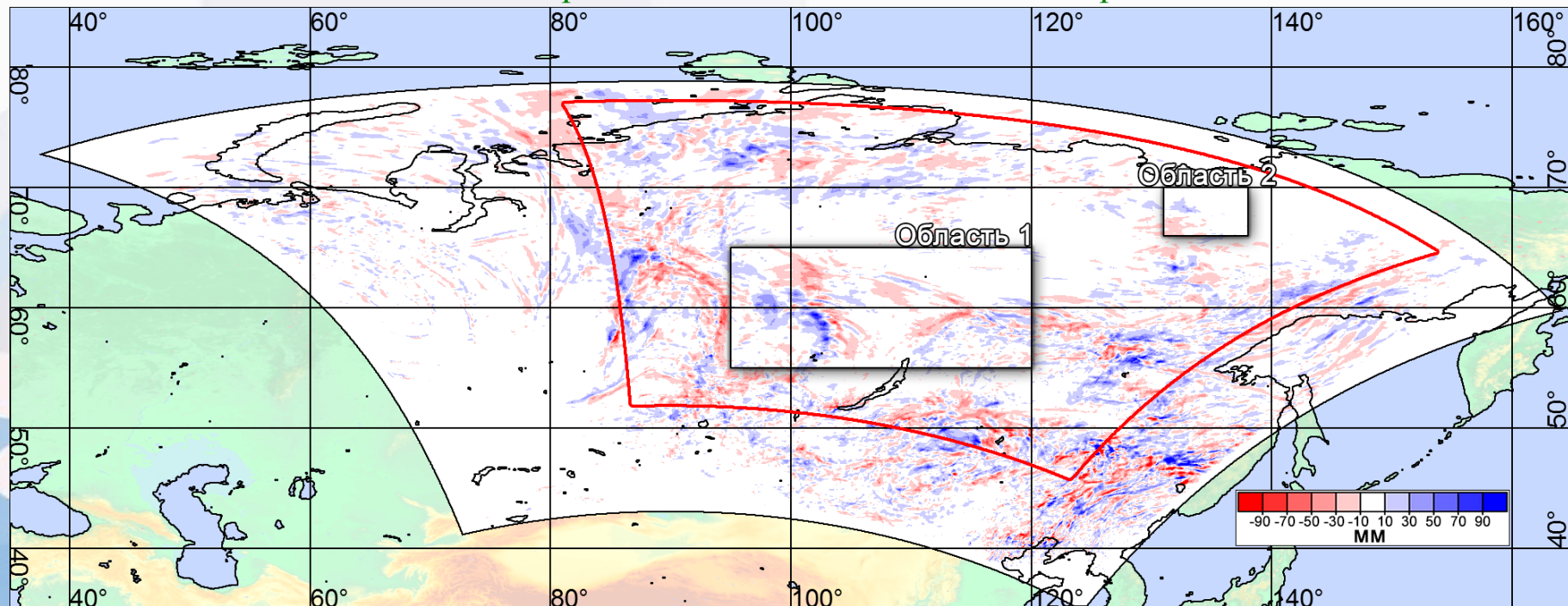
(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Осадки (сумма за исследуемый период), разность лесные пожары (без ART) – контрольный эксперимент



Влияние повреждения подстилающей поверхности



Область 1: -0.5 мм (-2%, +1.6 мм над выгоревшими ячейками)

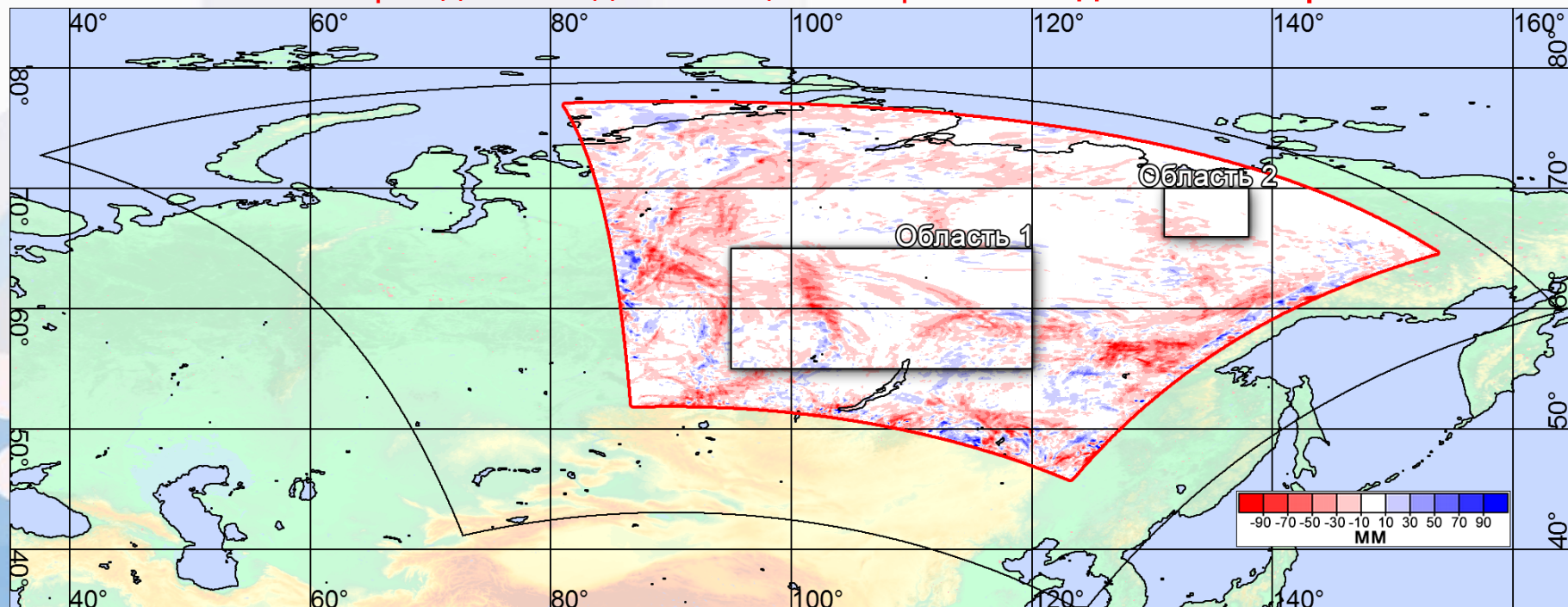
Область 2: -0.2 мм (-3%, +1.1 мм над выгоревшими ячейками)



Осадки (сумма за исследуемый период), разность лесные пожары (с ART) – контрольный эксперимент



Влияние повреждения подстилающей поверхности и дымового аэрозоля



Область 1: -7.5 мм (-25%, -8.5 мм над выгоревшими ячейками)

Область 2: -5.1 мм (-67%, -3.5 мм над выгоревшими ячейками)

(Kirsanov et al., 2020, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>)



Ссылки на источники



- Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., Carmichael, G., Douros, J., Flemming, J., Forkel, R., Galmarini, S., Gauss, M., Grell, G., Hirtl, M., Joffre, S., Jorba, O., Kaas, E., Kaasik, M., Kallos, G., Kong, X., Korsholm, U., Kurganskiy, A., Kushta, J., Lohmann, U., Mahura, A., Manders-Groot, A., Maurizi, A., Moussiopoulos, N., Rao, S. T., Savage, N., Seigneur, C., Sokhi, R. S., Solazzo, E., Solomos, S., Sørensen, B., Tsegas, G., Vignati, E., Vogel, B., and Zhang, Y.: Online coupled regional meteorology chemistry models in Europe: current status and prospects, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 317–398, <https://doi.org/10.5194/acp-14-317-2014>, 2014.
- Alexander Baklanov, Yang Zhang, *Advances in air quality modeling and forecasting*, Global Transitions, Volume 2, 2020, Pages 261-270, ISSN 2589-7918, <https://doi.org/10.1016/j.glt.2020.11.001>.



Ссылки на источники



- Seinfeld J.H. and Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change (2nd Edition). – New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006. – 1232 p.
- Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
- Haywood, J. & Boucher, Olivier. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. Reviews of Geophysics. 38. <https://doi.org/10.1029/1999RG000078>.



Ссылки на источники



- Vogel, B., Vogel, H., Bäumer, D., Bangert, M., Lundgren, K., Rinke, R., Stanelle, T. (2009), The comprehensive model system COSMO-ART - Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale, Atmos. Chem. Phys., 9, 8661-8680, <https://doi.org/10.5194/acp-9-8661-2009>.
- Vogel, B., Ferrone, A., Schad, T. (2013): Reducing the Uncertainties of Climate Projections: High-Resolution Climate Modeling of Aerosol and Climate Interactions on the Regional Scale Using COSMO-ART, High Performance Computing in Science and Engineering '13 2013, 553-555, https://doi.org/10.1007/978-3-319-02165-2_38.



Ссылки на источники



- Вильфанд Р.М., Кирсанов А.А., Ревокатова А.П., Ривин Г.С., Суркова Г.В. Прогноз перемещения и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере с помощью модели COSMO-ART // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 5. – С. 31-40. <https://doi.org/10.3103/S106837391705003X>.
- Ривин Г. С., Вильфанд Р. М., Киктев Д. Б., Розинкина И. А., Тудрий К. О., Блинов Д. В., Варенцов М. И., Самсонов Т. Е., Бундель А. Ю., Кирсанов А. А., Захарченко Д. И. Система численного прогнозирования явлений погоды, включая опасные, для Московского мегаполиса: разработка прототипа // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 11. — С. 33–45. <https://doi.org/10.3103/S1068373919110025>.
- Revokatova A.P., Kislov A.V., Surkova G.V., Kirsanov A.A., Rivin G.S., Vogel B., Vogel H. Short-Term Forecast of the Carbon Monoxide Concentration Over the Moscow Region by COSMO-ART // Pure and Applied Geophysics. – 2019. – 176 – P. 885–899. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2001-z>.



Ссылки на источники



- Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Popovicheva O.B., Vogel B., Rivin G.S. Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2022. — № 22. — pp. 10443–10466. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-22-10443-2022>.
- Chubarova N.E., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Varentsov M.I., Rivin G.S. Urban aerosol, its radiative and temperature response in comparison with urban canopy effects in megacity based on COSMO-ART modelling // Urban Climate, Volume 53, 2024, 101762, ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101762>.
- Varentsov, M.; Samsonov, T.; Demuzere, M. Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment. Atmosphere 2020, 11, 1349. <https://doi.org/10.3390/atmos11121349>.



Ссылки на источники



- Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Лезина Е.А. Тестирование и перспективы технологии прогнозирования загрязнения воздуха с применением химических транспортных моделей CHIMERE и COSMO-Ru2ART // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2022. — № 4 (386). — С. 147-170. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-147-170>.
- Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Ткачева Ю.В., Ривин Г.С., Кирсанов А.А., Борисов Д.В., Лезина Е.А. Система прогнозирования качества воздуха на основе химических транспортных моделей // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. — 2019. — № 4 (374). — С. 203-218.
- Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Глазкова А.А., Захарова П.В., Лезина Е.А., Звягинцев А.М. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С.154-172.



Ссылки на источники



- Wooster, M. J.; Roberts, G.; Perry, G.L.W.; Kaufman Y.J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. J. Geophys. Res. 2005, 110, 24 p. <https://doi.org/10.1029/2005JD006018>.
- Kaiser, J.W.; Heil, A.; Andreae, M.O.; Benedetti, A.; Chubarova, N.; Jones, L.; Morcrette, J.-J.; Razinger, M.; Schultz, M.G.; Suttie, M.; van der Werf, G.R. Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. Biogeosciences 2012, 9. 527-554. <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>.
- Wiedinmyer, C.; Akagi, S.K.; Yokelson, R.J.; Emmons, L.K.; Al-Saadi, J.A.; Orlando, J.J.; Soja, A.J. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. Geosci. Model Dev. 2011, 4, 625-641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>.



Ссылки на источники



- Xin Kong, Renate Forkel, Ranjeet S. Sokhi, Peter Suppan, Alexander Baklanov, Michael Gauss, Dominik Brunner, Rocìo Barò, Alessandra Balzarini, Charles Chemel, Gabriele Curci, Pedro Jiménez-Guerrero, Marcus Hirtl, Luka Honzak, Ulas Im, Juan L. Pérez, Guido Pirovano, Roberto San Jose, K. Heinke Schlünzen, George Tsegas, Paolo Tuccella, Johannes Werhahn, Rahela Žabkar, Stefano Galmarini, Analysis of meteorology–chemistry interactions during air pollution episodes using online coupled models within AQMEII phase-2, Atmospheric Environment, Volume 115, 2015, Pages 527-540, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.020>.
- Kirsanov A.A., Rozinkina I.A., Rivin G.S., Zakharchenko D.I., Olchev A.V. Effect of Natural Forest Fires on Regional Weather Conditions in Siberia. // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11, №10. – P. 1133. ISSN: 2073-4433, <https://doi.org/10.3390/atmos11101133>.