



Опасные атмосферные конвективные явления в России

Александр Чернокульский

Институт физики атмосферы им. А.М.
Обухова РАН
a.chernokulsky@ifaran.ru

Восьмой объединенный всероссийский
метеорологический и гидрологический съезд

Санкт-Петербург,
29-31 октября 2024 г.

- Существенный социально-экономический ущерб, связанный с изменениями климата, обусловлен изменением частоты и интенсивности экстремальных атмосферных конвективных явлений (конвективных опасных явлений погоды, КОЯП)
- Однако, статистика подобных явлений в Северной Евразии и их изменчивость в условиях изменений климата изучена достаточно слабо.
- Вследствие малых масштабов, на которых формируются эти явления, уровень их предсказуемости достаточно низкий, механизмы формирования изучены не в полной мере.



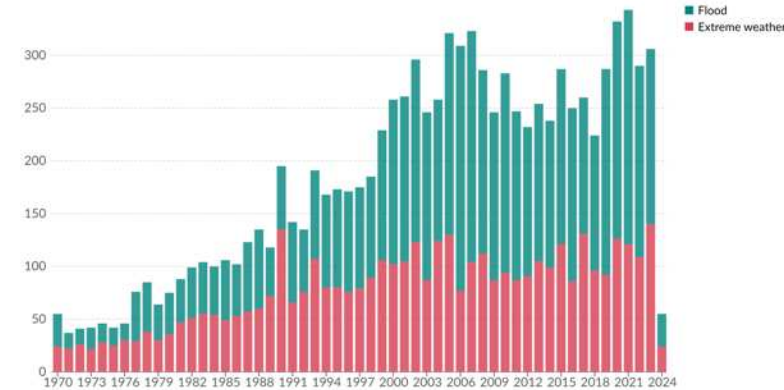
Экстремальные конвективные явления, т.н. мощные конвективные шторма («severe convective storms»):

- Смерчи (интенсивность $\geq F1$)
- Крупный град ($D > 2.5$ cm)
- Шквалы ($v > 25$ m/s)
- Сильные ливневые осадки (единого порога нет, 30 мм час⁻¹).

Формируются явления в организованных кластерах конвективных облаков, мезомасштабных конвективных системах, в суперячейковых облаках

Global reported natural disasters by type, 1970 to 2024

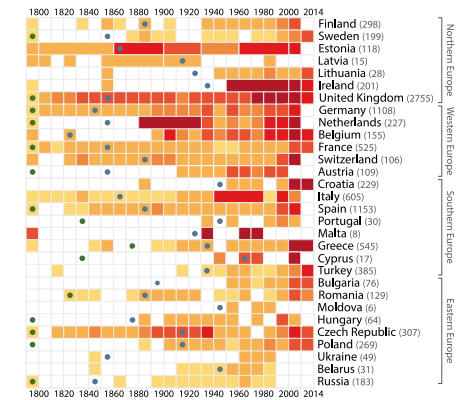
The annual reported number of natural disasters, categorised by type. The number of global reported natural disaster events in any given year. Note that this largely reflects increases in data reporting, and should not be used to assess the total number of events.

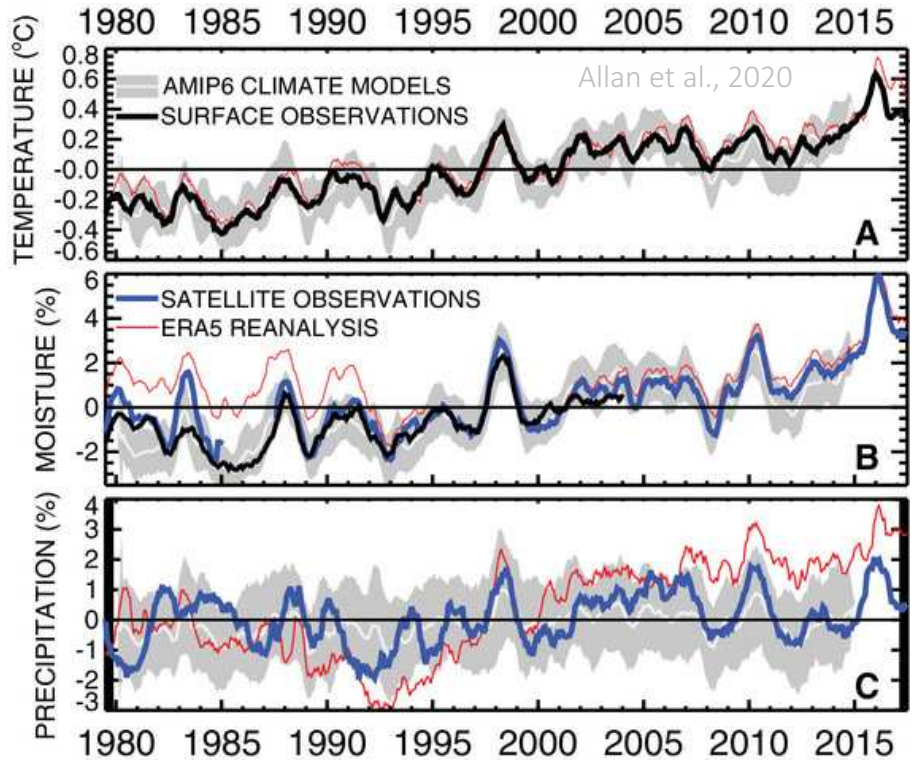


Data source: EM-DAT, CRED / UCLouvain (2024)

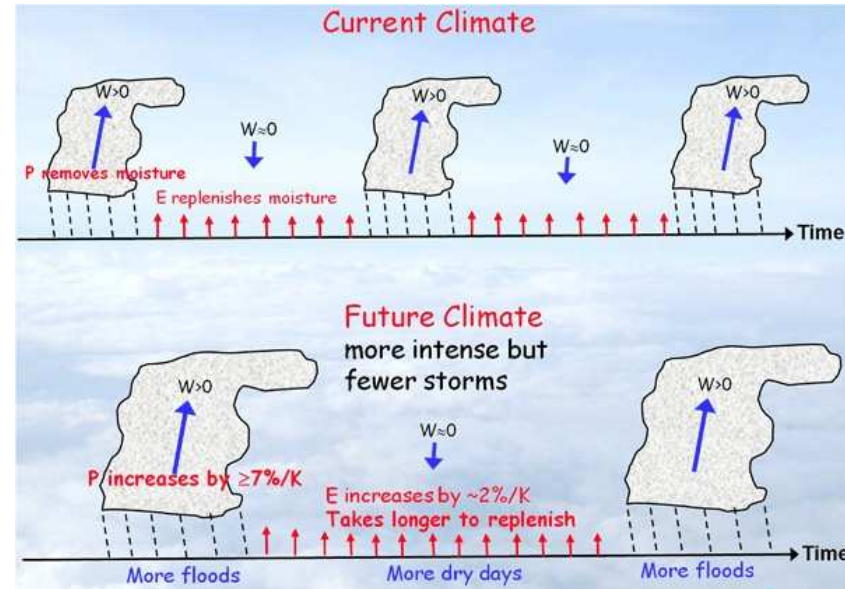
Note: Data includes disasters recorded up to April 2024.

OurWorldinData.org/natural-disasters | CC BY



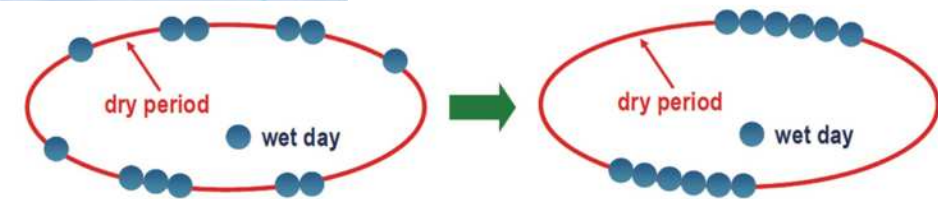


Наблюдаемые изменения глобальной температуры воздуха, влажности воздуха и осадков



Dai et al., 2017

Zolina et al., 2013



Действительно ли мы наблюдаем интенсификацию опасных конвективных явлений в умеренных широтах?

Прямые наблюдения за событиями:

- Наблюдения на станциях (стандартные + плювиографы, штормовые сообщения);
- Данные очевидцев (верифицированная информация из новостей, соц.сетей);
- Спутниковые данные о ветровалах (спутники Landsat, Sentinel-2).

Анализ сопутствующих условий и характерных условий формирования КОЯП:

- Молниевая активность (системы грозопеленгации);
- Высота конвективных облаков (спутниковые данные MODIS).
- Индексы конвективной неустойчивости в рамках т.н. «ингредиентного подхода» (рассчитаны по данным радиозондирования, реанализа ERA5, климатических моделей);
- Характеристики мезомасштабных конвективных систем (спутниковые данные для оценки сигнатур на ВГО, радарная информация для оценки свойств МКС, глубокие нейронные сети для поиска МКС по спутниковым данным);
- Исследования отдельных случаев КОЯП (диагностика по разным данным, моделирование с использованием различных моделей: WRF, COSMO, ICON);
- Численные эксперименты с изменением подстилающей поверхности (проверка влияния ТПО, влажности почвы, городской подстилающей поверхности и т.д.).

РФФИ, 2015–2016

«Смерчи в России: современная климатология и риски возникновения в условиях меняющегося климата»

РФФИ, 2019–2021

Конвективные опасные явления погоды в центре Европейской России: каталогизация, анализ особенностей и условий формирования по разным данным

РНФ, 2018–2023

«Мезомасштабные конвективные системы над территорией России: диагностика и моделирование, механизмы формирования, связь с изменениями климата»

РНФ, 2023–2025

«Опасные атмосферные конвективные явления в России: изменения, предсказуемость, риски»

Соавторы: Ажигов И.О., Быков А.В., Бугримов А.В., Вазаева Н.В., Варенцов М.И., Голицын Г.С., Гостев К.С., Давлетшин С.Г., Елисеев А.В., Ерошкина Н.А., Золина О.Г., Калинин М.А., Криницкий М.А., Курганский М.В., Козлов Ф.А., Нарижная А.И., Мохов И.И., Платонов В.С., Семенов В.А., Спрыгин А.А., Шихов А.Н., Швець Н.В., Ярынич Ю.И.



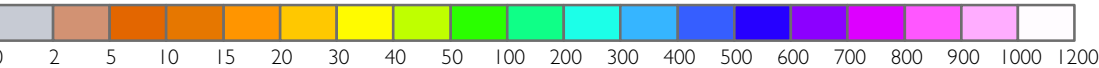
Статистика (климатология) опасных конвективных явлений и условий их формирования (созданные базы данных)

Ливневые и
комбинированные



Р, осредненная по станциям, мм	186.6
Р, осредненная по территории, мм	186.9
рР, осредненная по станциям	0.21
рР, осредненная по территории	0.24
І, осредненная по станциям, мм/сутки	2.7
І, осредненная по территории, мм/сутки	2.2

Чернокульский и
др., 2018



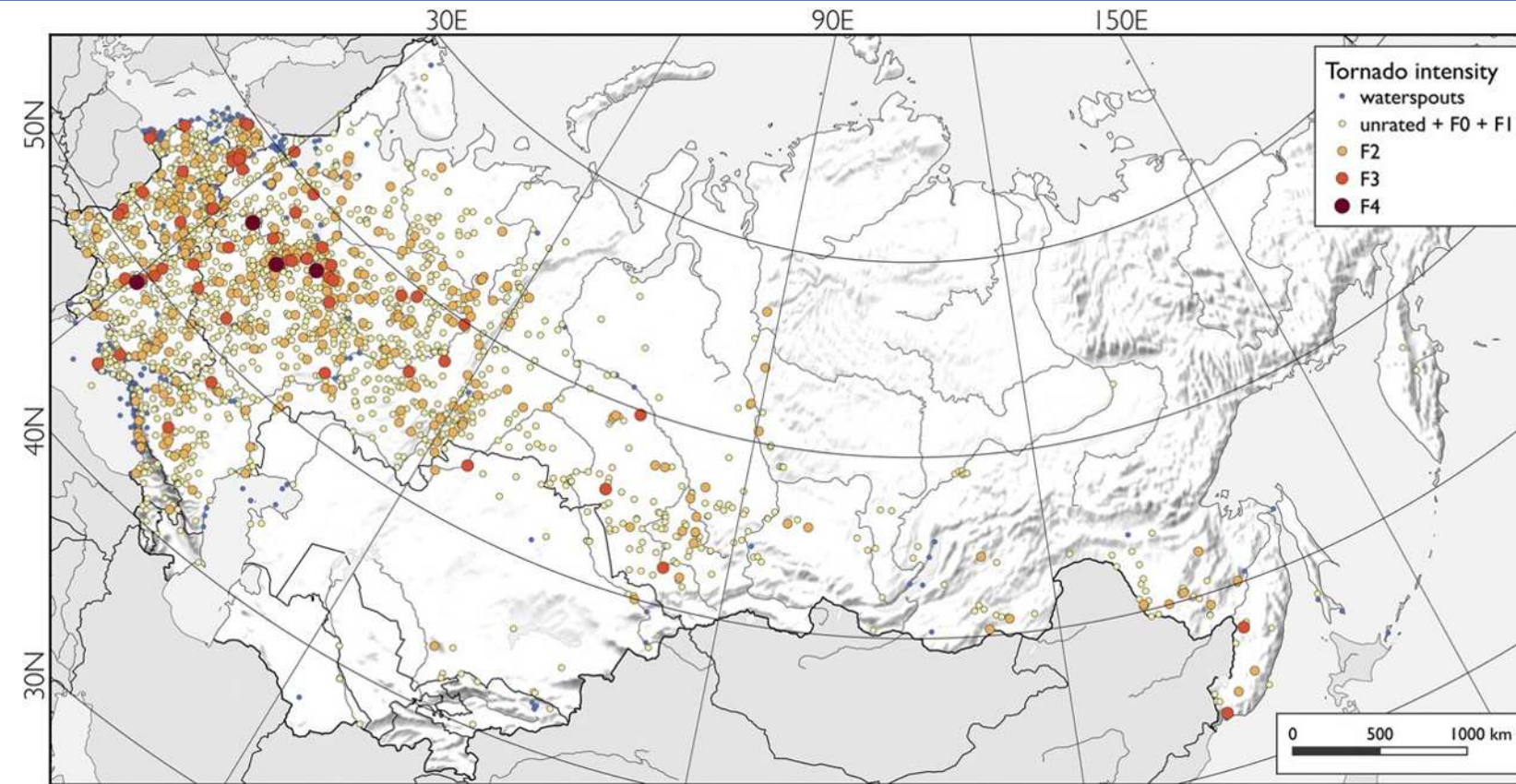
Обложные



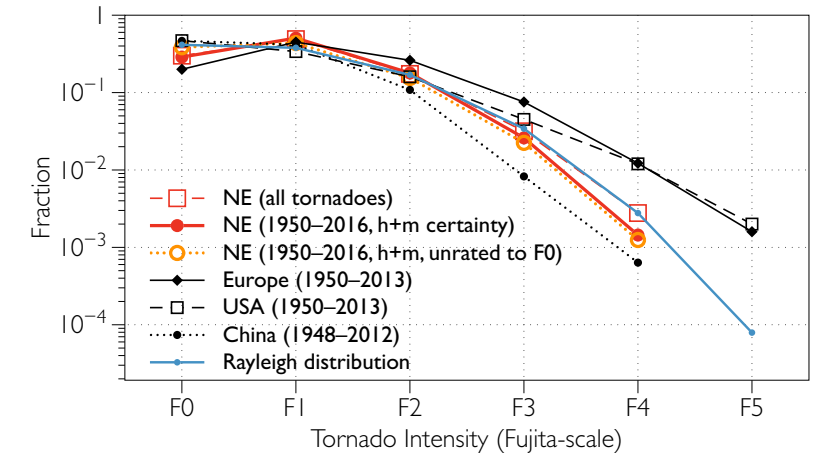
Р, осредненная по станциям, мм	313.8
Р, осредненная по территории, мм	253.8
рР, осредненная по станциям	0.24
рР, осредненная по территории	0.21
І, осредненная по станциям, мм/сутки	3.6
І, осредненная по территории, мм/сутки	3.2

Климатология ливневых и обложных осадков на территории
России по данным станционных наблюдений

Сухопутные и водные смерчи



Chernokulsky et al, 2020

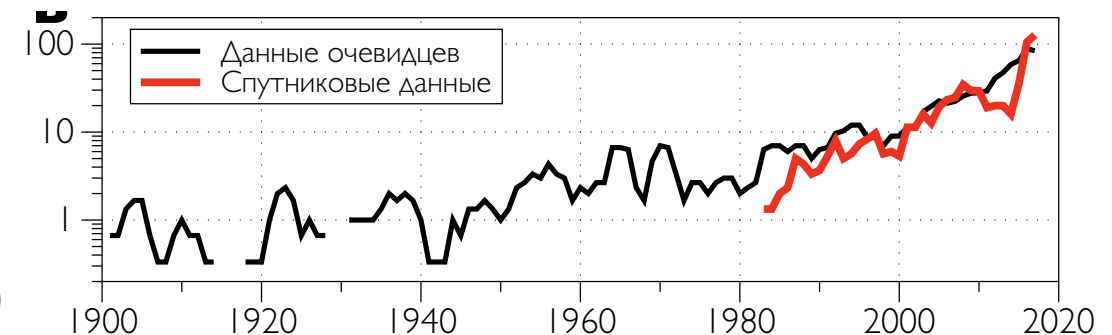


Распределение смерчей
по интенсивности

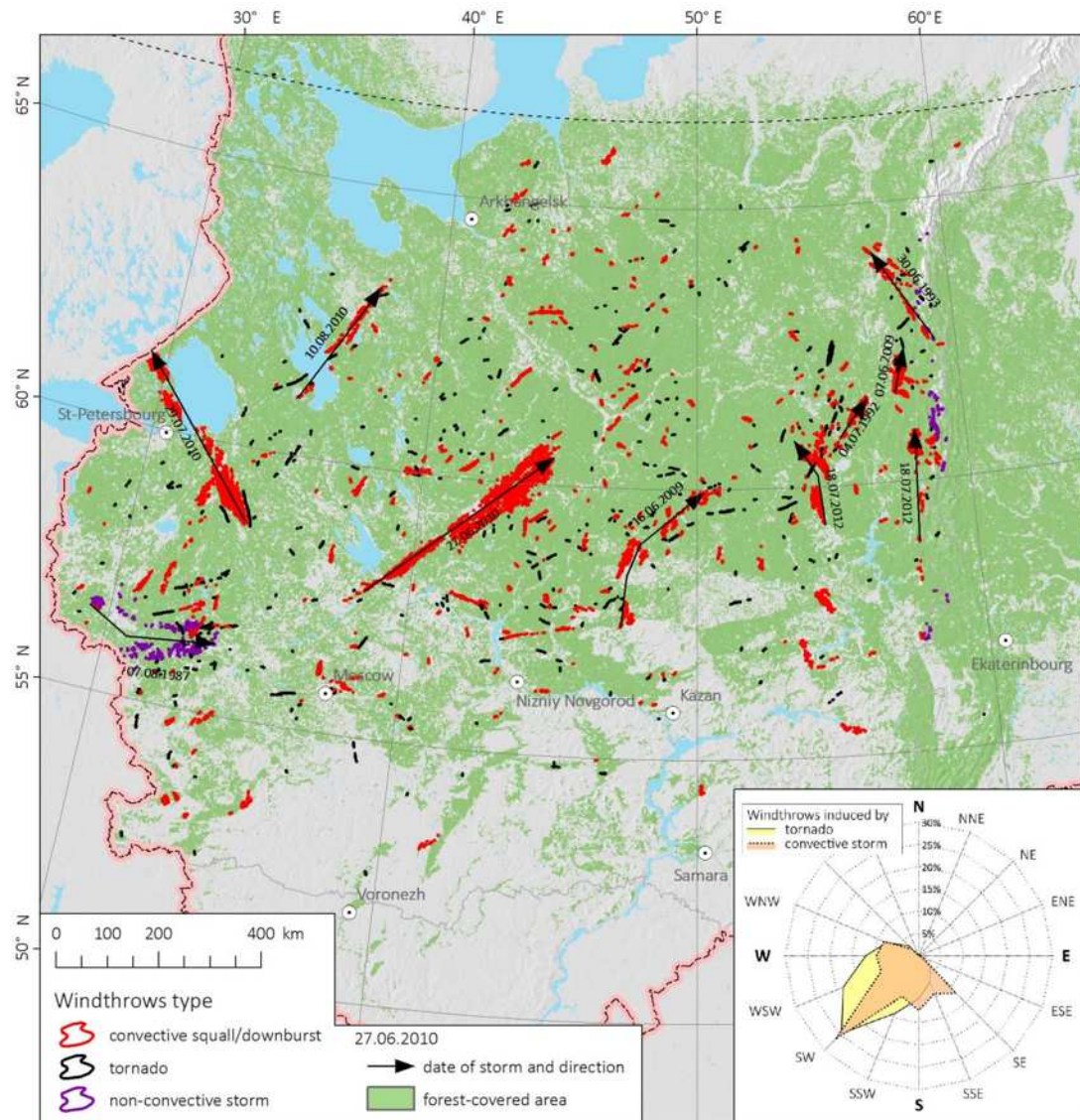
Чернокульский и др., 2021

Климатология смерчей разной интенсивности в Северной Евразии (на данный момент база до 2018, более 3000 событий, идет обновление до 2024 года)

Изменение числа смерчей во времени
(среднее скользящее за 3 года)

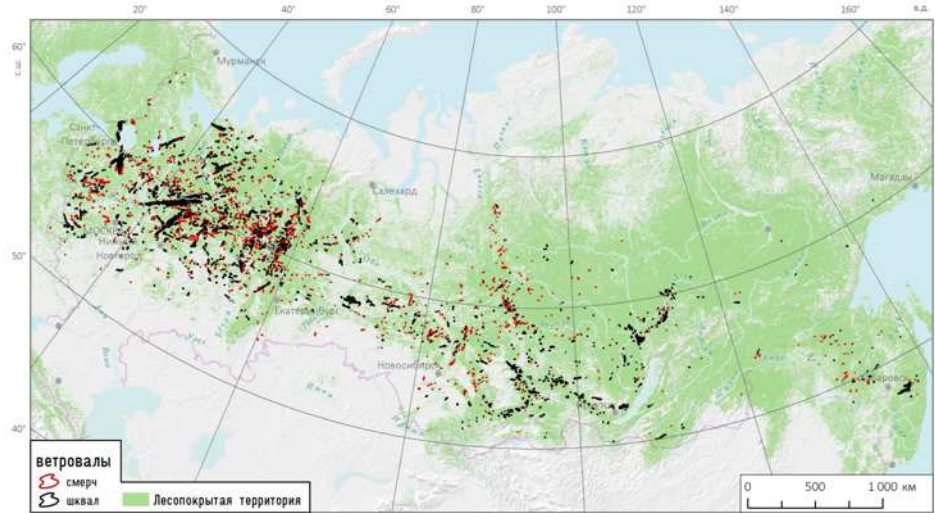


Ветровалы, долгоживущие шквалы

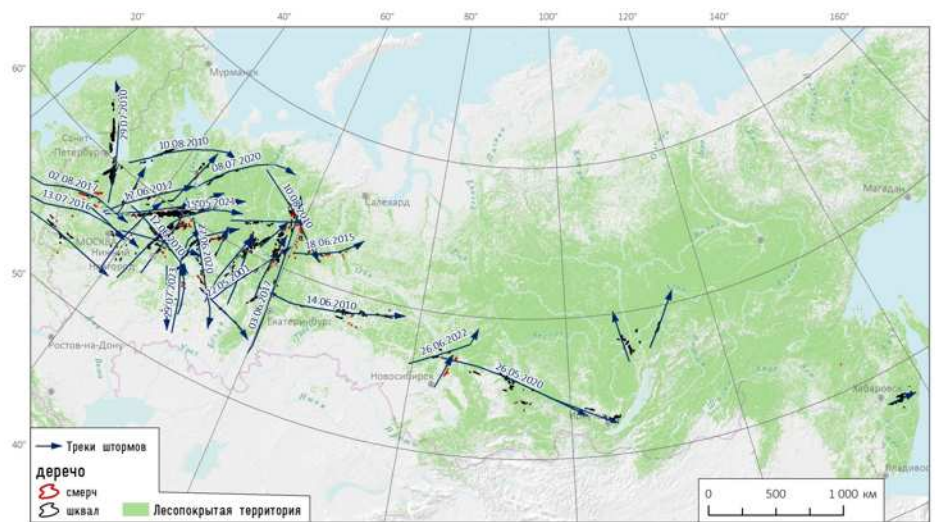


Shikhov et al, 2020

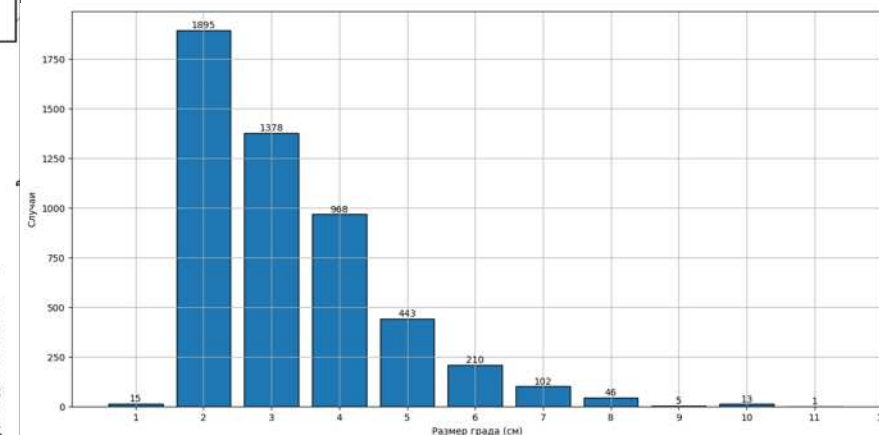
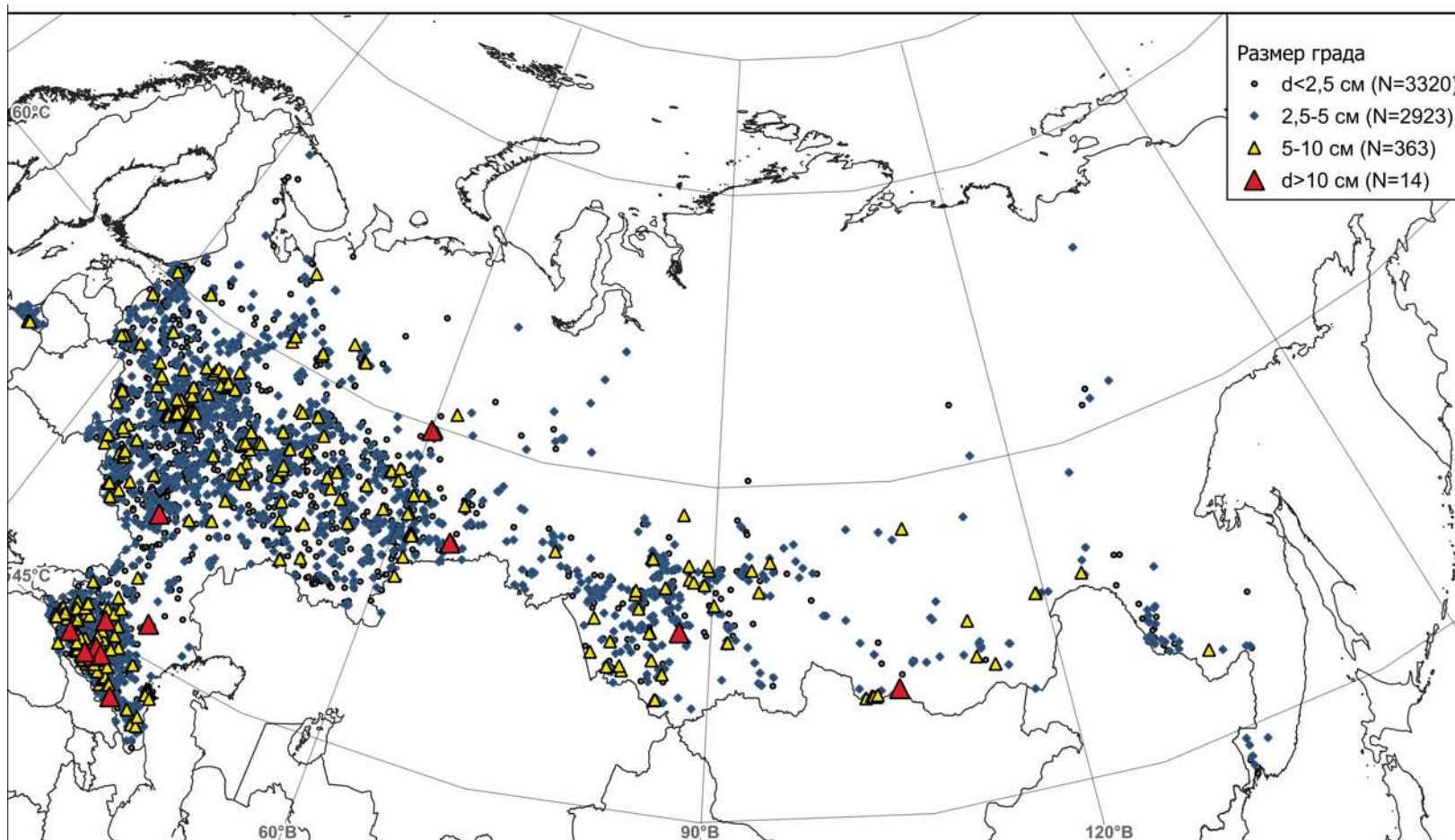
Смерчи и шквалы, вызванные смерчами (черный цвет) и шквалами (красный цвет)



Ветровалы в лесной зоне России (~2500 событий)



Долгоживущие шквалы ($L > 100$ км) (47 событий)



Распределение града по размеру

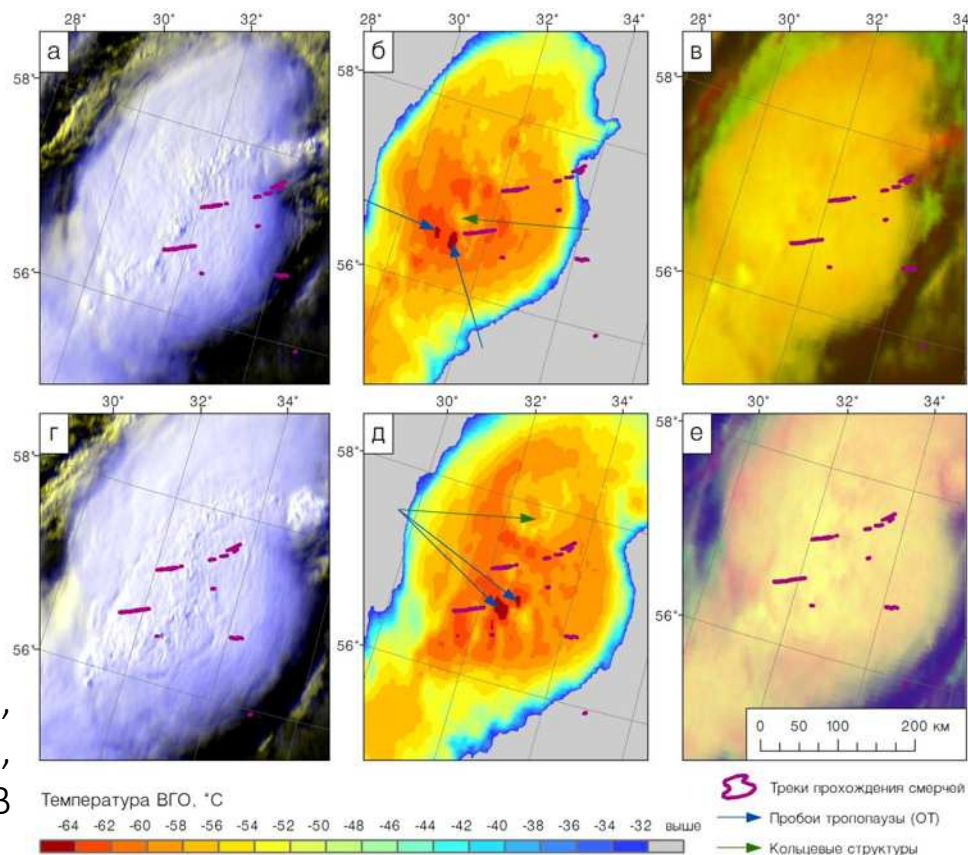
Пространственное распределение градовых событий
(события с 1906 по 2024 гг., ~5000 событий)

Данные METEOSAT,
HIMAWARI: 2012-н.в.
(каждые 15 мин.)

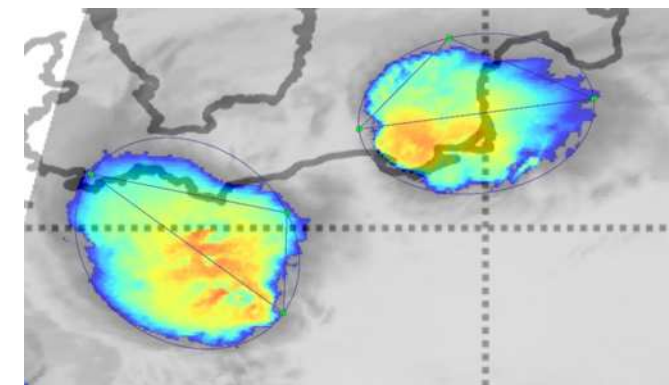
Температура ВГО и
сигнатуры МКС: пробой
тропопаузы, сигнатуры
холодного кольца и т.д.

Шихов и др., 2019

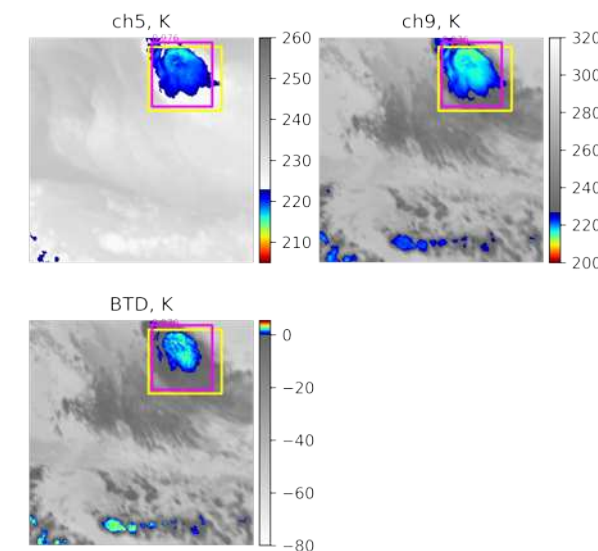
МКС в Тверской области,
02.08.2017: синтез HRVcloud,
 $T_{\text{ВГО}}$, синтез convective RGB



Проведена разметка спутниковых снимков (сейчас: ,более 4000 объектов),
обучена свёрточная нейронная сеть “RetinaNet” с рядом модификаций,
создана климатология осе-симметричных МКС для В.Европы, ЕТР и З.Сибири
(~3500 явлений) (сейчас ведется разметка линейных МКС)



Выделение контуров МКС, обычно
совпадает с максимальным градиентом
изотерм (РЯТ), чаще всего около 240 K



Krinitkiy et al., 2023

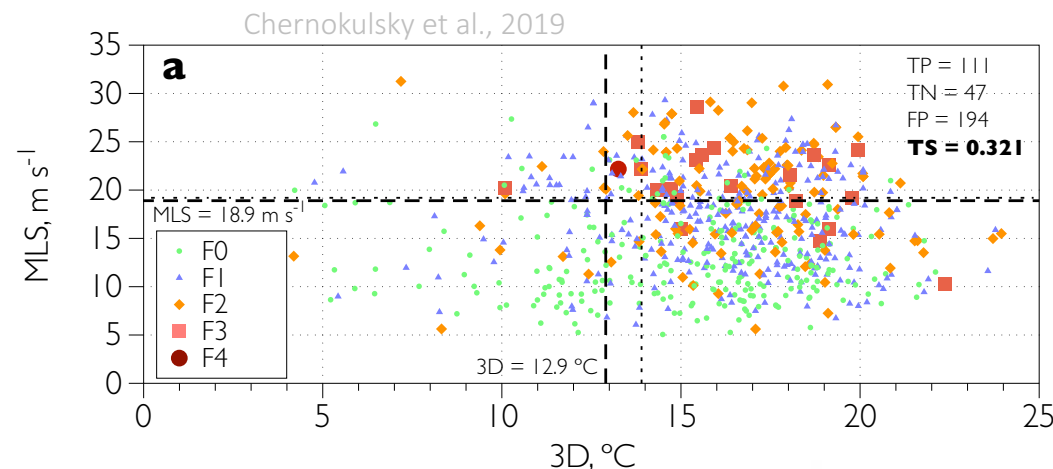
Ингредиентный подход

Выполнение определенных условий – наличие т.н. «ингредиентов»:

- теплый и влажный воздух в приземном слое;
- неустойчивая стратификация в средней атмосфере;
- начальный (затравочный) подъем;
- сдвиг ветра с высотой.

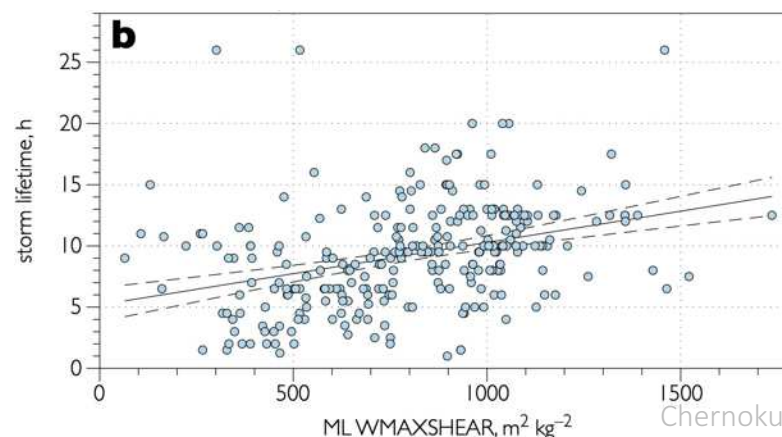
Ингредиенты могут быть представлены в виде индексов (CAPE, SRH, DLS, MLS, LLS, 3D, SWEAT, WMAXSHEAR, и т.д.)

Создана база данных по >60 индексам конвективной неустойчивости (термодинамические, динамические, композитные) по данным радиозондирования, реанализов ERA-Interim и ERA5 (с 1950 г.), моделям CMIP5/CMIP6, региональной модели ГГО

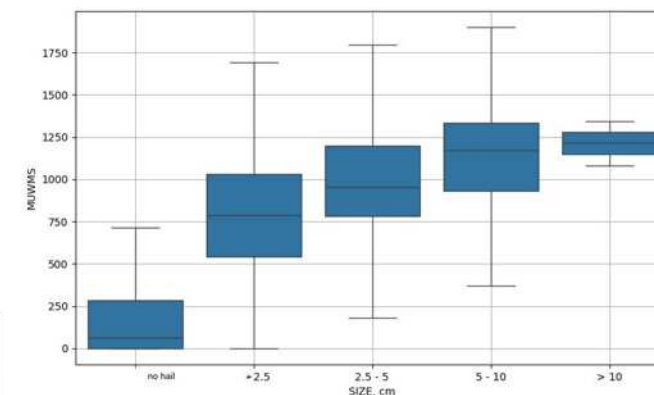


Значения индексов конвективной неустойчивости для различных случаев смерчей.

Зависимость времени жизни МКС от значения индекса WMAXSHEAR



Chernokulsky et al., 2023

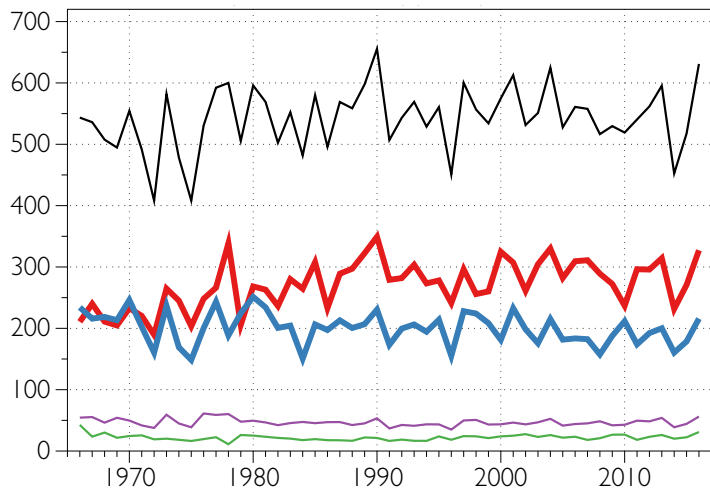


Значения индексов конвективной неустойчивости для событий града разного размера

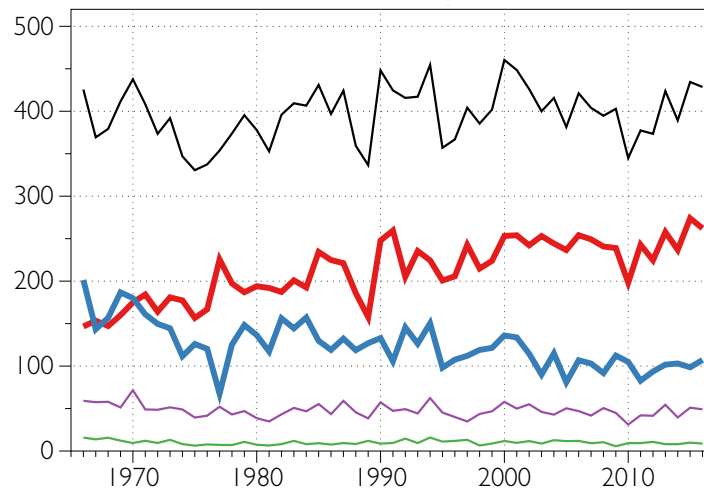
Оценка долгопериодных изменений повторяемости и интенсивности опасных конвективных явлений

Ливневые и обложные осадки: изменения

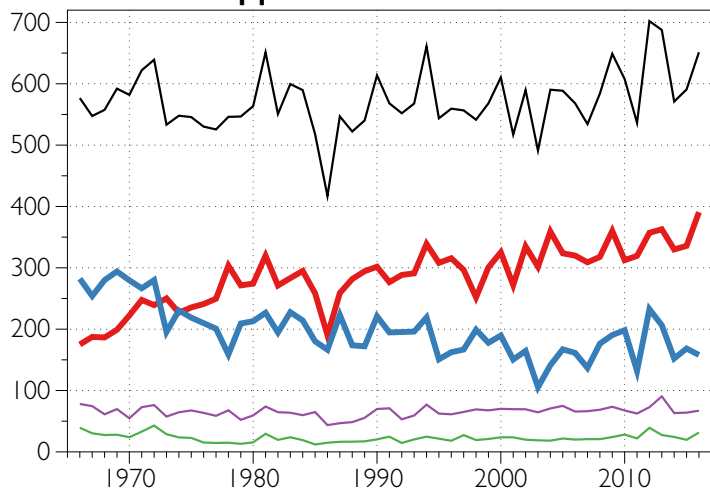
Европейская часть России



Сибирь



Дальний Восток

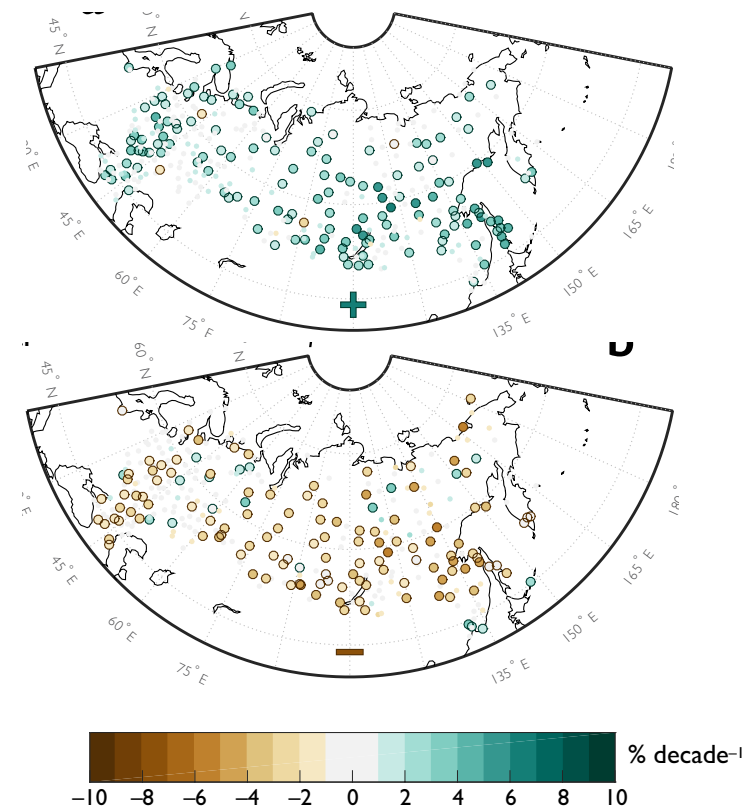


ВИД ОСАДКОВ

- общая сумма осадков
- ливневые осадки
- обложные осадки
- морсящие осадки
- комбинированные осадки

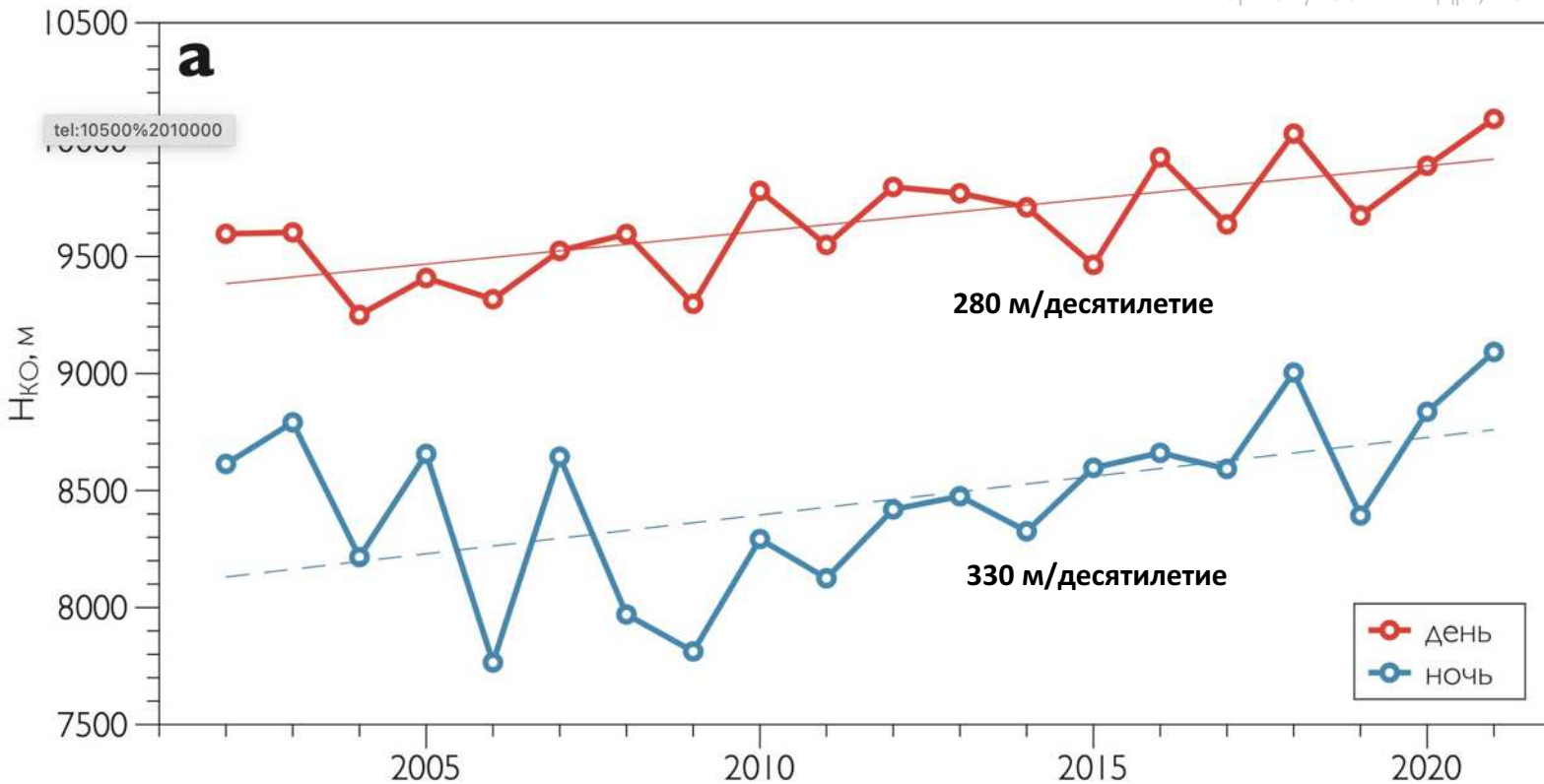
Изменение общей суммы осадков и разных видов осадков по станционным наблюдениям

Chernokulsky et al, 2019

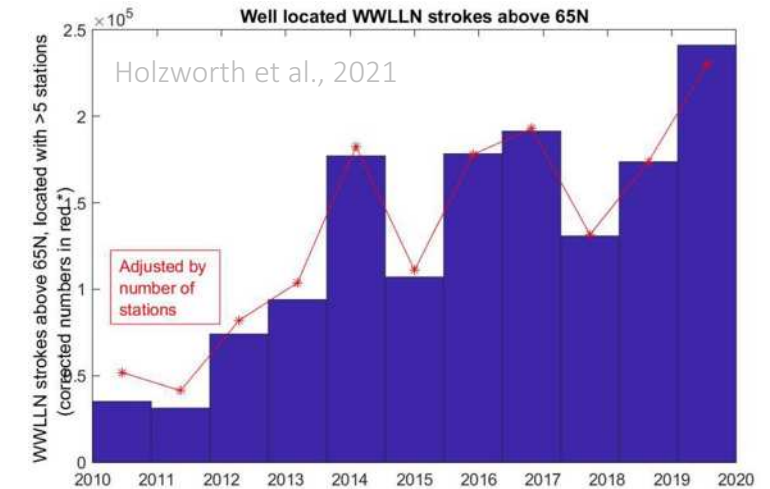


Линейные тренды вклада 95 процентиля сильных ливней (сверху) и сильных обложных осадков (снизу) в общую сумму осадков

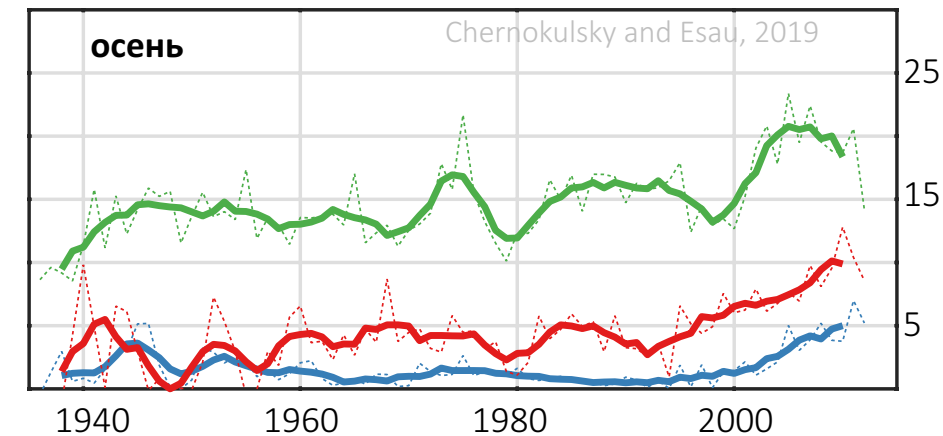
Чернокульский и др., 2022



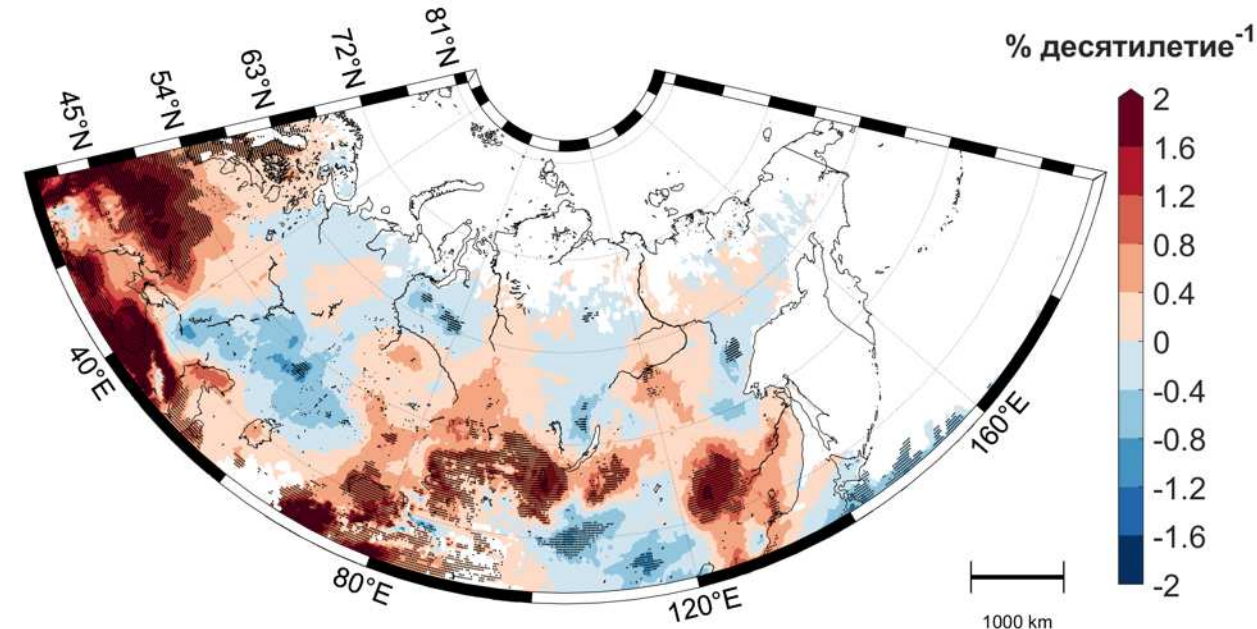
Изменения высоты конвективных облаков над Северной Евразией (45–70° с.ш., 30–150° в.д.) в июле



Число молниевых вспышек в Арктике (>65° с.ш.) по данным WWLLN



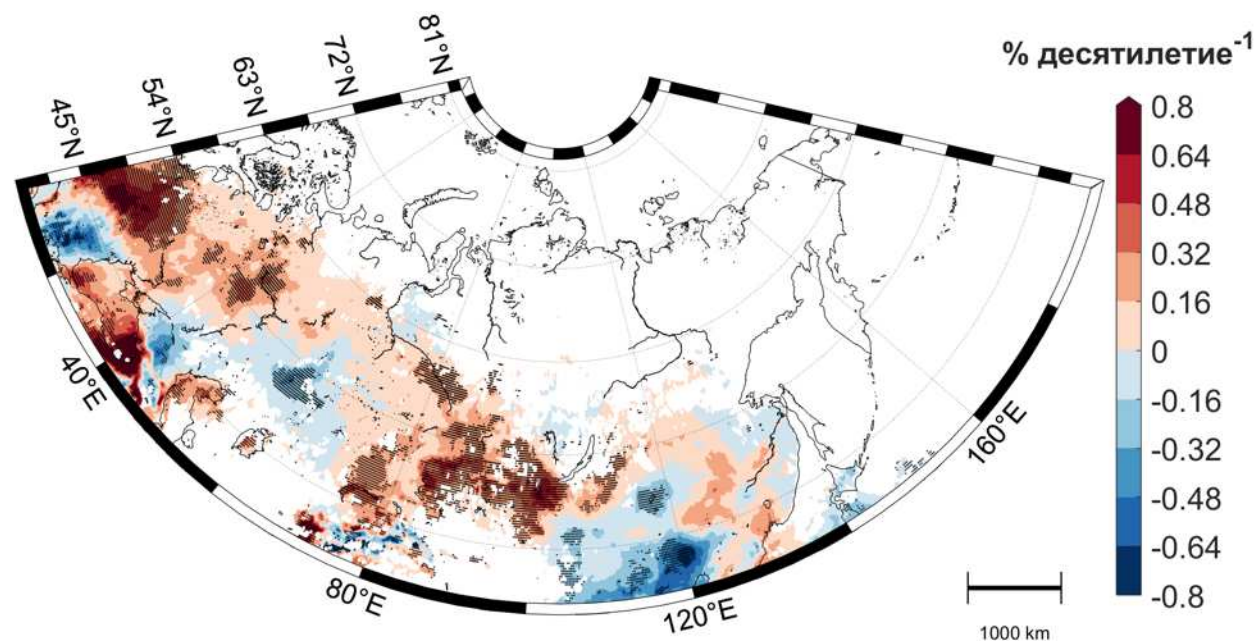
Доля небосвода (в %), закрытая конвективными облаками в регионах Российской Арктики



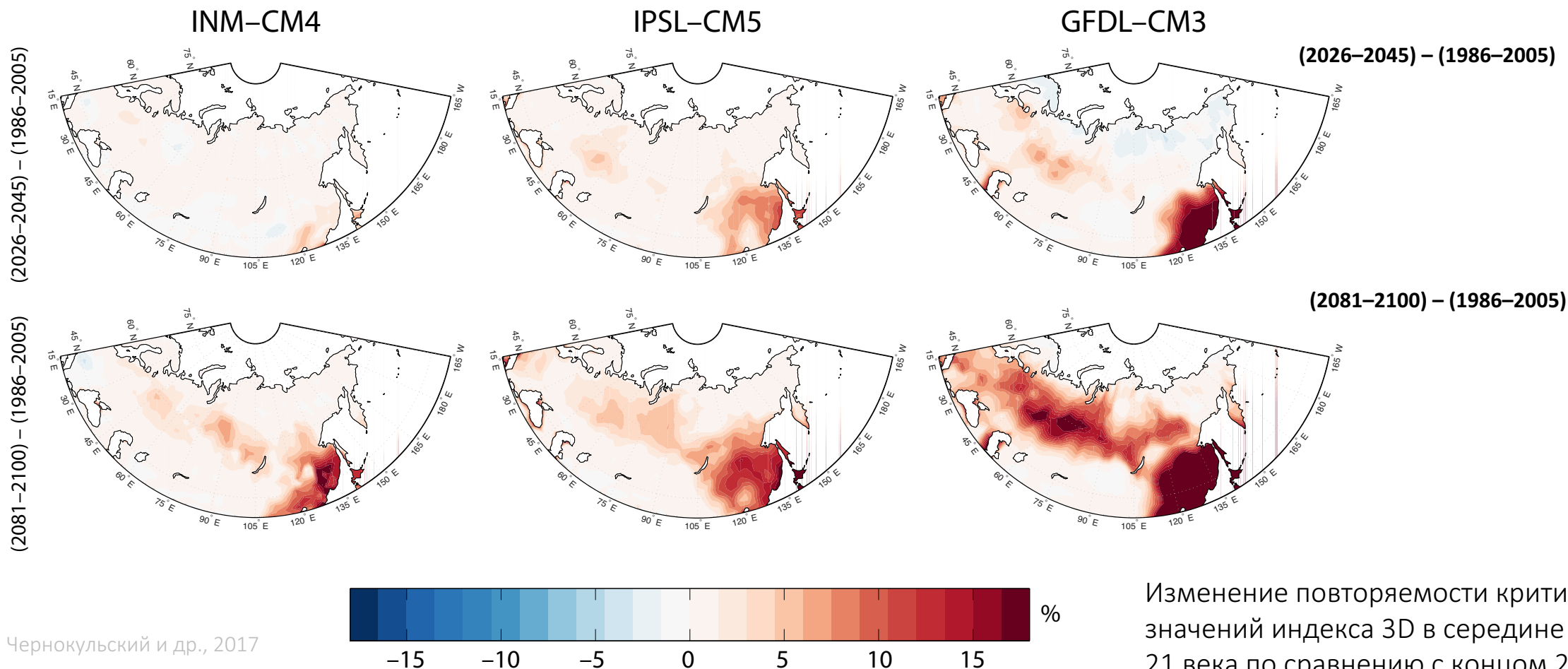
Чернокульский и др., 2022,
обновлено

Изменения повторяемости условий
интенсивной конвекции (критических
значений индекса WMAXSHEAR ($>400 \text{ м}^2\text{с}^{-2}$) в
апреле-сентябре за 1958-2020 гг. по данным
ERA5

Изменения повторяемости условий умеренной конвекции
(критические значения индекса CAPE ($>150 \text{ Дж кг}^{-1}$) в
апреле-сентябре за 1958-2020 гг. по данным ERA5)

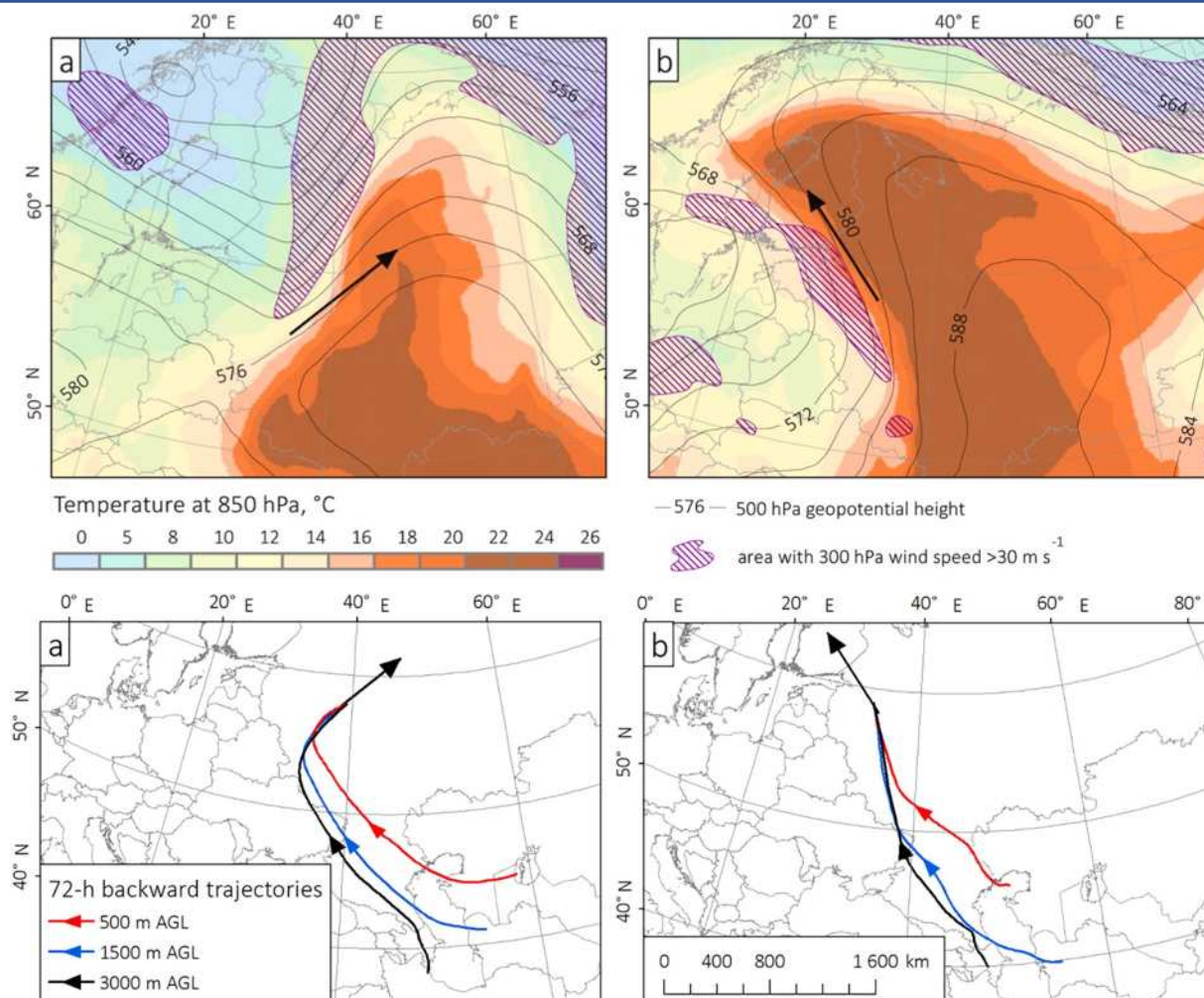


Ожидаемые изменения индексов

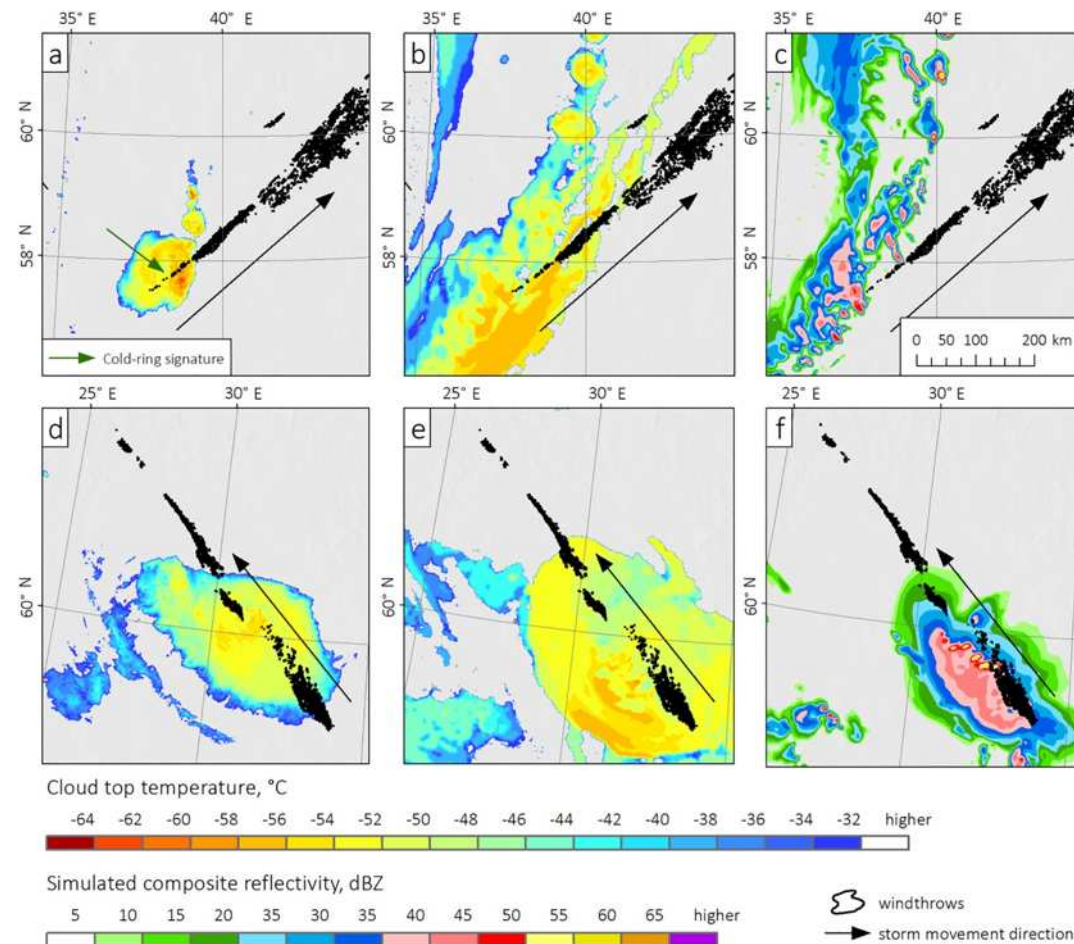


Исследование механизмов формирования и изменчивости КОЯП

Деречо на ЕТР 27 июня и 29 июля 2010 г.



Сверху: высота поверхности 500 гПа, температура на уровне 850 гПа, наличие струйных течений на 300 гПа
Снизу: обратные траектории на разных высотах

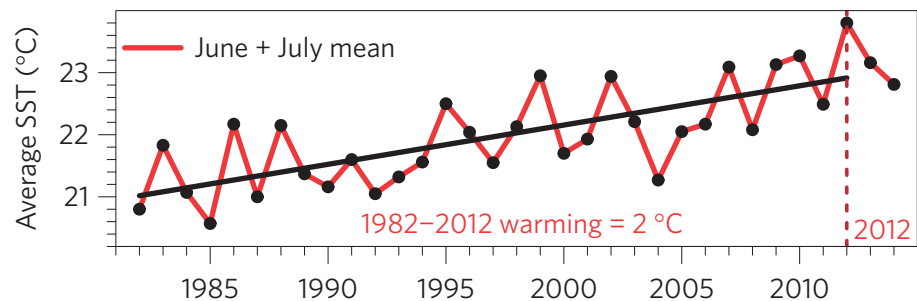
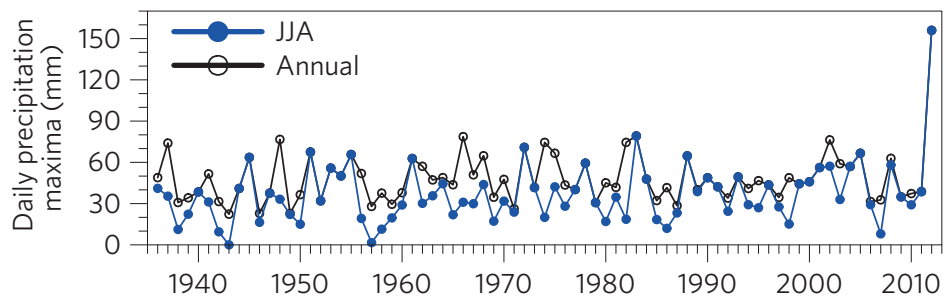


Chernokulsky et al, 2022

Слева: $T_{\text{ВГО}}$ по спутниковым данным,
Посередине: $T_{\text{ВГО}}$ по данным расчетов с WRF
Справа: смоделированная отражаемость

Ливни в Крыму: атрибуция к глоб.потеплению

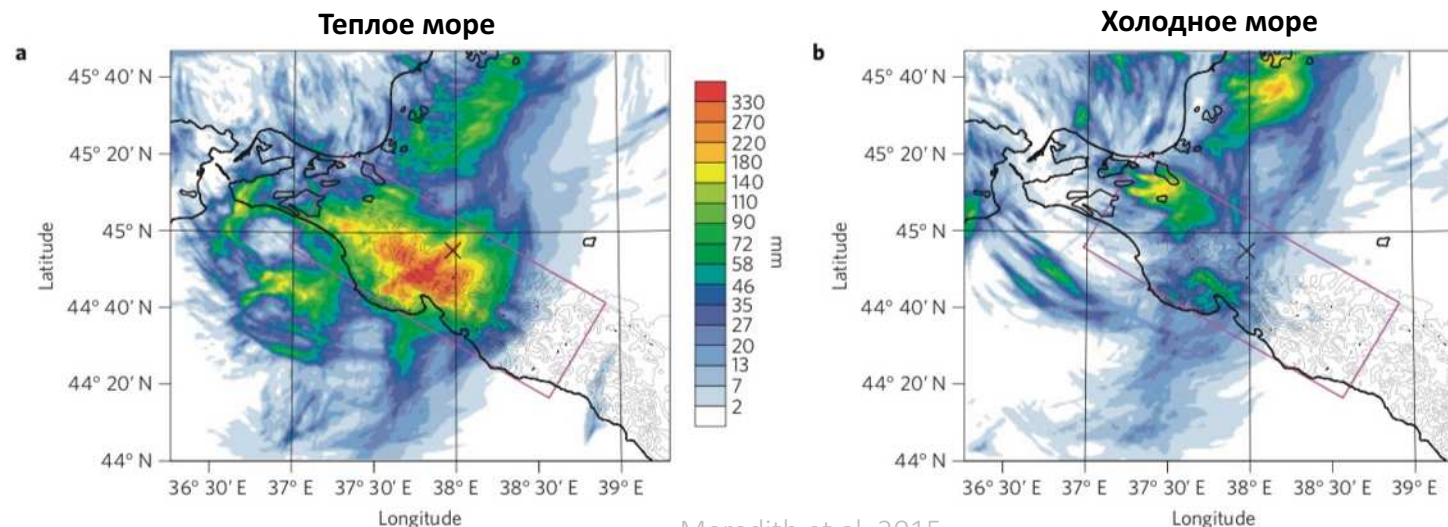
Крымск, максимальная суточная сумма осадков



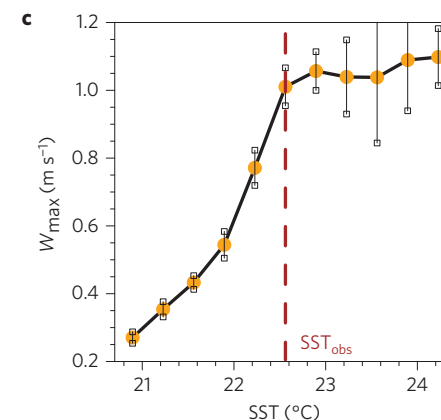
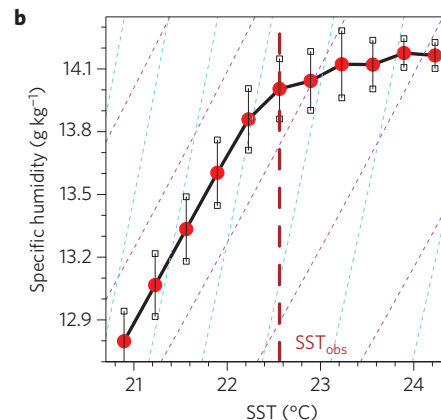
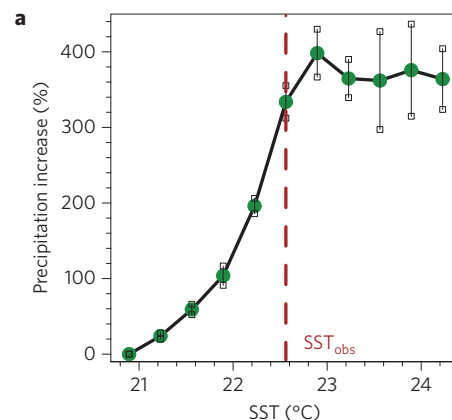
Температура поверхности Черного моря



Результаты моделирования осадков в экспериментах с «теплым» и «холодным» Черным морем



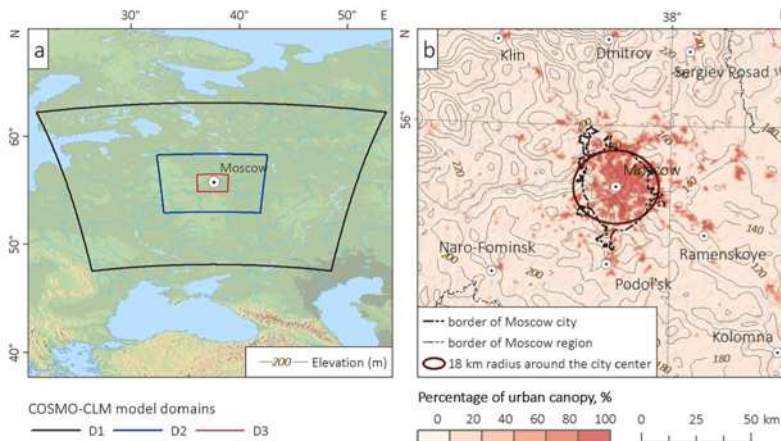
Meredith et al, 2015



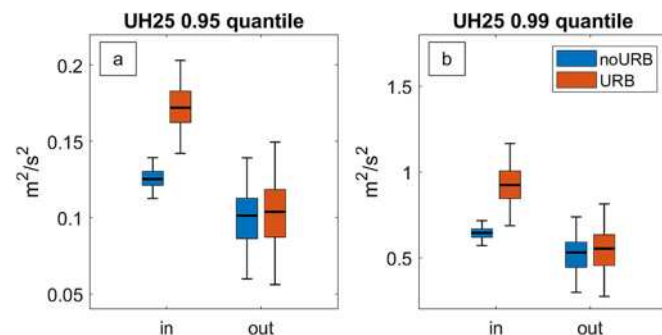
Нелинейность отклика на рост ТПО Черного моря: изменение осадков, удельной влажности, макс. вертикальной скорости

Влияние Москвы на КОЯП: модельные оценки

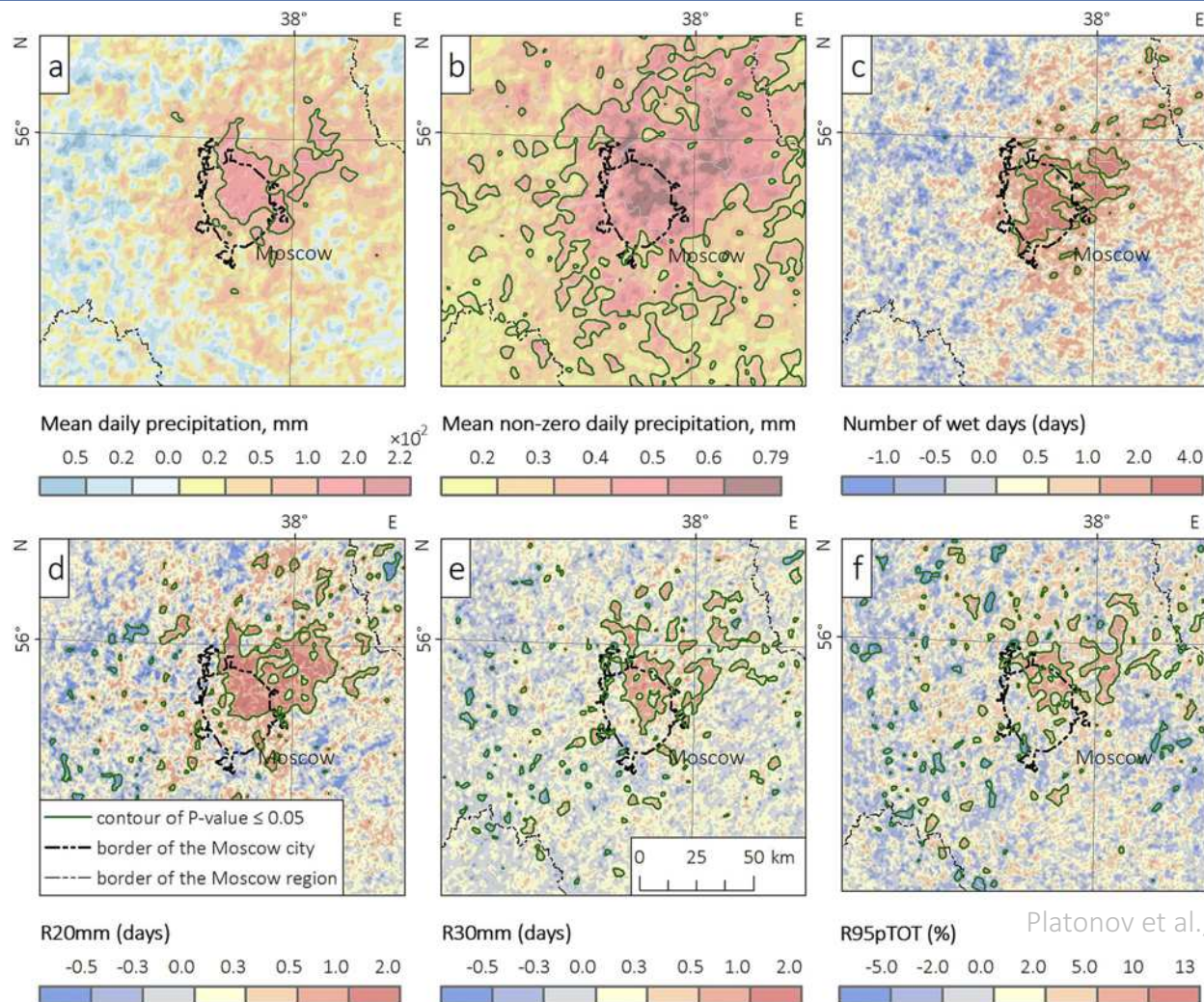
Стендовый доклад сегодня вечером



Постановка численных экспериментов (COSMO-CLM, летние периоды 2007–2016)



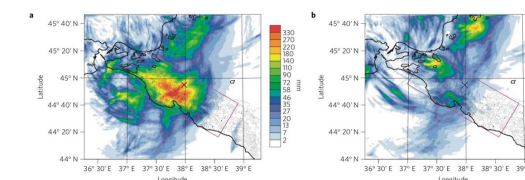
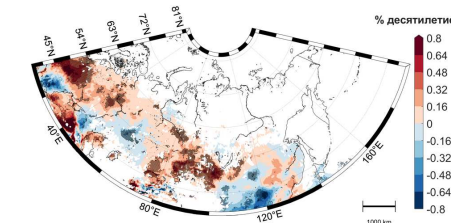
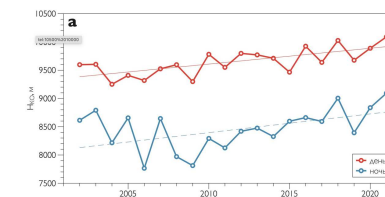
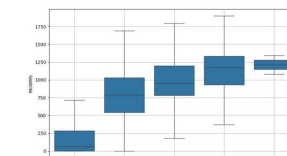
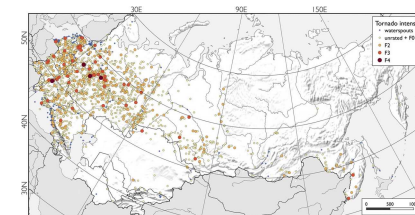
Распределение восходящего потока спиральности (индекс КОЯП)



Разность разных характеристик осадков между экспериментами с городом и без города

Platonov et al., 2024

- Созданы уникальные базы данных по смерчам (на территории Северной Евразии), сильным ливням (Россия), шквалам (лесная зона России), ветровалам (лесная зона России), индексам конвективной неустойчивости (для территории Северной Евразии), осесимметричным МКС, создается база по граду и по линейным МКС;
- Впервые определено характерное число сухопутных смерчей разной интенсивности в регионах Северной Евразии (~100-300 смерчей, 10-50 смерчей интенсивностью F2 и 1-3 смерча интенсивностью $\geq F3$), определены теоретические значения смерчей для субъектов РФ и их энергия, показана существенная недооценка угрозы смерчей;
- Выявлена общая интенсификация опасных конвективных явлений (с уменьшением числа умеренных явлений и увеличением числа особенно сильных явлений), обнаружено увеличение высоты конвективных облаков, рост доли конвективных облаков;
- Впервые выявлено значимое изменение характера осадков над Северной Евразией, которое заключается в увеличении вклада конвективных осадков (и особенно вклада сильных ливней), и уменьшении вклада обложных осадков;
- Определены характерные значения индексов конвективной неустойчивости для опасных атмосферных конвективных явлений и МКС. Выявлены учащение случаев превышения критических значений индексов. Отмечено сохранение этой тенденции по данным численного моделирования до конца XXI века;
- Определено влияние подстилающей поверхности (морская поверхность, почва, городская подстилающая поверхность) на формирование КОЯП.



Спасибо за внимание!

- Курганский М.В., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом? // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С.40-50.
- Чернокульский А.В., Курганский М.В., Захарченко Д.И., Мохов И.И. Условия формирования и характеристики сильного смерча на Южном Урале 29 августа 2014 г. // Метеорология и гидрология. 2015. №12. С.29–37.
- Meredith E.P., Semenov V.A., Douglas M., Park W., Chernokulsky A.V. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. // Nature Geosciences, 2015. Vol. 8. P. 615–619.
- Chernokulsky A.V., Esau I., Bulygina O.N., Davy R., Mokhov I.I., Outten S., Semenov V.A. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late 19th century // J. Climate. 2017. V. 30, No. 6, P.2103–2120.
- Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И. Анализ изменений условий смерчегенеза в Северной Евразии с использованием простого индекса конвективной неустойчивости атмосферы // Доклады Академии наук, 2017, Т. 477. № 6, 722–727.
- Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A satellite-derived climatology of unreported tornadoes in forested regions of northeast Europe // Remote Sensing of Environment, 2018, V. 204, P.553–56
- Chernokulsky A.V., Shikhov A.N. 1984 Ivanovo tornado outbreak: determination of actual tornado tracks with satellite data // Atmospheric Research, 2018, V. 207, P.111–121
- Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г., Булыгина О.Н., Семёнов В.А. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // Метеорология и гидрология, 2018, №7, 5–17.
- Chernokulsky A.V., Kozlov F.A., Zolina O.G., Bulygina O.N., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters, 2019, V.4, No.4, P. 045001.
- Елисеев А.В., Плосков А.Н., Чернокульский А.В., Мохов И.И. Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады академии наук, 2019, Т. 485. № 1, С. 76–82.
- Chernokulsky A., Esau I. Cloud cover and cloud types in the Eurasian Arctic in 1936–2012 // International Journal of Climatology, 2019, V.39, issue 15, P.5771–5790
- Brooks H.E., Doswell III C.A., Zhang X., Chernokulsky A., Tochimoto E., Hanstrum B., Nascimento E., Sills D., Antonescu B., Barrett B. A century of progress in severe convective storm research and forecasting. in: A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial. Chapter 18. Vol.59. P.18.1–18.41. AMS, Meteorological Monographs. 2019.
- Chernokulsky A., Kurgansky M., Mokhov I., Shikhov A., Azhigov I., Selezneva E., Zakharchenko D., Antonescu B., Kühne T. Tornadoes in Northern Eurasia: from the Middle Age to the Information Era // Monthly Weather Review, 2020, Vol. 148, No 8, P.3081–311
- Shikhov A., Chernokulsky A., Azhigov I., Semakina A. A satellite-derived database for stand-replacing windthrows in boreal forests of the European Russia in 1986–2017 // Earth System Science Data, 2020, V. 12, P. 3489–3512
- Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Куне Т. Смерчи в российских регионах // Метеорология и гидрология, 2021, №2, с.17–34
- Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environmental Research Letters, 2021, V. 16, P. 105004
- Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Yu. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmospheric Research, 2022, Vol. 267, P. 105928
- Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, №5, С.27–41.
- Шихов А. Н., Чернокульский А. В., Спрыгин А. А., Ярынич Ю. И. Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5. // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 429–435.
- Чернокульский А.В., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Ерошкина Н.А., Корнев Д.П., Быков А.В., Калинин Н.А., Курганский М.В., Павлюков Ю.Б., Спрыгин А.А., Ярынич Ю.И. Шквалы и смерчи на европейской территории России 15 мая 2021 г.: диагностика и моделирование // Метеорология и гидрология, 2022, № 11, С. 71–90.
- Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Yu., Sprygin A. An Empirical Relationship among Characteristics of Severe Convective Storms, Their Cloud-Top Properties and Environmental Parameters in Northern Eurasia // Atmosphere, 2023, Vol.14, P. 174
- Krinitskiy M., Sprygin A., Elizarov S., Narizhnaya A., Shikhov A., Chernokulsky A. Towards the accurate automatic detection of mesoscale convective systems in remote sensing data: from data mining to deep learning models and its applications // Remote Sensing, 2023, V. 15, No. 14, P. 3493
- Ярынич Ю.И., Варенцов М.И., Платонов В.С., Степаненко В.М., Чернокульский А.В., Давлетшин С.Г., Дронова Е.А. Влияние Московского мегаполиса на осадки теплого периода в зависимости от крупномасштабных атмосферных условий // Водные ресурсы, 2023, Т.50, №5, С.550–560.
- Голицын Г.С., Чернокульский А.В., Вазаева Н.В. Энергетика торнадо и смерчей // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2023, Т.513, №1, С.134–138.
- Shikhov A., Antokhina O., Gochakov A., Azhigov I., Blinov D., Gazimov T., Kolker A., Tarabukina L., Yarinich Yu., Chernokulsky A. Severe convective outbreak in Siberia in May 2020: Event analysis and high-resolution simulation // Atmospheric Research, Volume 298, March 2024, 107139
- Platonov V.S., Varentsov M.I., Yarinich Yu.I., Shikhov A.N., Chernokulsky A.V. A large mid-latitude city intensifies severe convective events: evidence from long-term high-resolution simulations // Urban Climate, 2024, Vol.54, 101837