

Опасные атмосферные конвективные явления в России в условиях изменений климата

Александр Чернокульский

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



22 международная конференция «Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса»

20 международная научная школа-конференция молодых
ученых по фундаментальным проблемам дистанционного
зондирования Земли из космоса

Институт космических исследований РАН,
11 ноября 2024, Москва

- 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»):

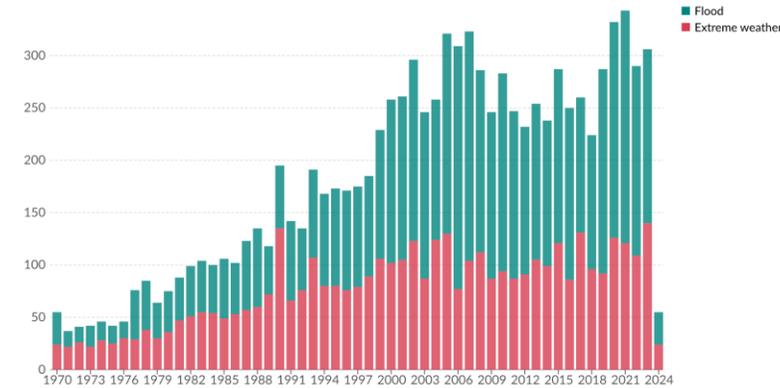
- Смерчи (интенсивность $\geq F1$)
- Крупный град ($D > 2.5$ cm)
- Шквалы ($v > 25$ m/s)
- Сильные ливневые осадки (единого порога нет, 30 мм час $^{-1}$).

Формируются явления в организованных кластерах конвективных облаков — мезомасштабных конвективных системах (МКК, суперячейки и т.д.)



Global reported natural disasters by type, 1970 to 2024

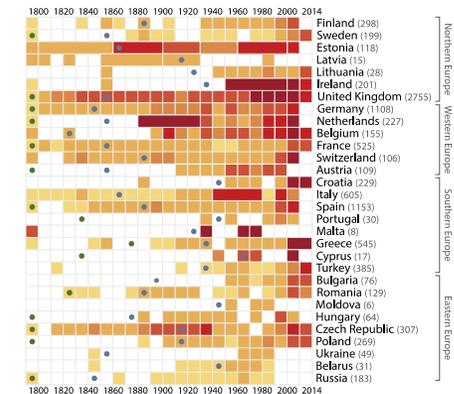
The annual reported number of natural disasters, categorised by type. The number of global reported natural disaster events in any given year. Note that this largely reflects increases in data reporting, and should not be used to assess the total number of events.

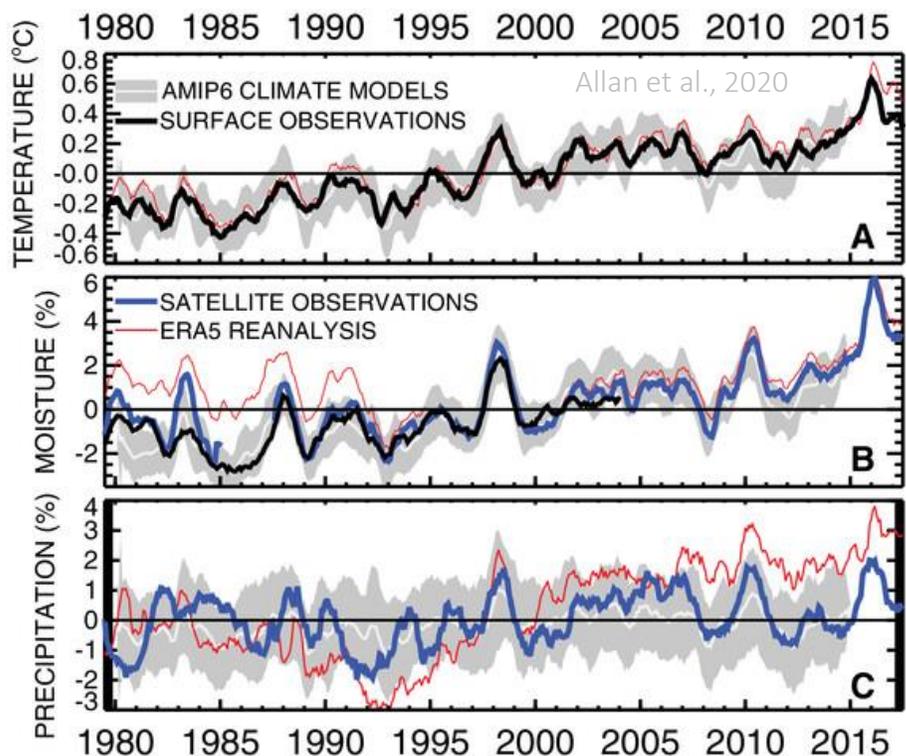


Data source: EM-DAT, CRED / UCLouvain (2024)

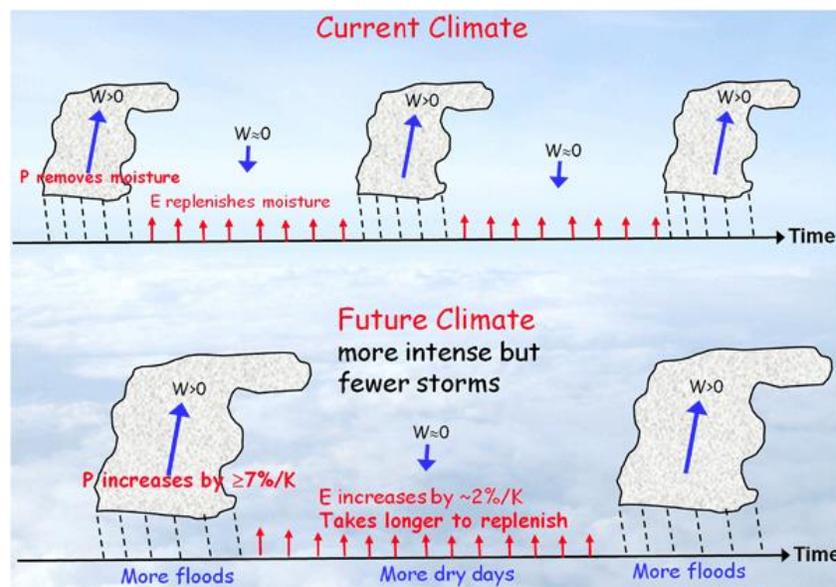
Note: Data includes disasters recorded up to April 2024.

OurWorldInData.org/natural-disasters | CC BY



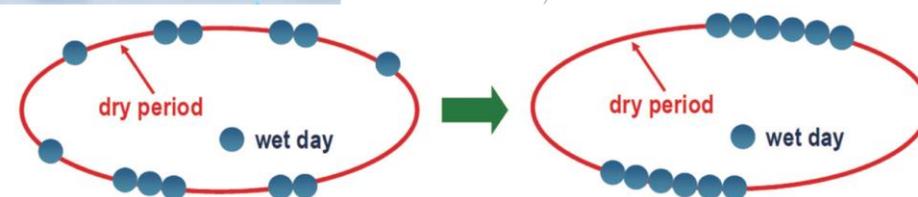


Наблюдаемые изменения глобальной температуры воздуха, влажности воздуха и осадков



Dai et al., 2017

Zolina et al., 2013



Теоретические схемы изменения гидрологического цикла в умеренных широтах (в части усиление опасных конвективных штормов и ливневых осадков)

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

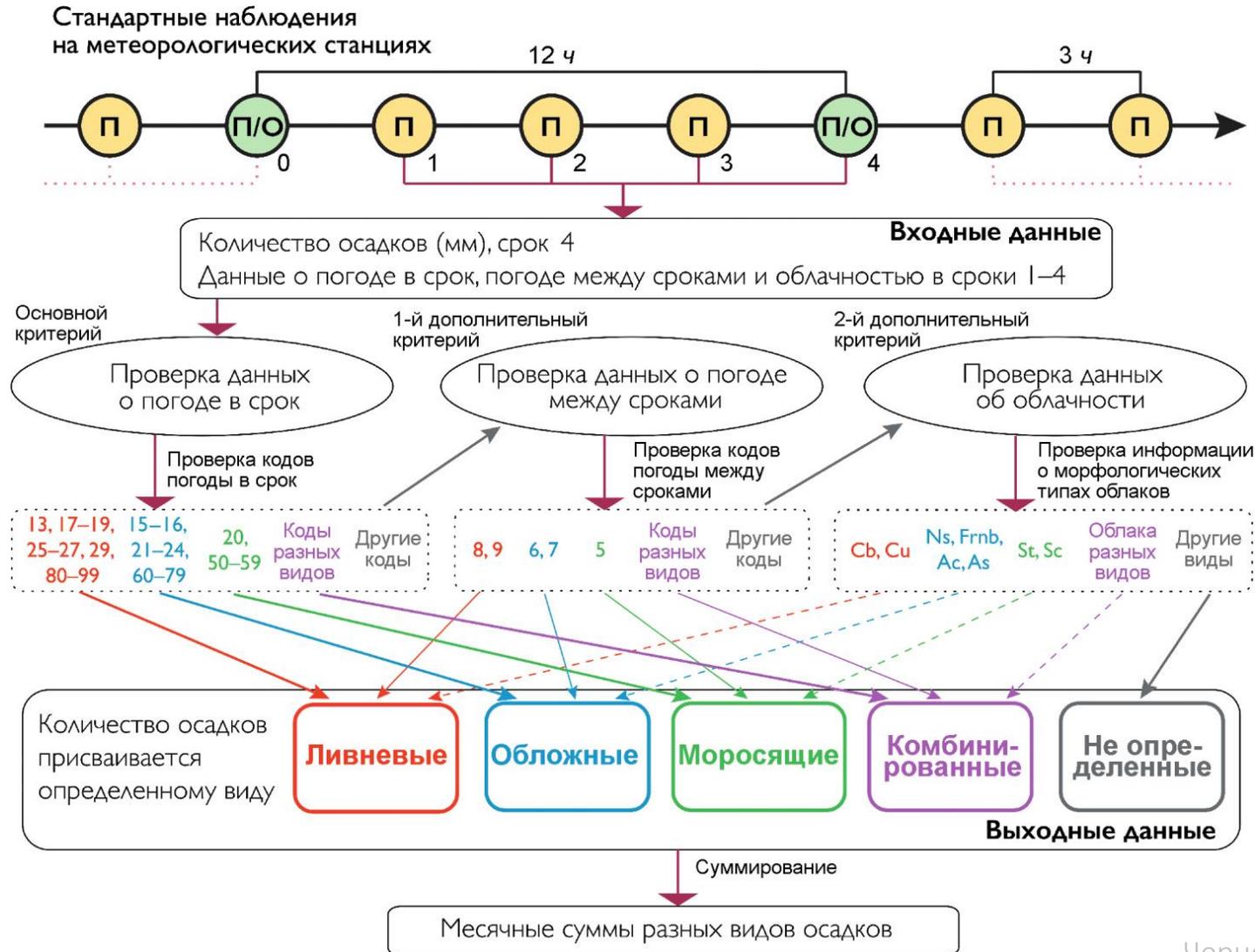
«Опасные атмосферные конвективные явления в России: изменения, предсказуемость, риски»

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.



Облака и осадки

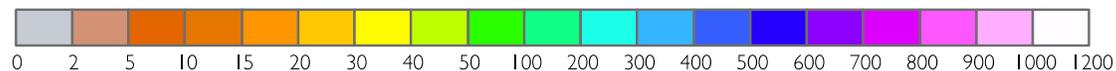
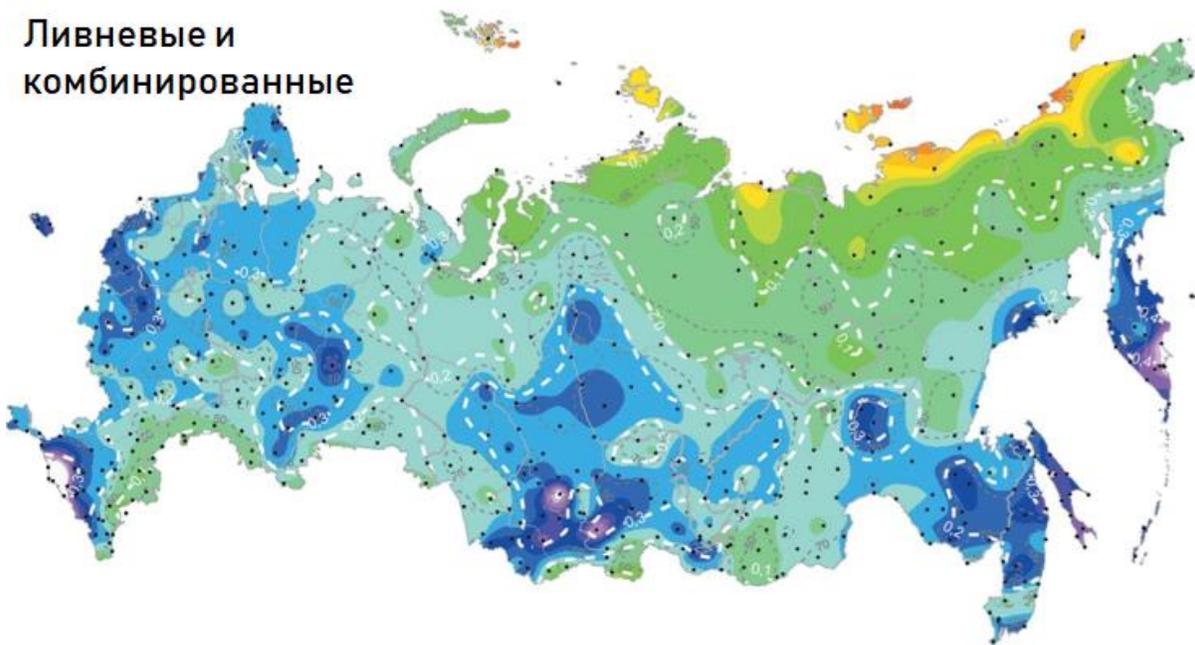
Анализ осадков: схема разделения



Чернокульский и др., 2018

Ливневые и обложные осадки: климатология

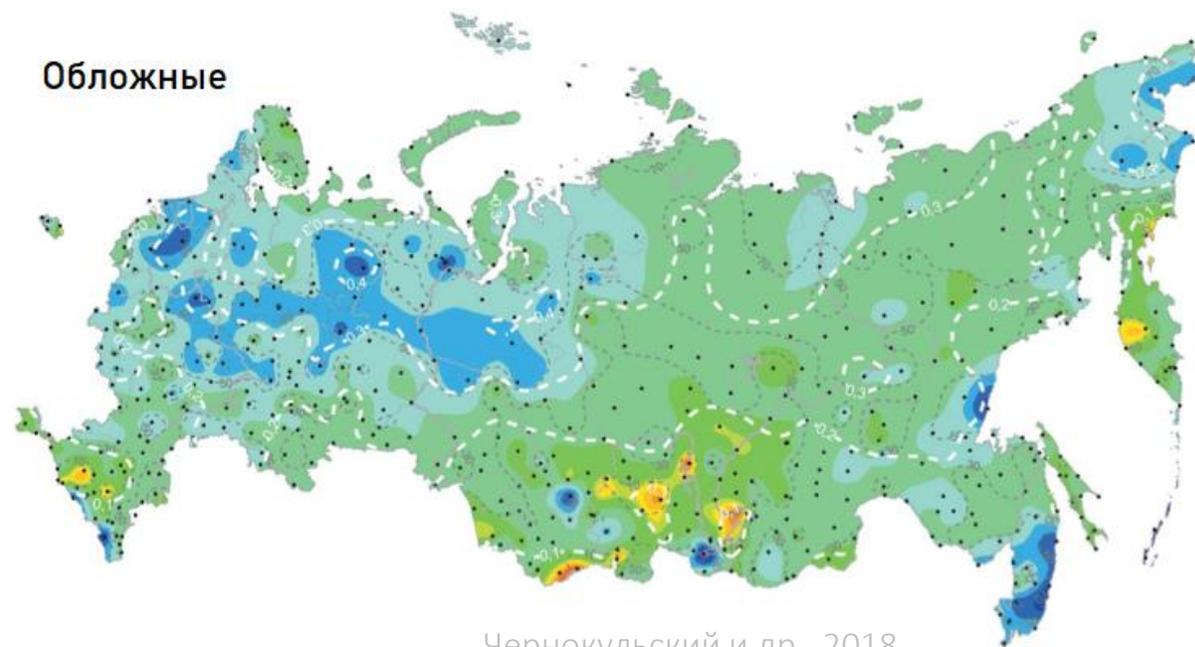
Ливневые и комбинированные



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

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

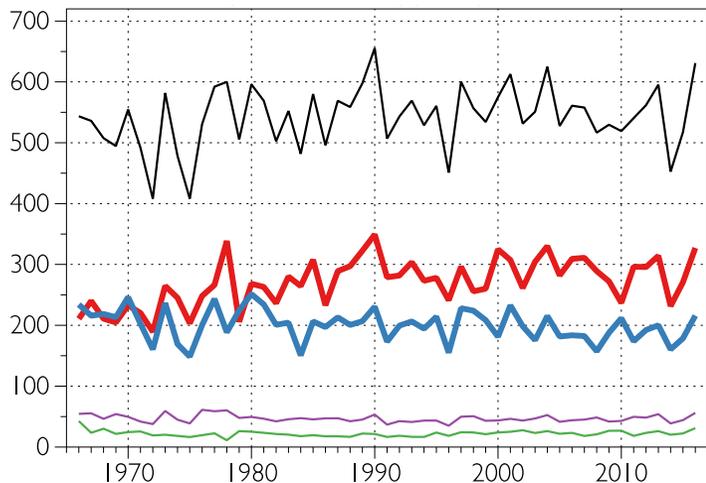
Обложные



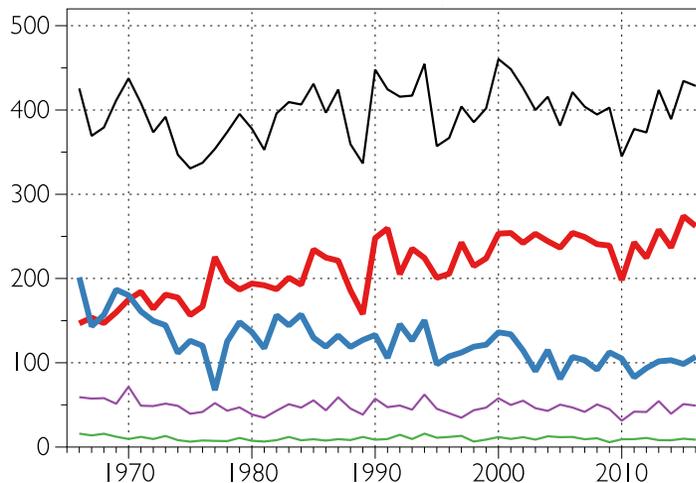
Чернокульский и др., 2018

Ливневые и обложные осадки: изменения

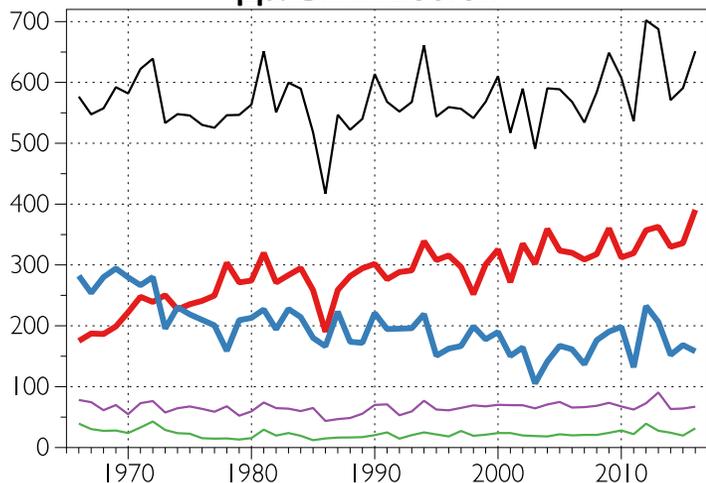
Европейская часть России



Сибирь



Дальний Восток

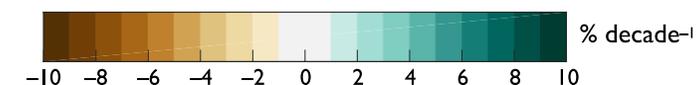
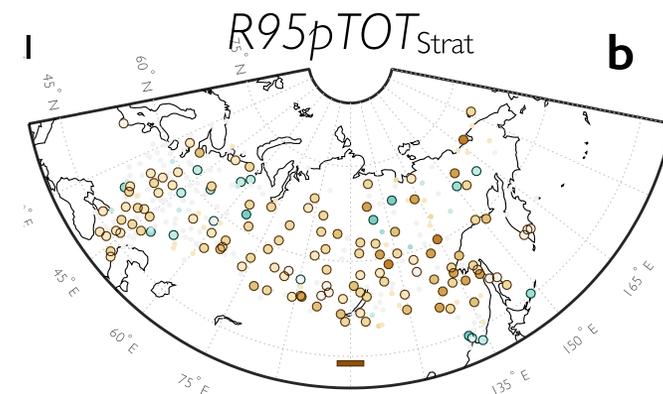
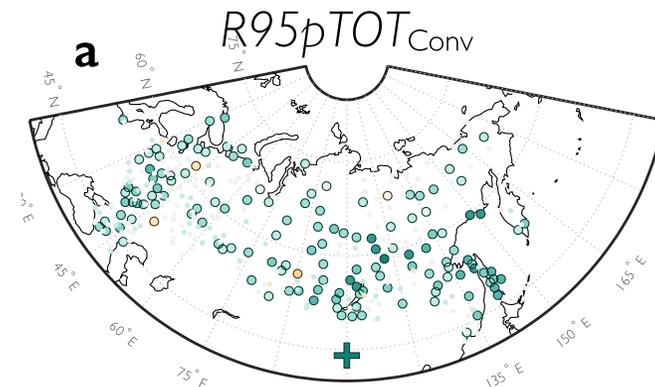


ВИД ОСАДКОВ

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

Изменение общей суммы осадков

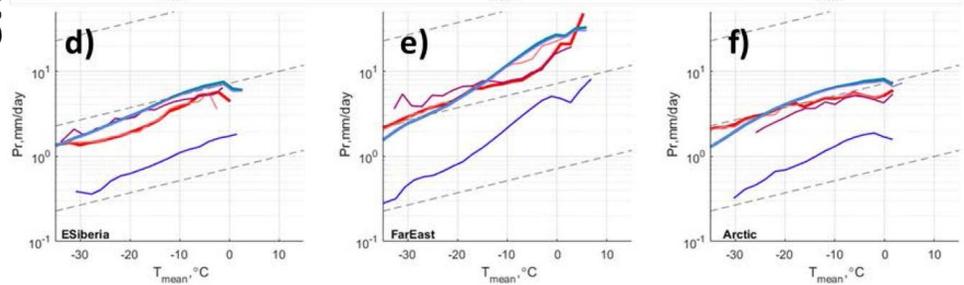
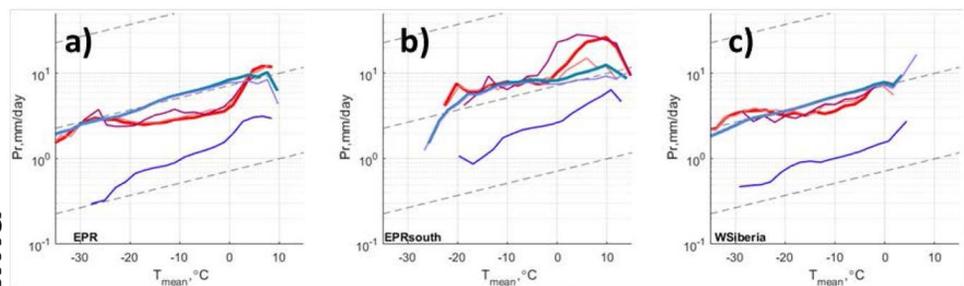
Вклад 95th перцентиля в общую сумму осадков



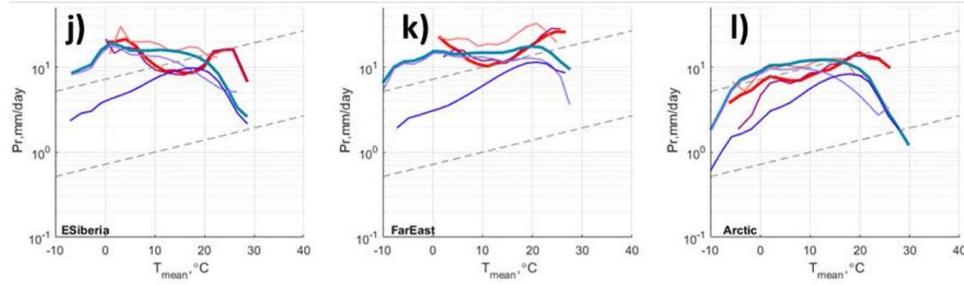
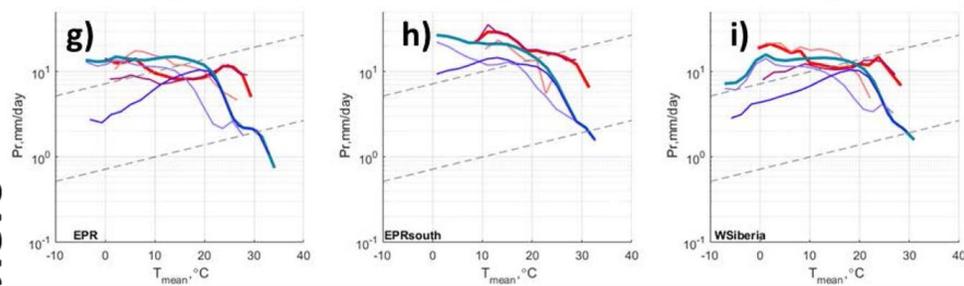
Chernokulsky et al, 2019

Аномальные осадки и температура

зима

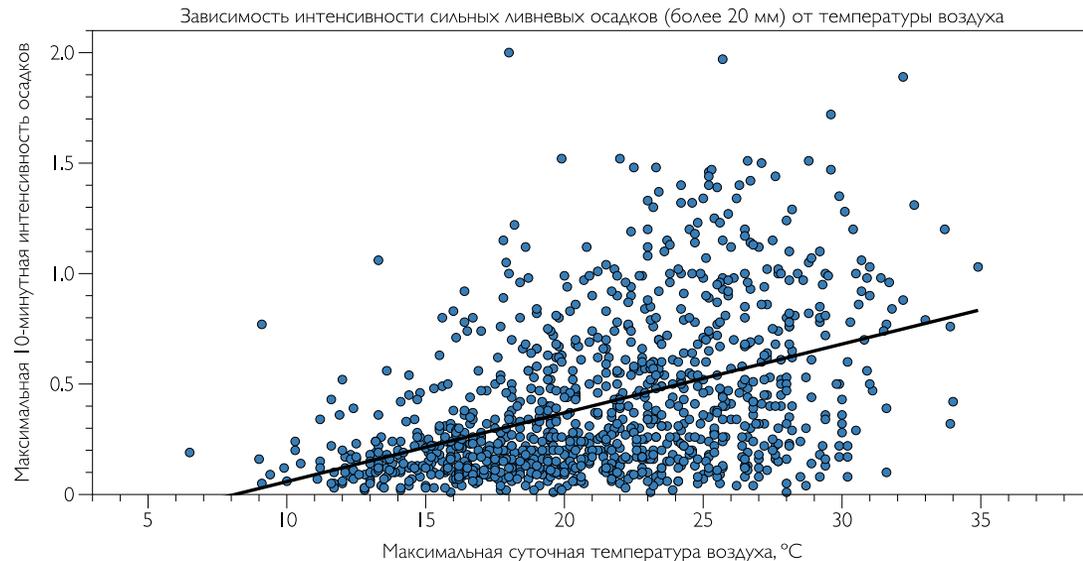


лето



— Total, stations — Lsp, stations — Convective, stations — Total, ERA5 — Lsp, ERA5 — Convective, ERA5

Aleshina et al, 2021

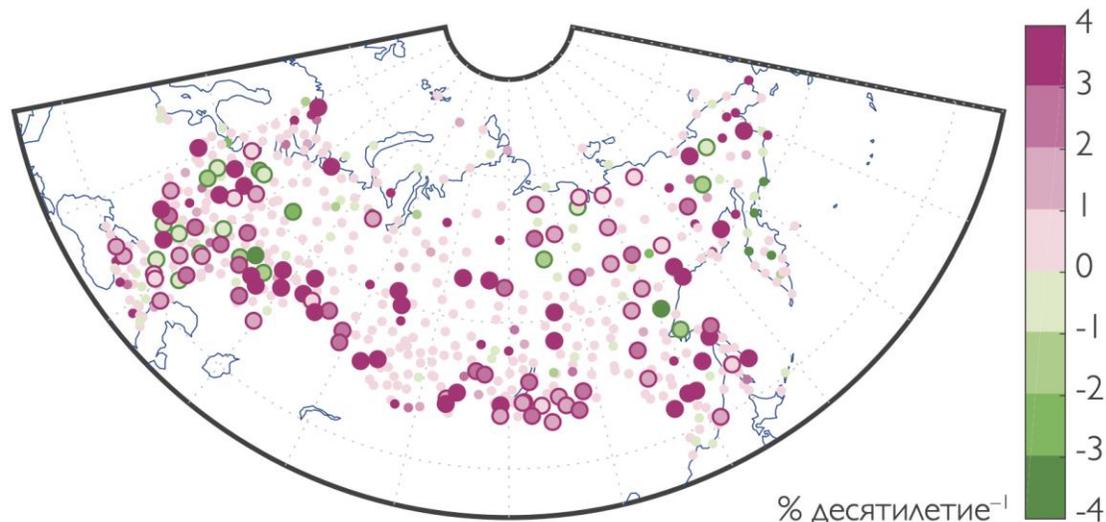


Связь температуры и 10-минутной интенсивности сильных ливней по данным pluviографов (для средней полосы ЕТР)

Связь логарифма 95-го перцентиля осадков (общей суммы и отдельных видов) и температуры, пункт — 7% рост (Клазиус-Клапейрон) для разных регионов России

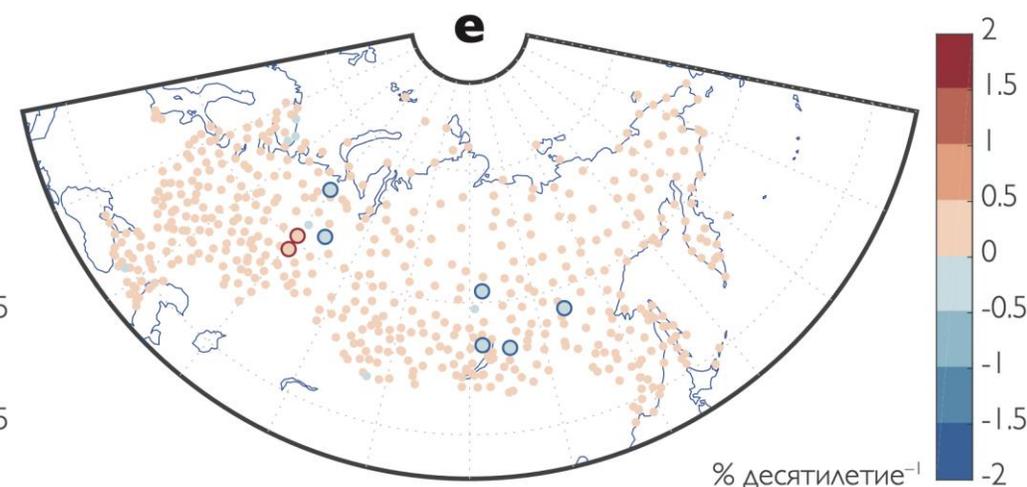
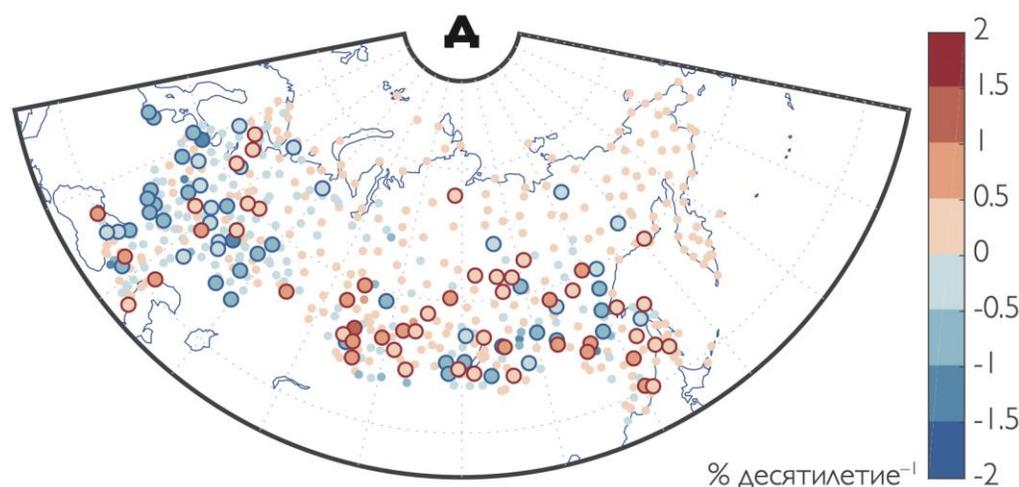
Изменение характера облаков, гроз, града

Линейный тренд доли небосвода, занятой кучево-дождевыми облаками (1966–2020)

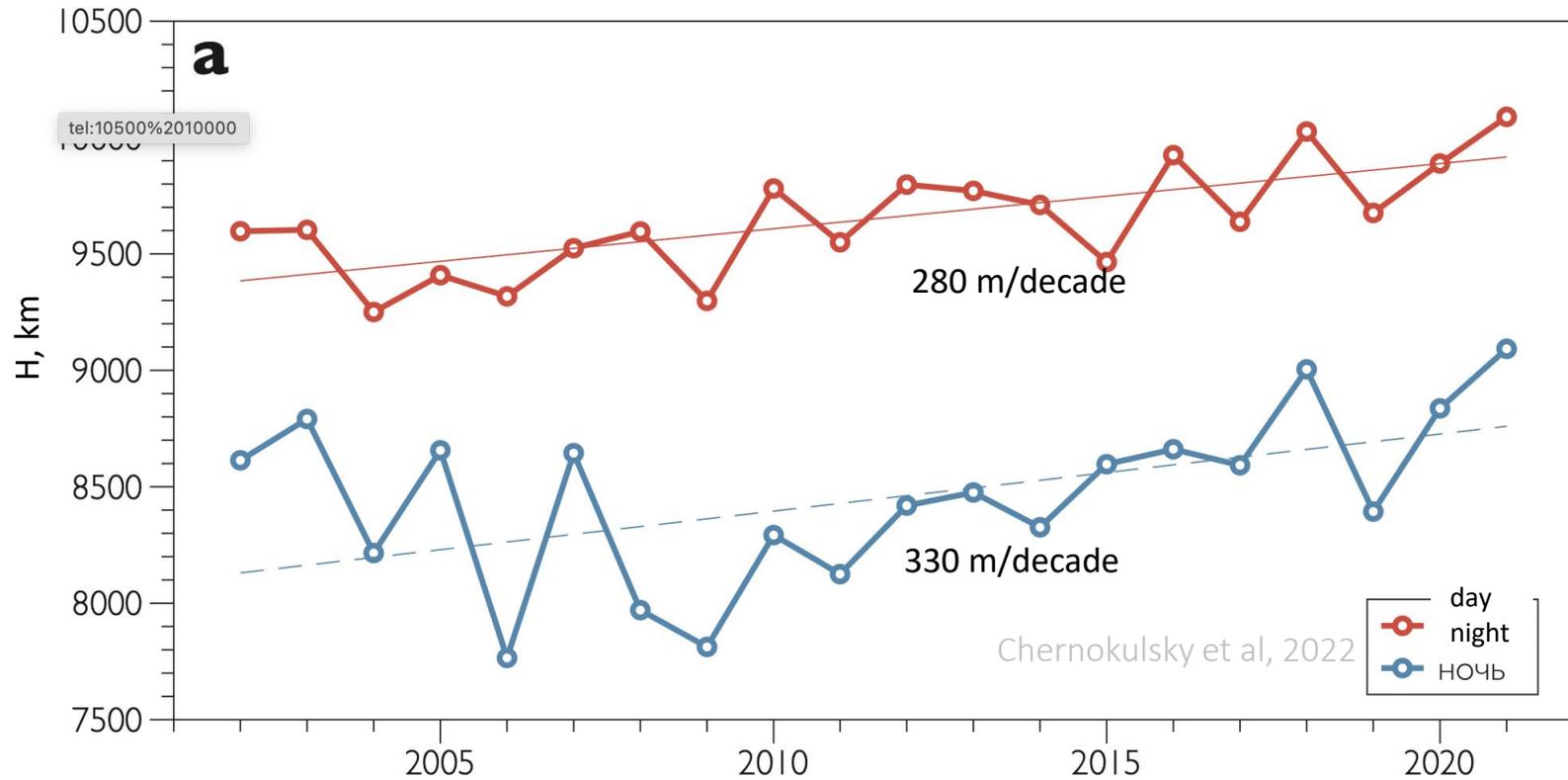


Чернокульский и др., 2022

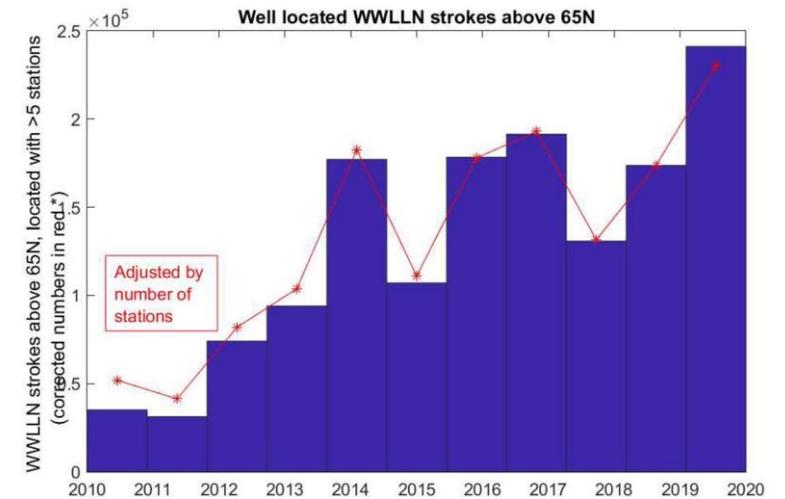
Линейный тренд повторяемости дней с грозой (слева) и градом (справа)



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



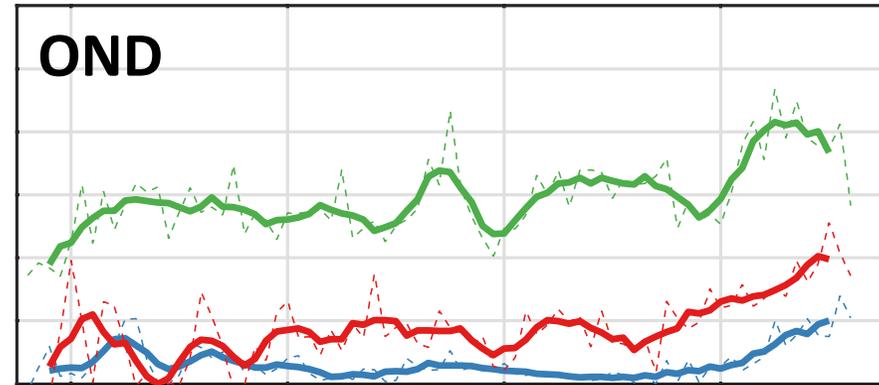
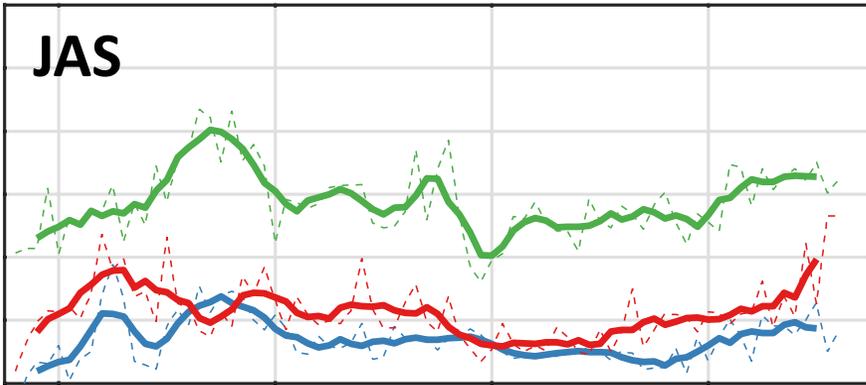
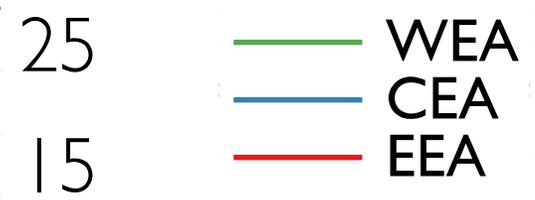
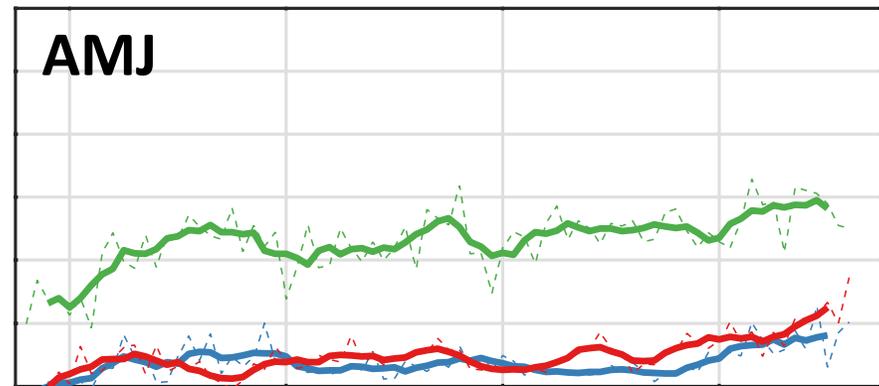
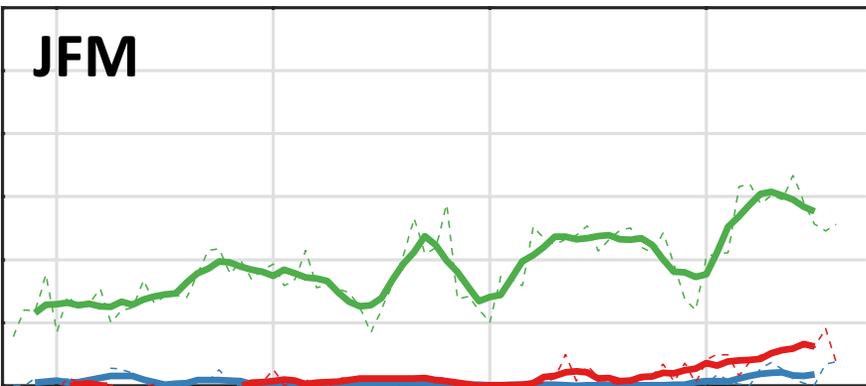
Число молниевых вспышек в Арктике (>65N) по данным WWLLN



Holzworth et al., 2021

Используется продукт MODIS 6.1 L2, Terra и Aqua, 2002–2021, данные о высоте верхней границы облаков (всех) – переменная `cloud_top_height_1km`, оптической толщине и фазовом составе облаков с километровым разрешением. Для определения принадлежности облаков к конвективным накладывались условия на минимальную оптическую плотность τ ($\tau \geq 23$) и обязательное наличие ледяной фазы.

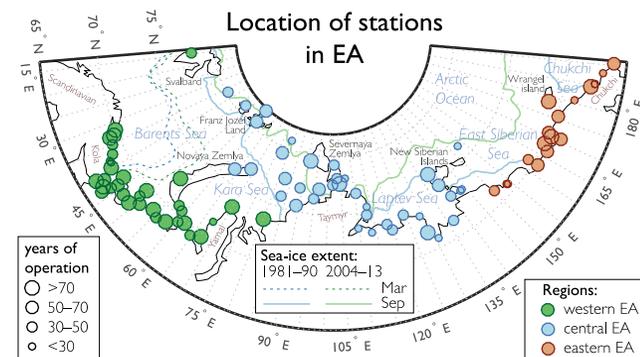
Изменение конвективных облаков в Арктике, %



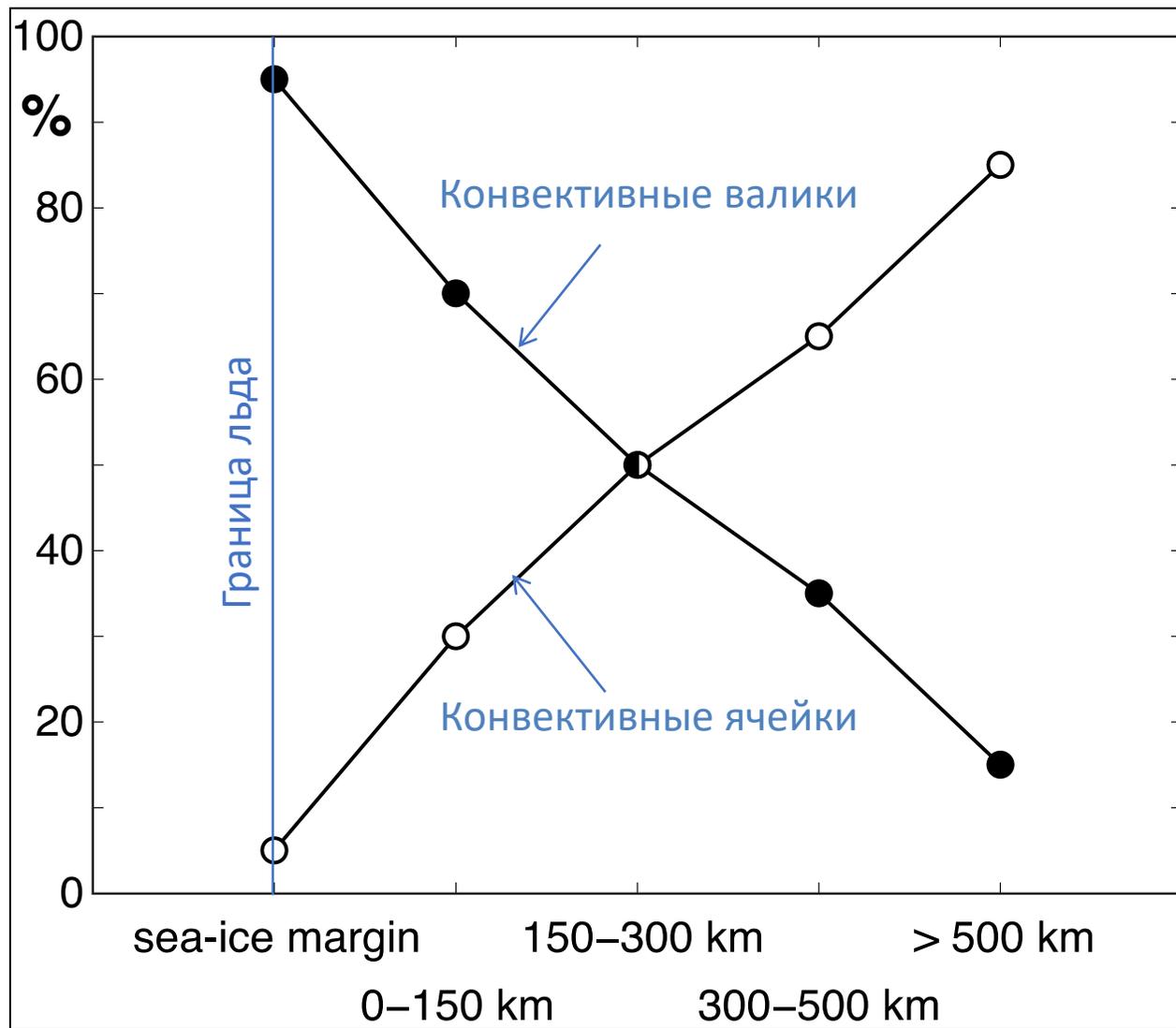
1940 1960 1980 2000

1940 1960 1980 2000

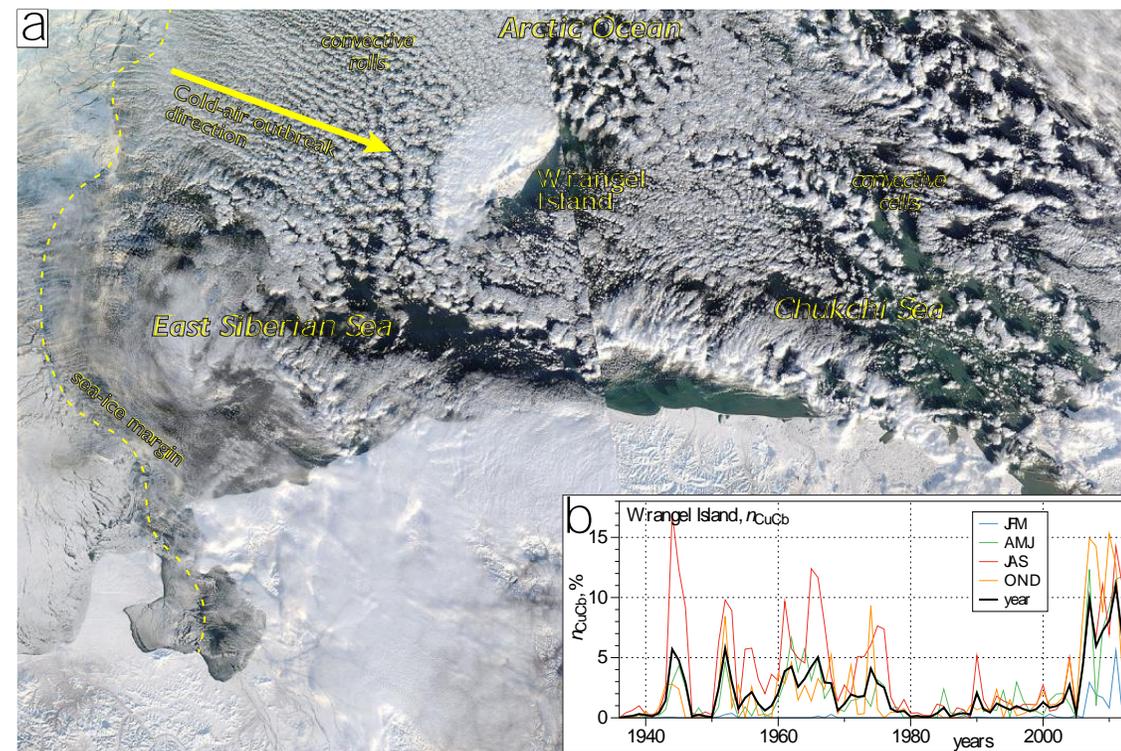
Chernokulsky et al., 2017;
Chernokulsky and Esau, 2019



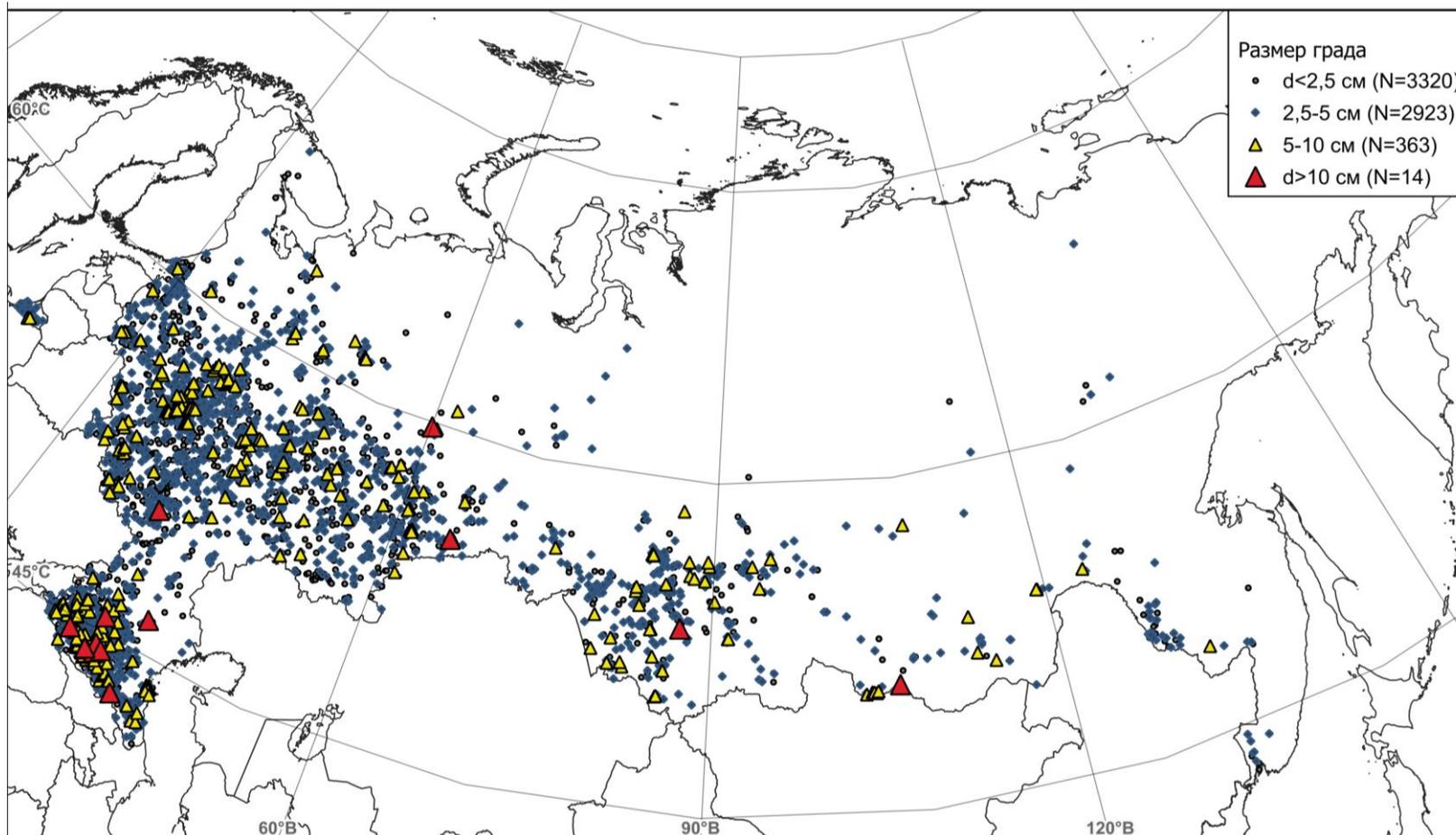
Конвекция во время холодных вторжений



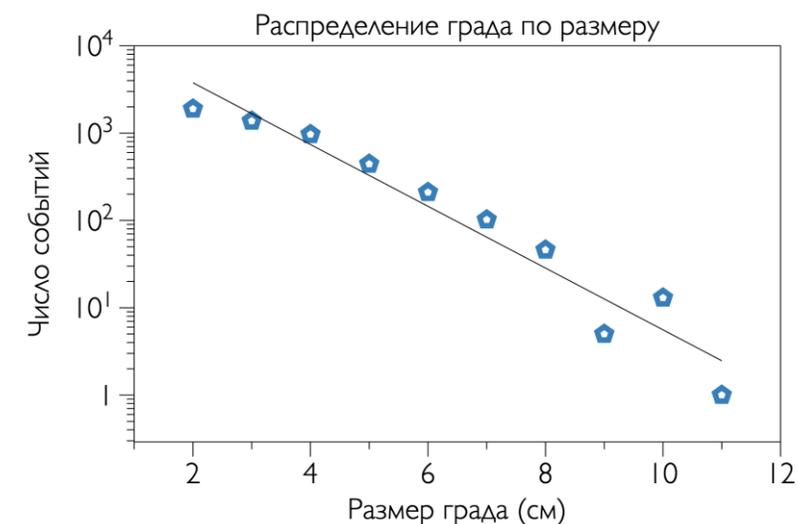
Эзау и Чернокульский, 2015



Chernokulsky and Esau, 2019



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

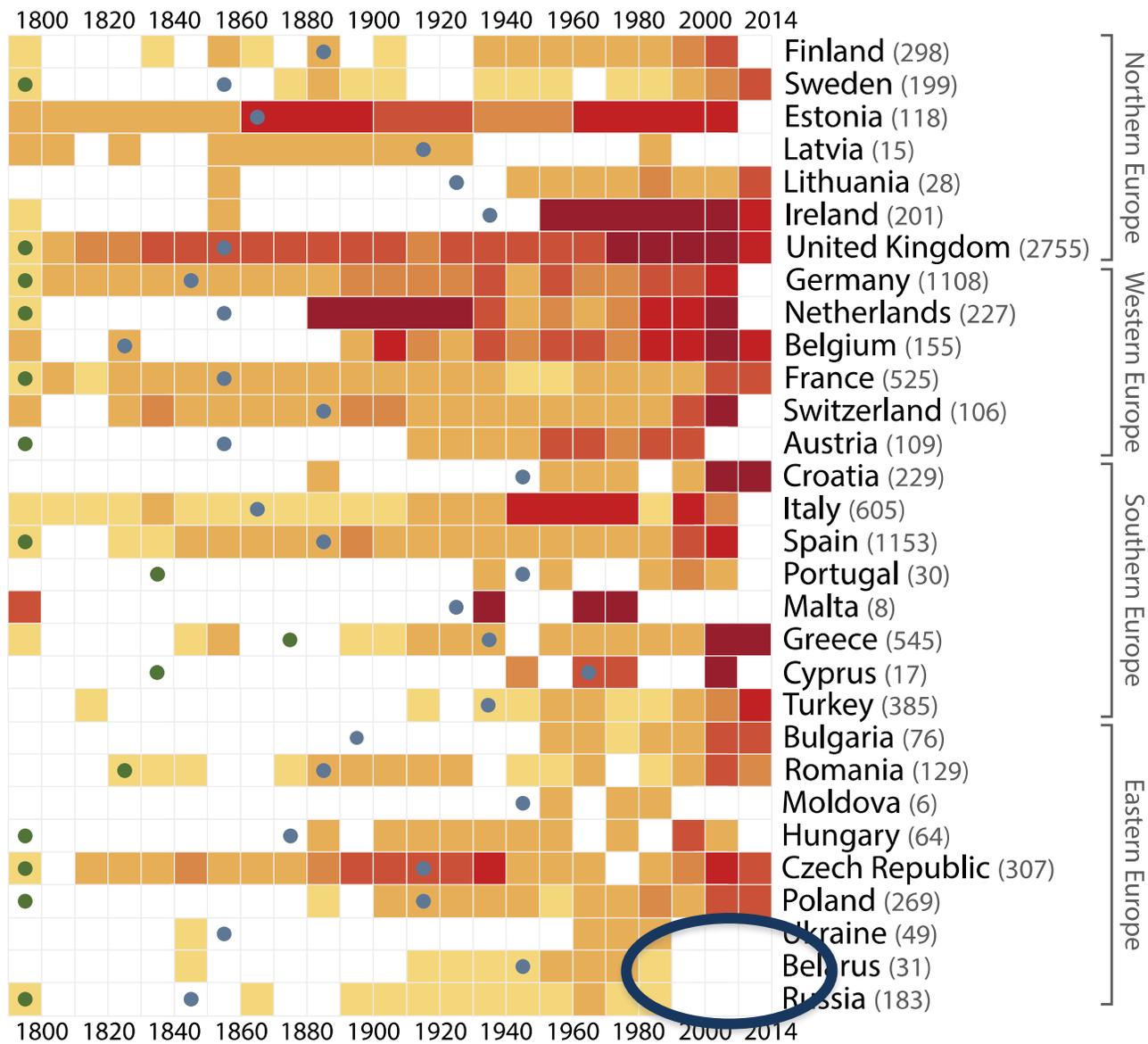


Распределение града по
размеру

Источники данных:
Наблюдения на станциях
Штормовые предупреждения
Научная литературы
Наблюдения очевидцев
База ESWD

Смерчи и шквалы

Климатология смерчей в Европе



Antonescu et al., 2017

Снитковский, 1987:
248 случаев

Источники информации о воздушных и водных смерчах:

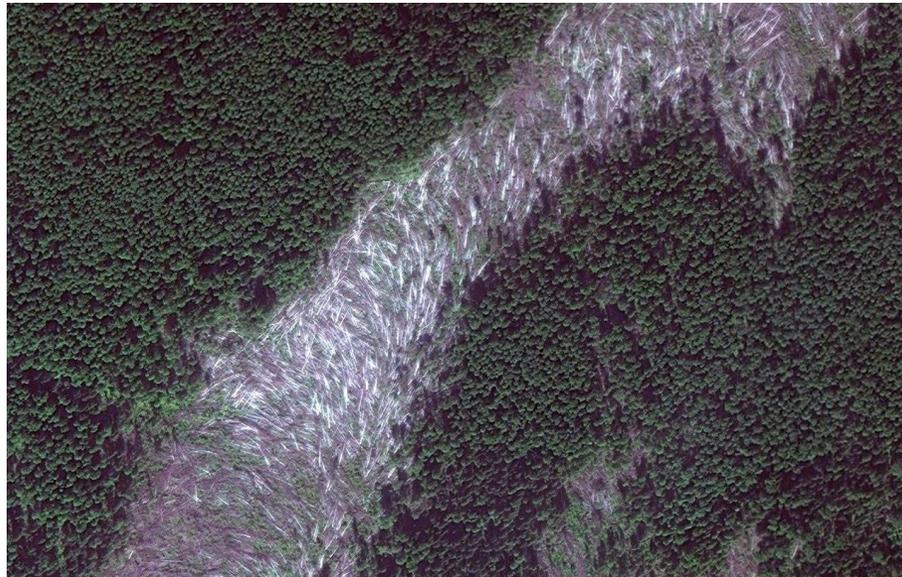
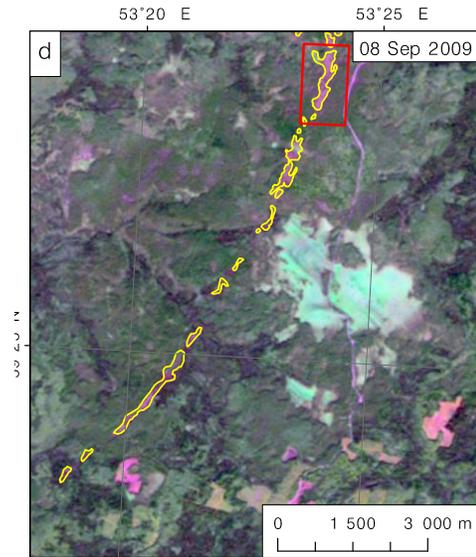
- Научная литература: статьи и книги (обзоры и ‘case studies’);
- Базы данных гидрометеослужб (база данных Гидрометцентра для атомной энергетики, база данных укрГМЦ, база данных ВНИИГМИ (ЕСИМО));
- Станционные наблюдения;
- База данных ESWD (European severe weather database, содержит много ошибок по территории С.Евразии);
- База данных отсканированных газет (с середины 19 в);
- Русские хроники, ПСРЛ (слово ‘вихрь’);
- Новости в Интернете и ТВ, обзоры в Интернете;
- Социальные сети и форумы (фото и видео очевидцев);
- Спутниковая информация.
- Радарная информация, реанализы – для верификации

Выявление смерчей в лесных регионах

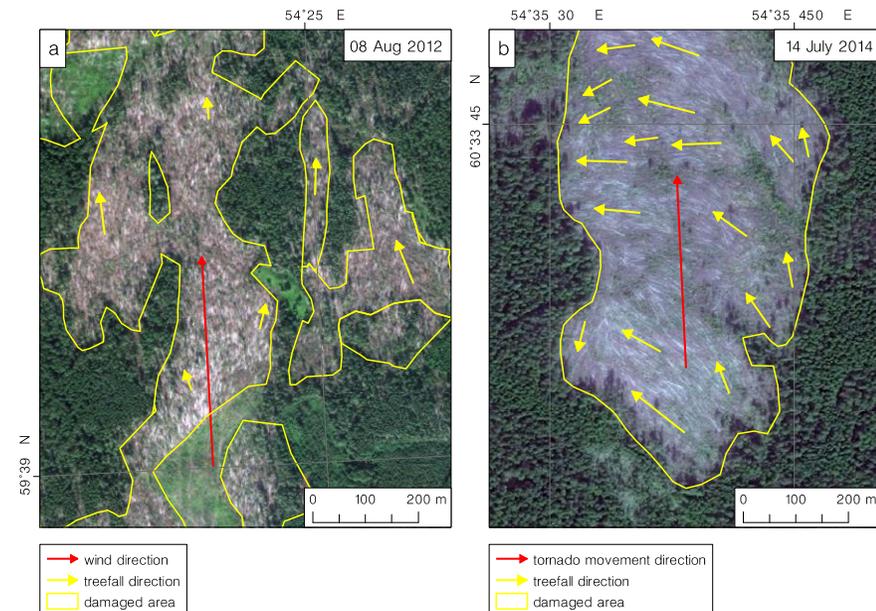
1. Поиск «кандидатов» – вытянутых узких ветровалов (по данным Landsat Global Forest Change base: Year Loss product).

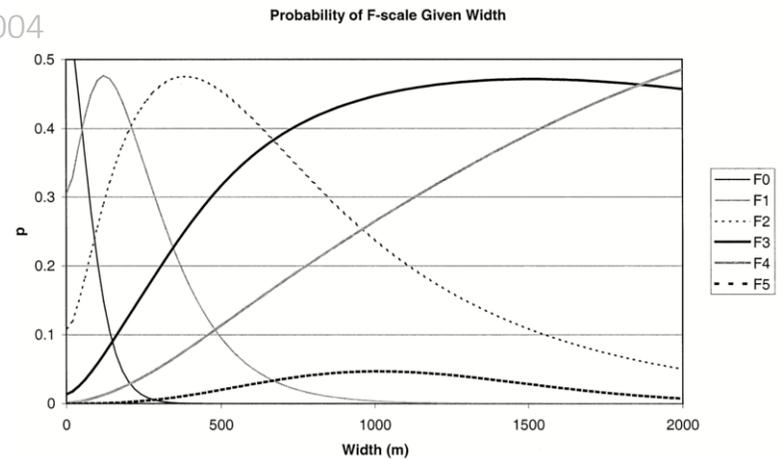
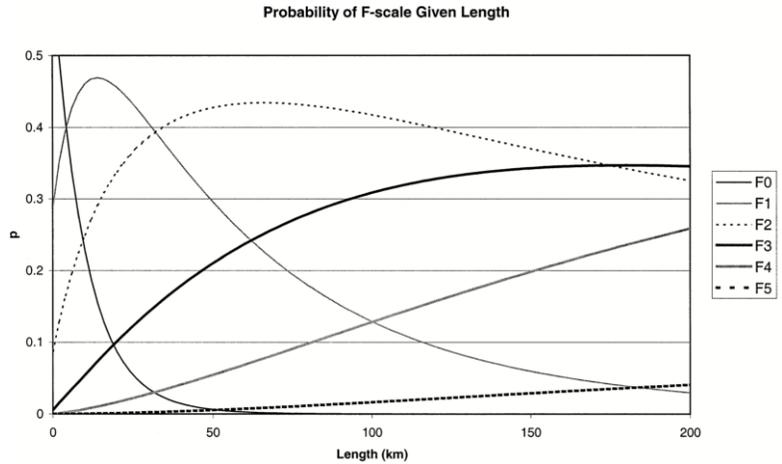
2. Детальный анализ таких ветровалов по снимкам с высоким разрешением (геометрия вывала деревьев: в смерчах лежат против часовой стрелки).

Shikhov and Chernokulsky, 2018;
Shikhov et al., 2020

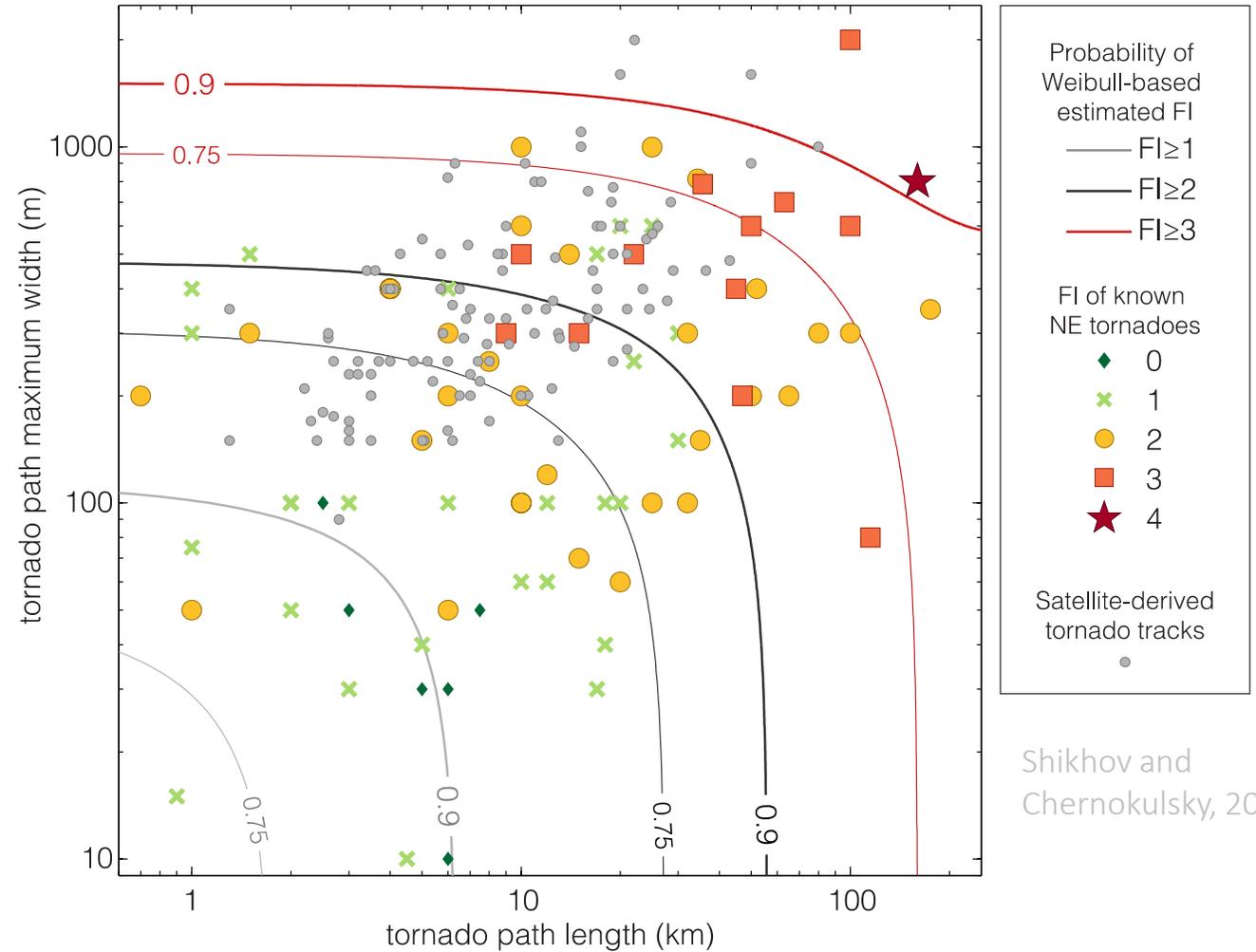


Особенности ветровалов в связи с прохождением шквала (a) и смерча (b) по снимкам с высоким разрешением



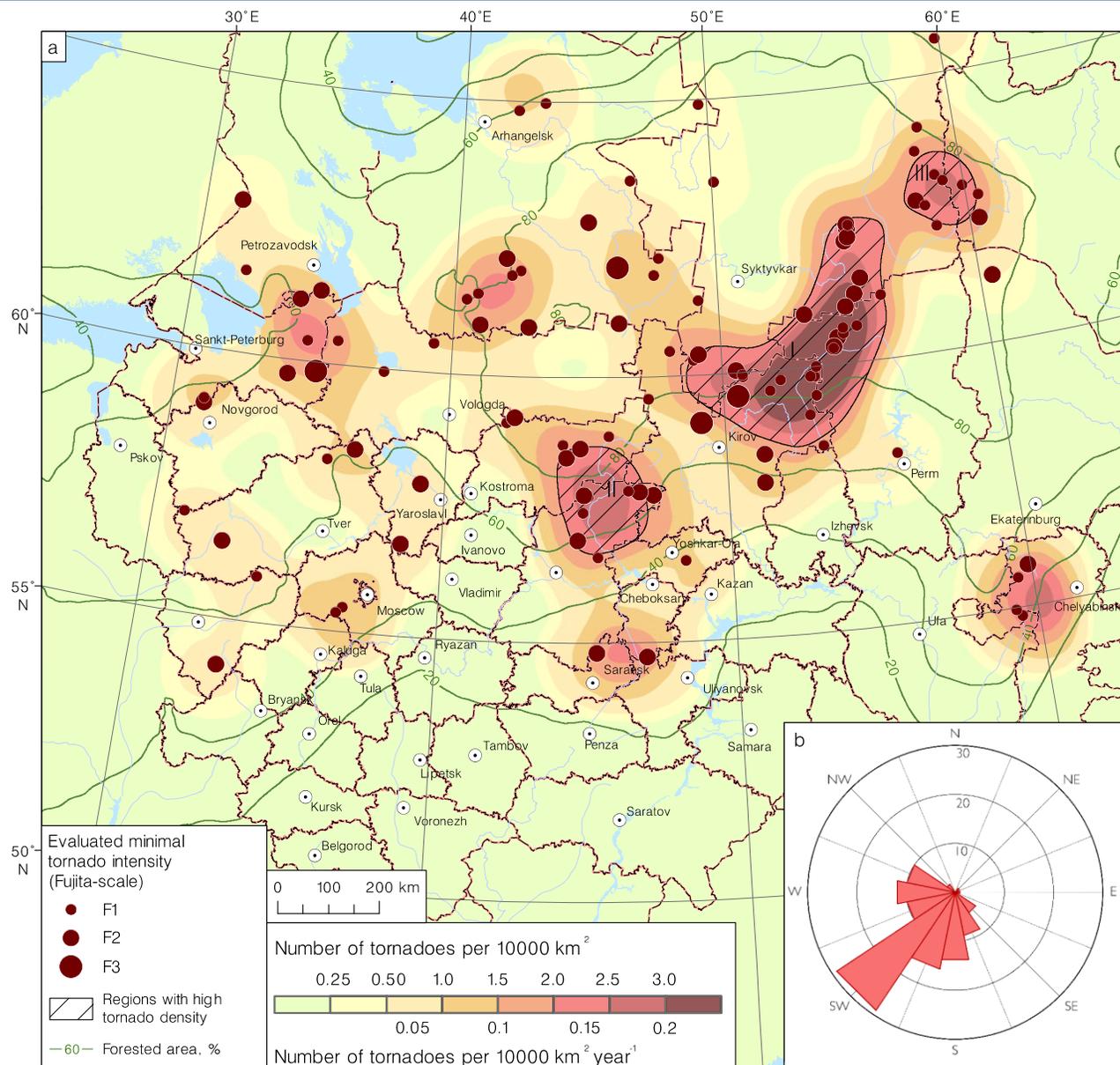


Распределение смерчей определенной интенсивности в зависимости от длины и ширины смерча (распределение Вейбулла)



Определение вероятности минимальной интенсивности смерча в зависимости от ширины и длины (в предположении их независимости)

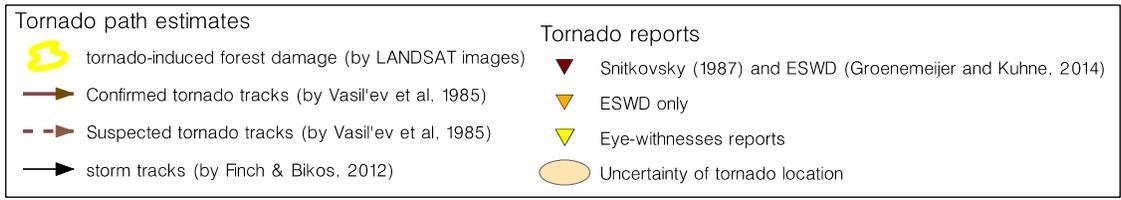
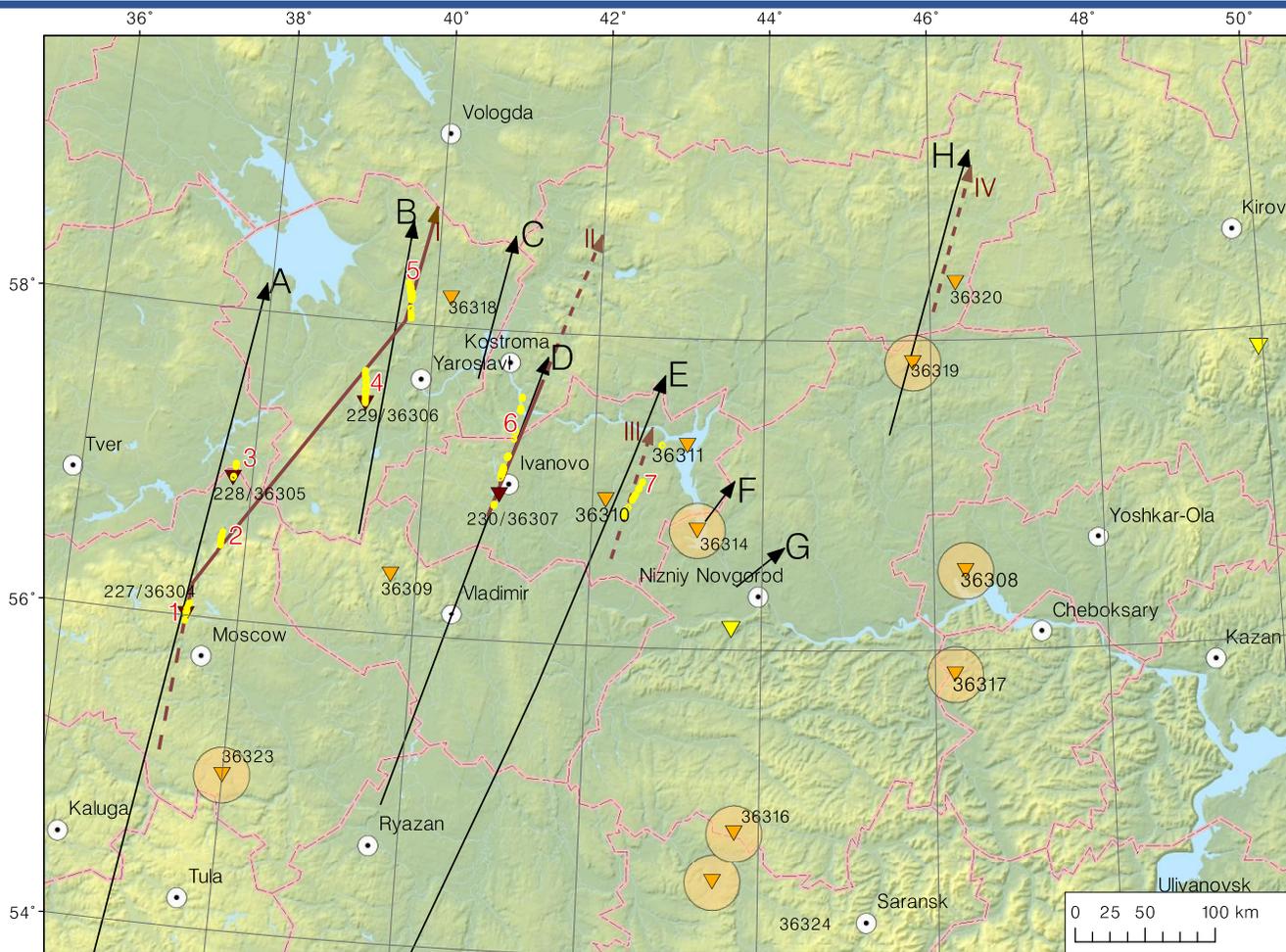
Shikhov and Chernokulsky, 2018



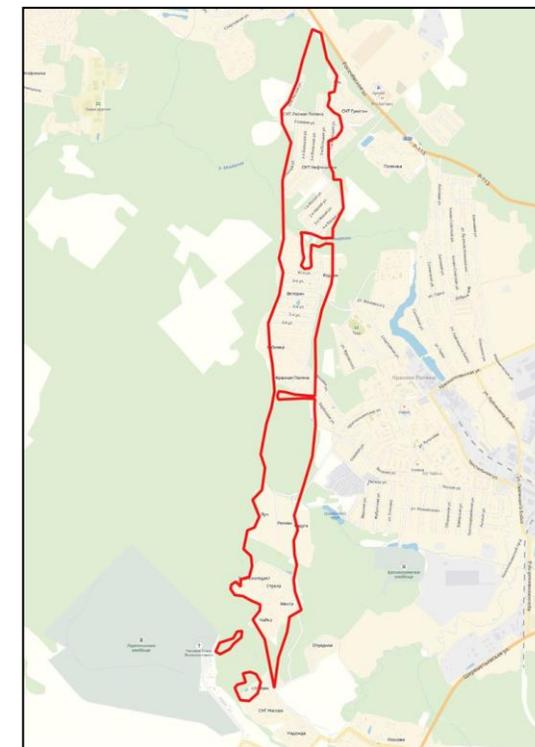
Для 2000-2016 найдено более 250 смерчей в лесной зоне ЕТР и в АТР, которые ранее были не известны (у смерчей не было ни одного свидетеля).

Опровергнуто расхожее мнение об отсутствии смерчей над лесом.

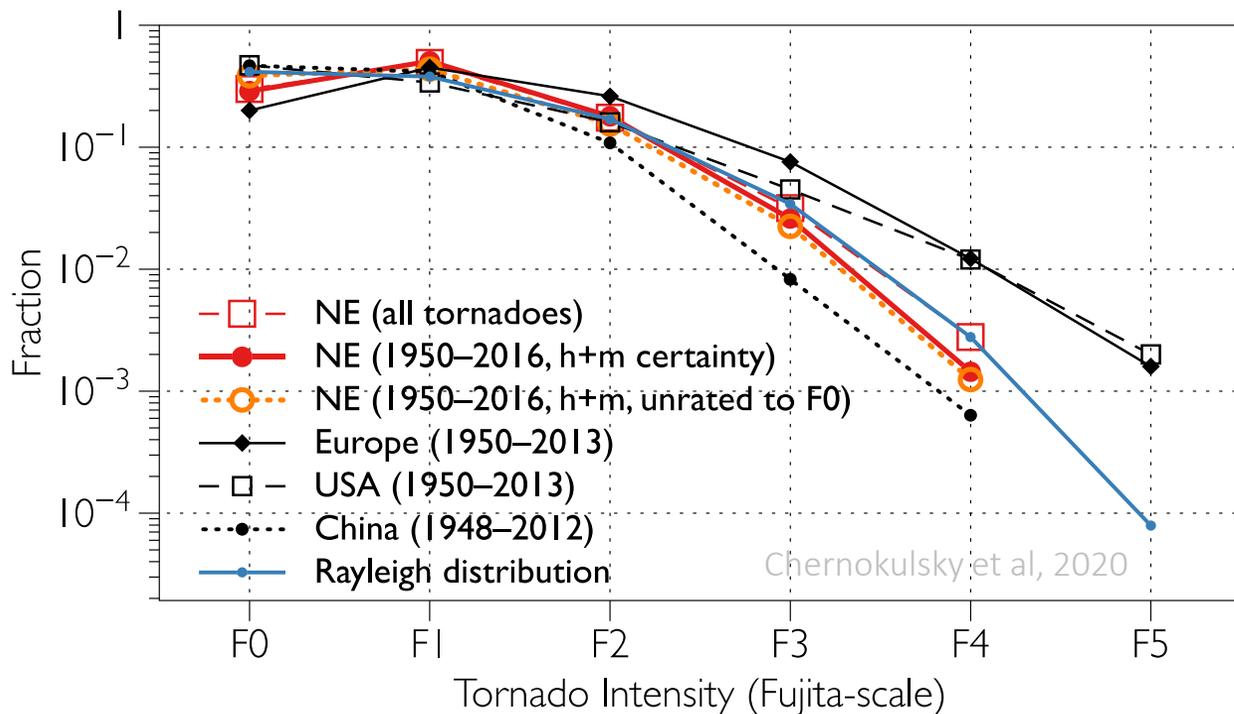
Shikhov and Chernokulsky, 2018



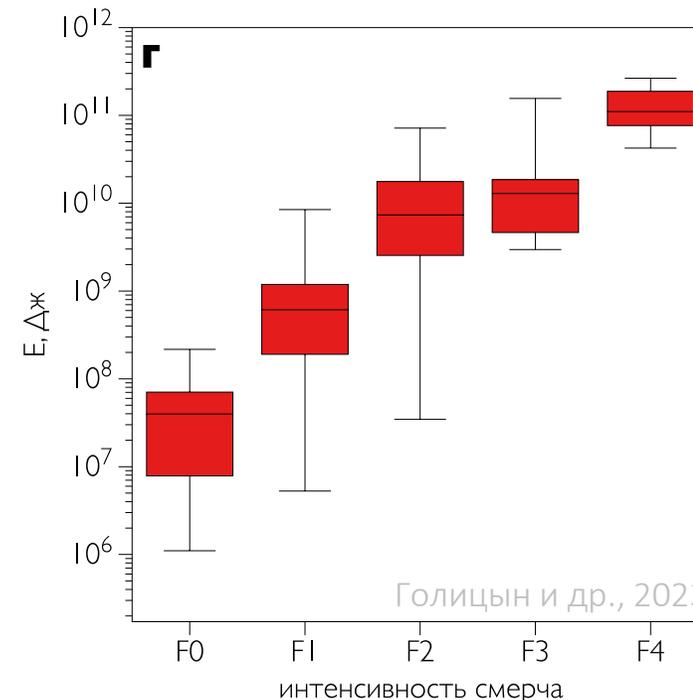
Данные Landsat использовались для восстановления треков смерчей во время вспышки 9 июня 1984 года (Ивановский смерч): определены треки 8 смерчей (их ширина, длина).



Chernokulsky and Shikhov, 2018



Характерные значения энергии смерчей разной интенсивности



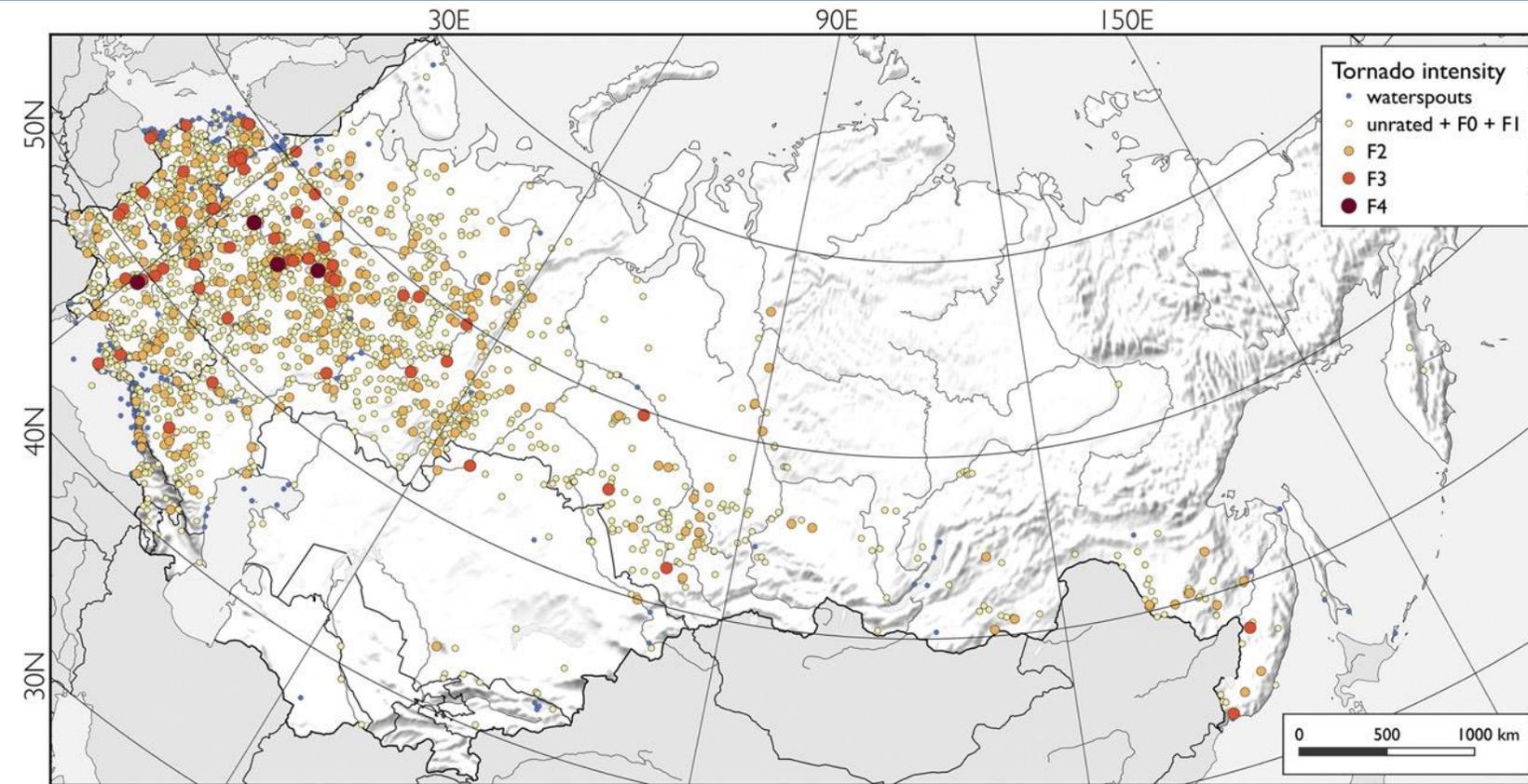
Fujita Scale <small>(Developed in 1971, used through January 2007)</small>		
Rating	Winds	Expected Damage
F0	< 73 mph	Light damage. Damage to chimneys and billboards; branches broken off trees; shallow-rooted trees pushed over.
F1	73-112 mph	Moderate damage. Surface peeled off roofs; mobile homes pushed off foundations or overturned; moving autos blown off roads.
F2	113-157 mph	Considerable damage. Roofs torn off frame houses; mobile homes demolished; boxcars overturned; large trees snapped or uprooted; light-object missiles generated; cars lifted off ground.
F3	158-206 mph	Severe damage. Roofs and some walls torn off well-constructed houses; trains overturned; most trees in forest uprooted; heavy cars lifted off ground and thrown.
F4	207-260 mph	Devastating damage. Well-constructed houses leveled; structures with weak foundations blown some distance; cars thrown and large missiles generated.
F5	261-318 mph	Incredible damage. Strong frame houses leveled and foundations swept clean of debris; automobile-sized missiles fly through the air in excess of 100 meters; trees debarked; incredible phenomena occur.

Распределение смерчей по интенсивности

F0	F1	F2	F3	F4
9.5×10^{-3}	0.1	1.8	3.1	26.4

Медианные значения энергии смерчей разной интенсивности в тротиловом эквиваленте (т ТНТ)

Новая база данных о смерчах в Северной Евразии

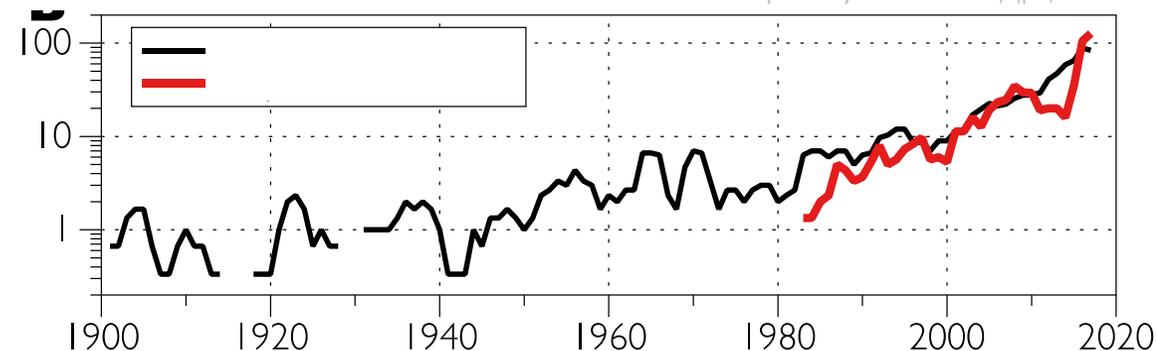


Климатология смерчей разной интенсивности в Северной Евразии (на данный момент база до 2018, идет обновление до 2024 года), собрана информация о >3000 случаев

В год в России формируется:
100-300 сухопутных смерчей
10-50 смерчей $\geq F2$
1-4 смерча $\geq F3$

Chernokulsky et al, 2020

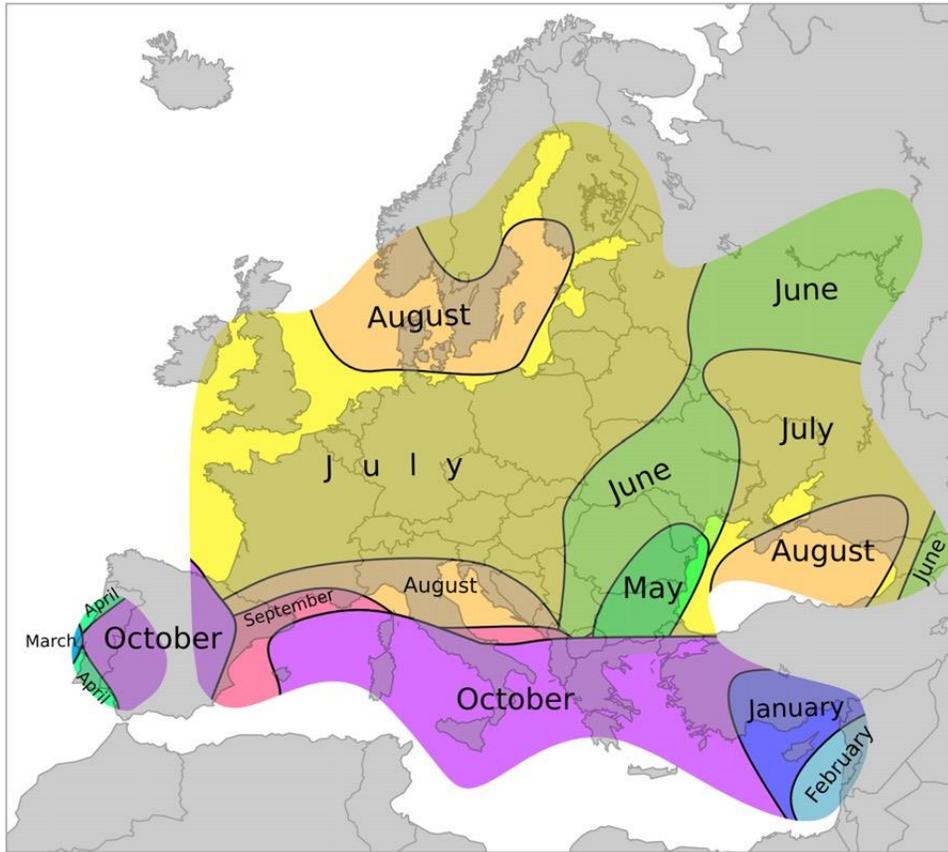
Изменение числа смерчей во времени (среднее скользящее за 3 года) по данным очевидцев (черная линия) и спутниковым данным (красная линия)



Чернокульский и др., 2021

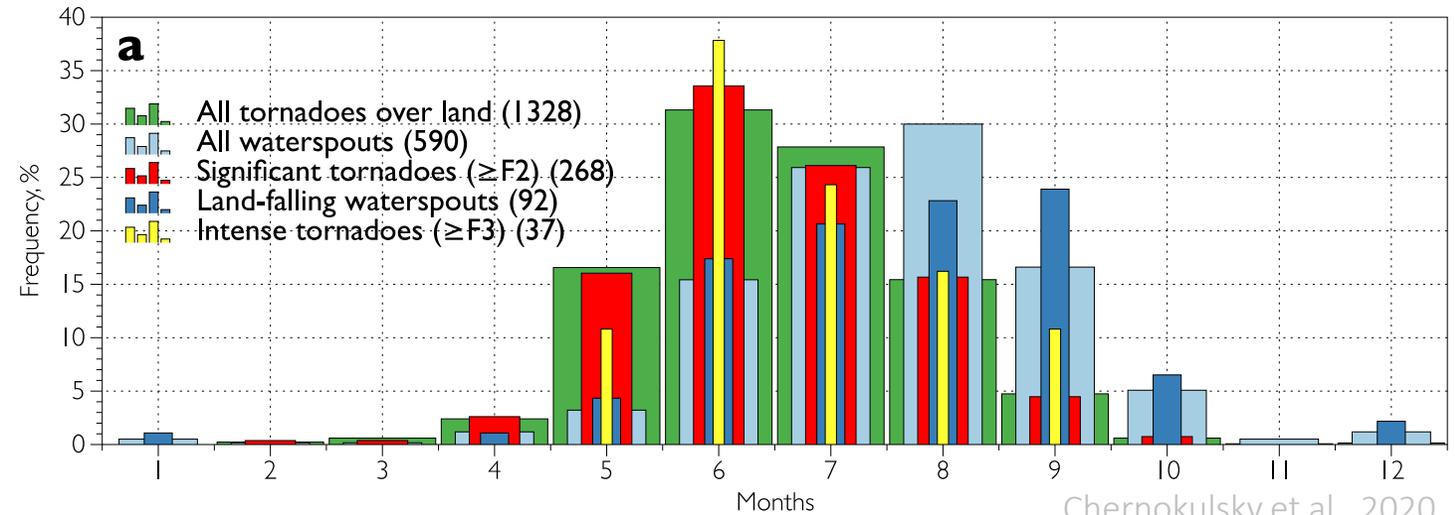
Годовой и суточный ход числа смерчей

Groenemeijer and Kühne, 2014

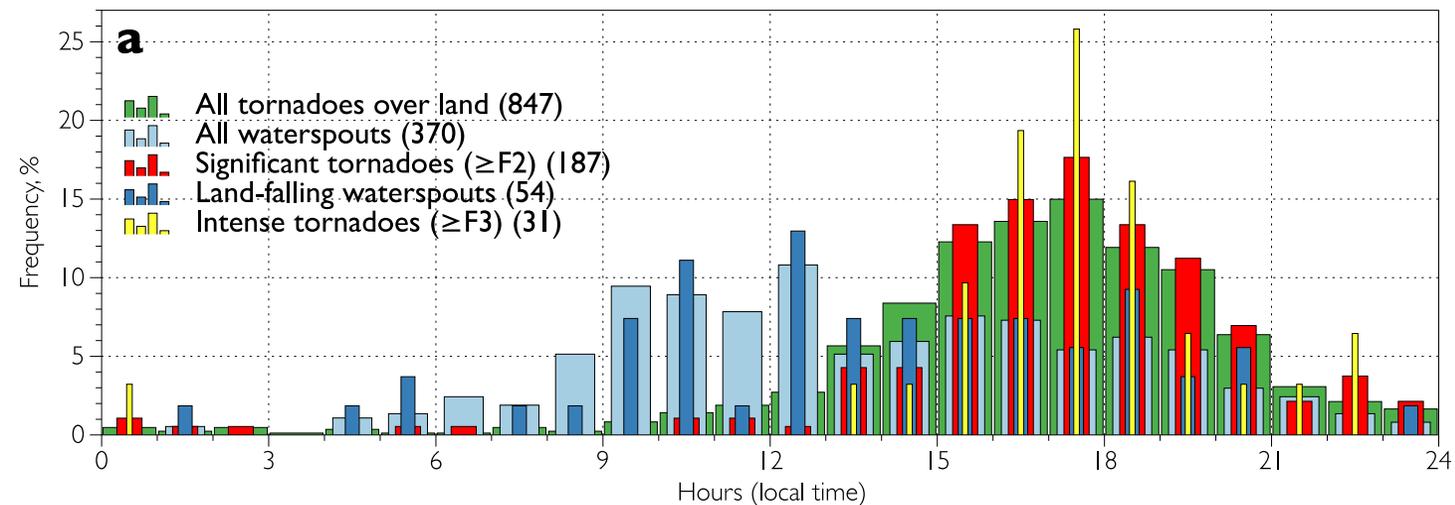


Месяц с максимальным числом дней со смерчами в Европе

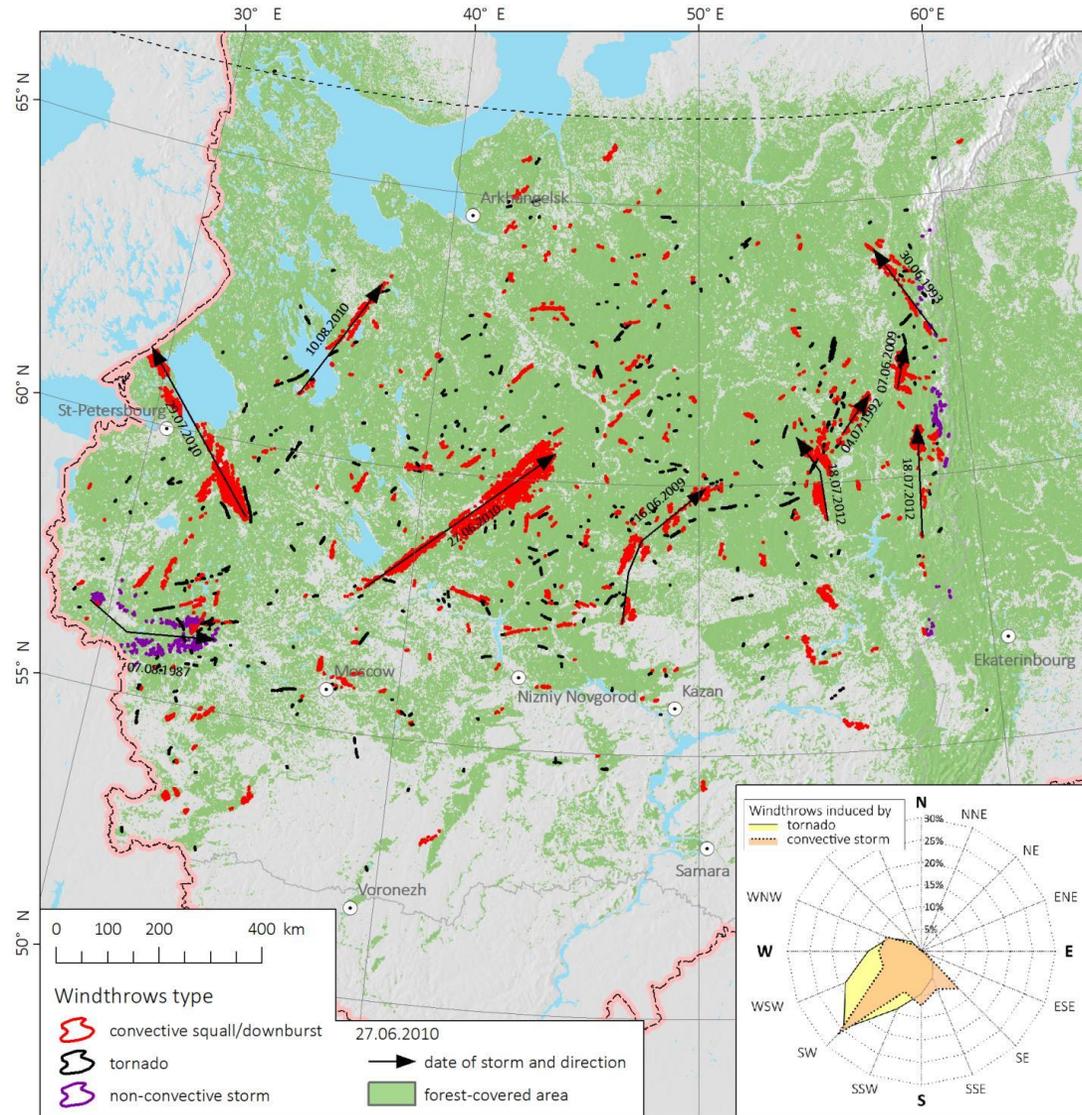
Годовой и суточный ход торнадо и водных смерчей над Северной Евразией



Chernokulsky et al., 2020

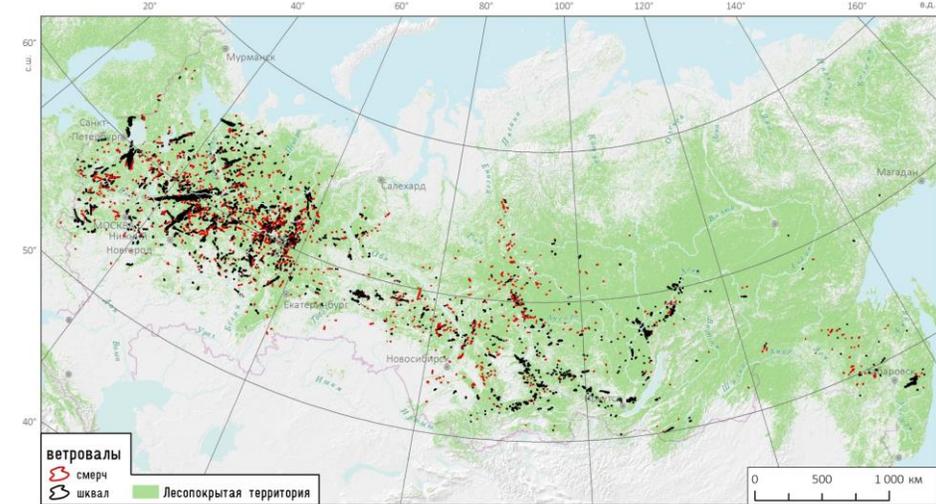


Ветровалы, долгоживущие шквалы

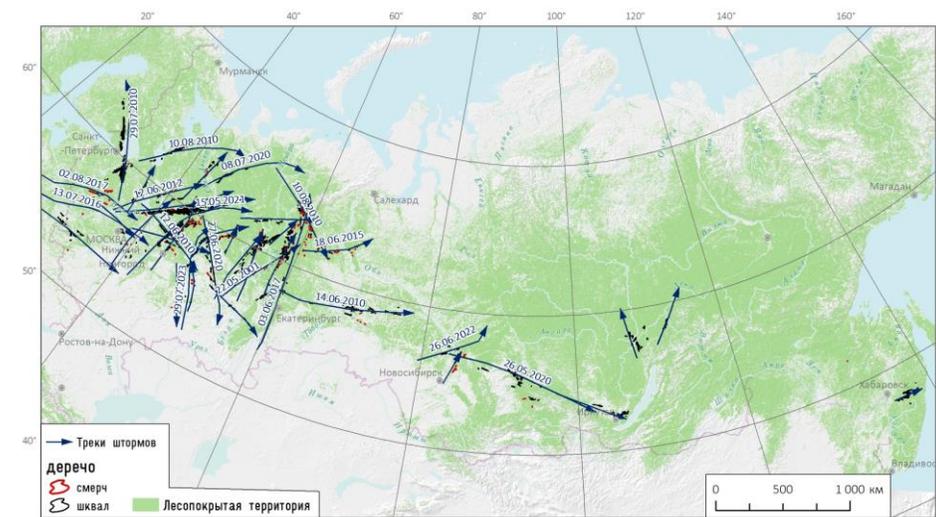


Shikhov et al, 2020

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



Ветровалы в лесной зоне России (~2500 событий)



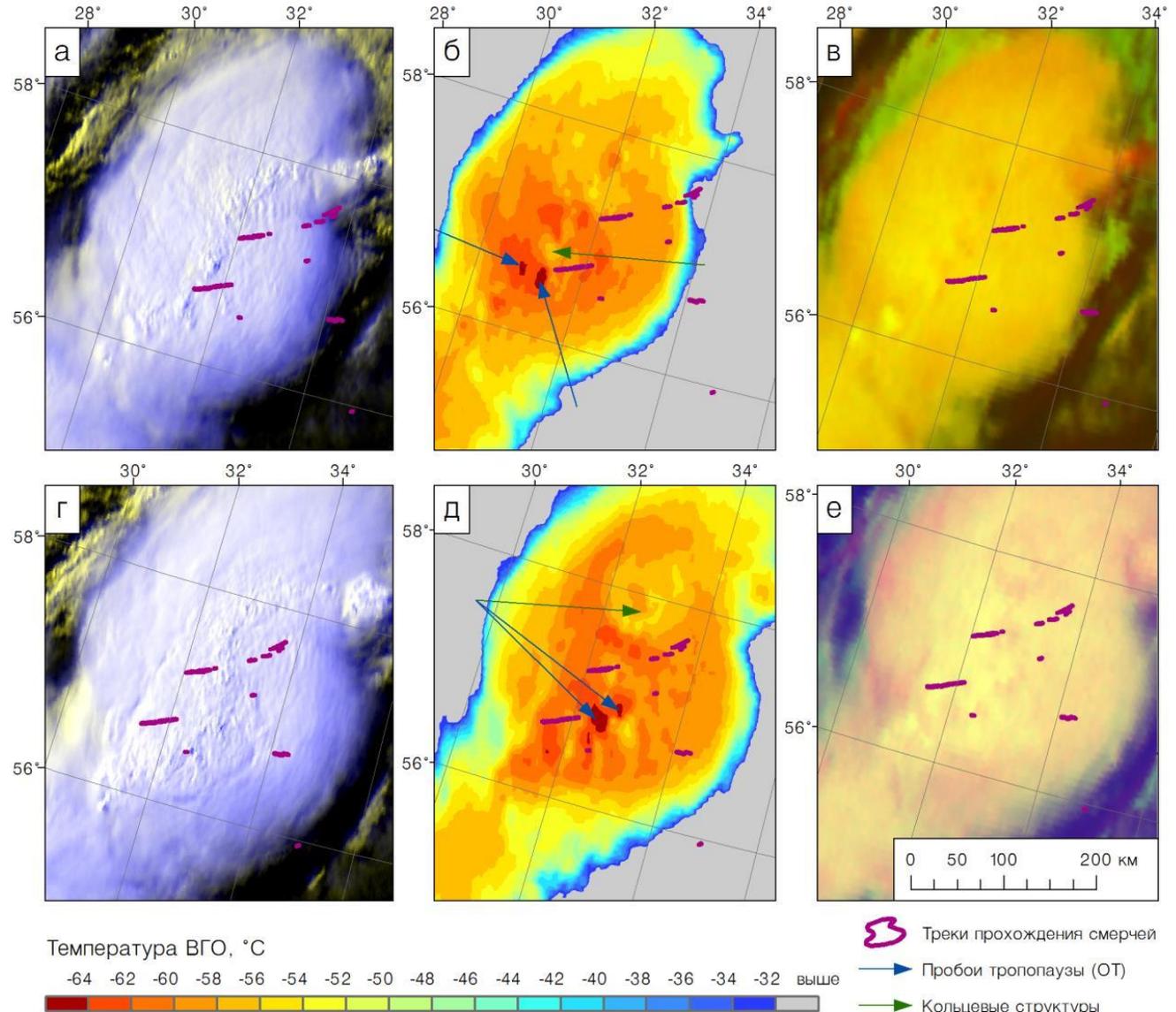
Долгоживущие шквалы ($L > 100$ км) (47 событий)

Мезомасштабные конвективные системы

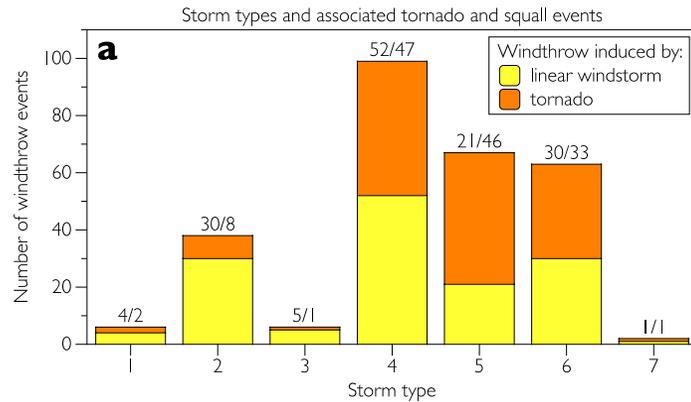
Данные METEOSAT, HIMAWARI:
2012-н.в. (каждые 15 мин.)

Температура ВГО и сигнатуры
МКС:
пробой тропопаузы (ОТ),
сигнатуры холодного кольца
(CRCUV) и т.д.

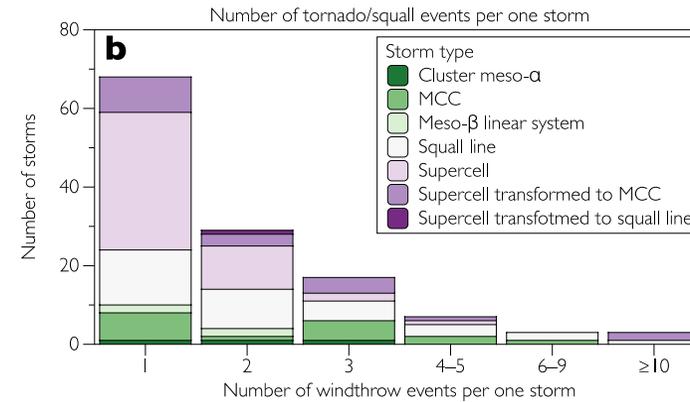
МКС в Тверской области, 02.08.2017:
синтез HRVcloud, $T_{ВГО}$, синтез
convective RGB



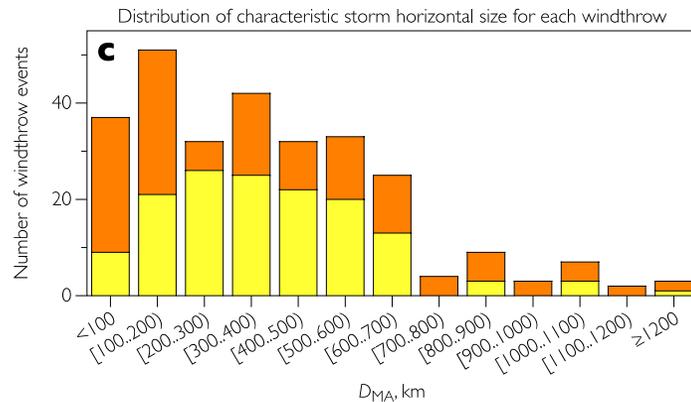
Тип МКС и тип события



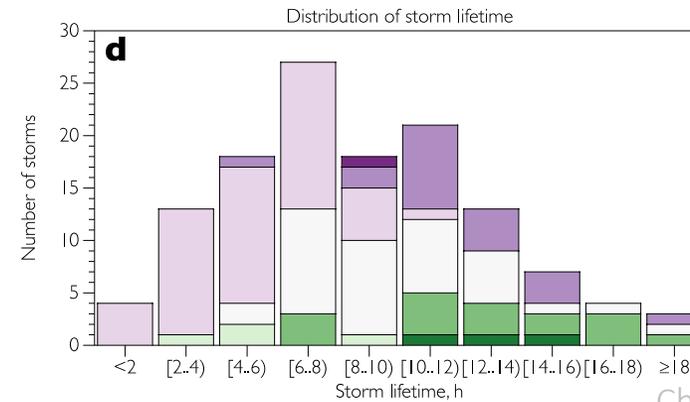
Число КОЯП для одного МКС



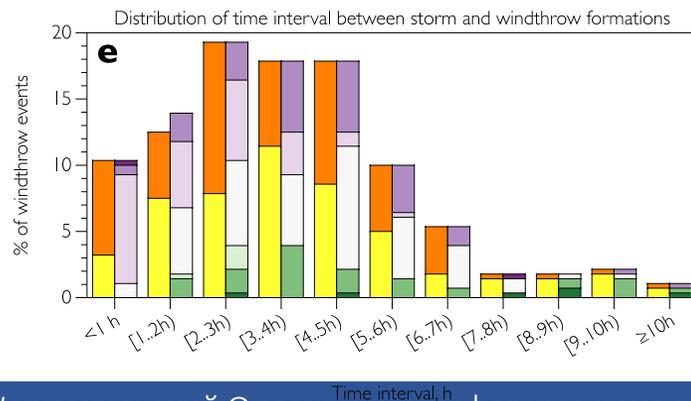
Размер МКС



Время жизни МКС

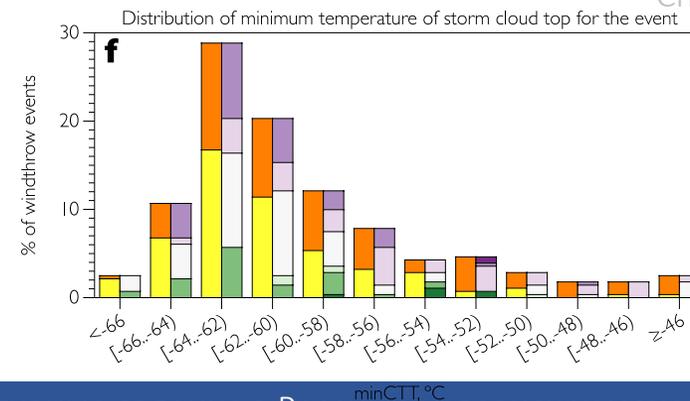


Время между образованием МКС и образованием события

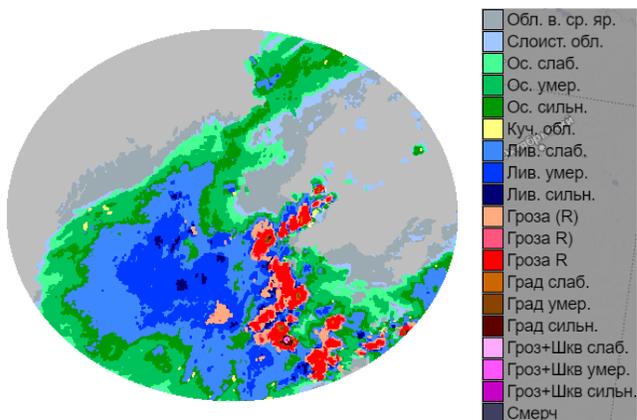


Chernokulsky et al., 2023

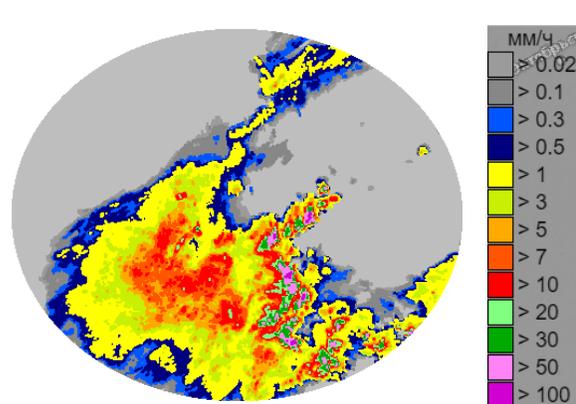
Мин Т на ВГО МКС



Анализ радарных характеристик треков МКС
(последовательности снимков). Проанализировано
65 систем (2017–2020)

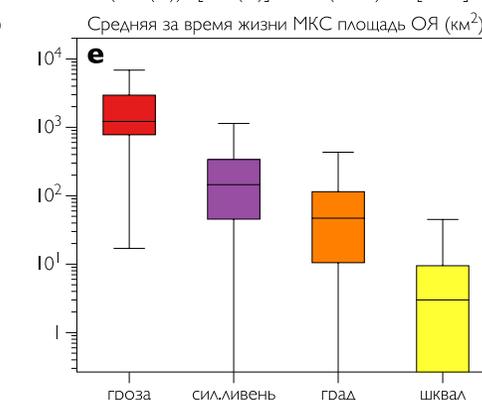
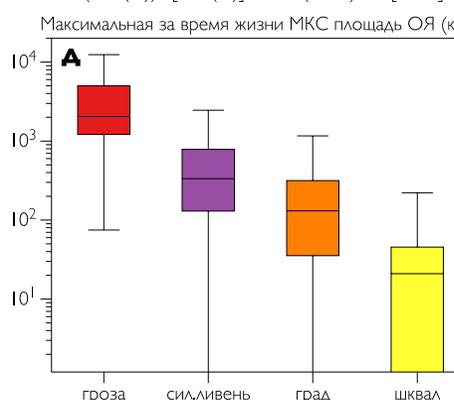
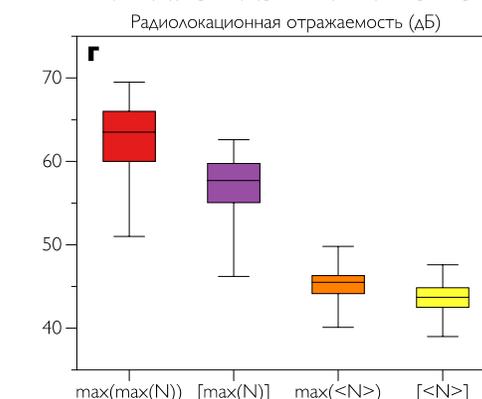
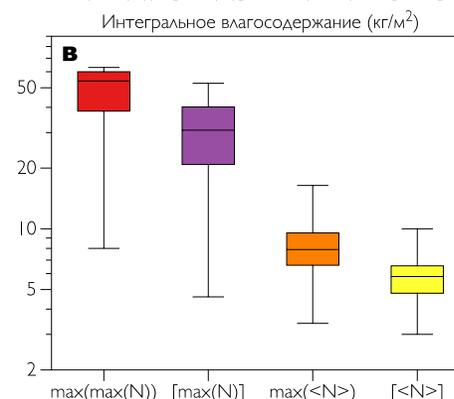
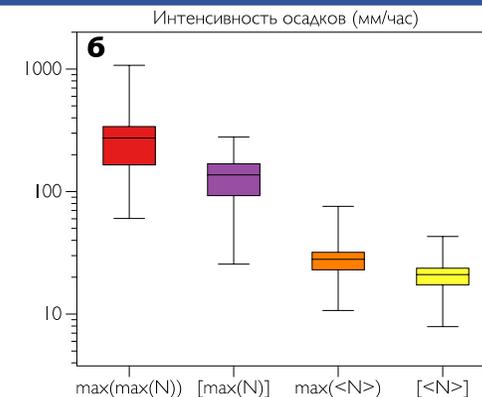
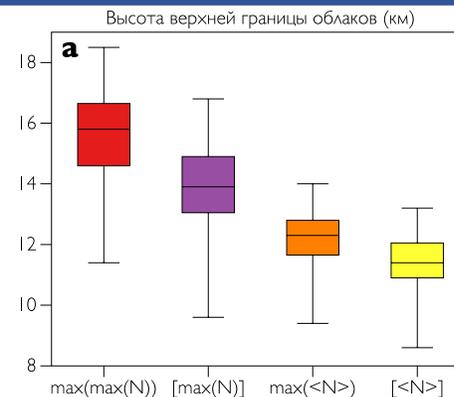


Метеоявления



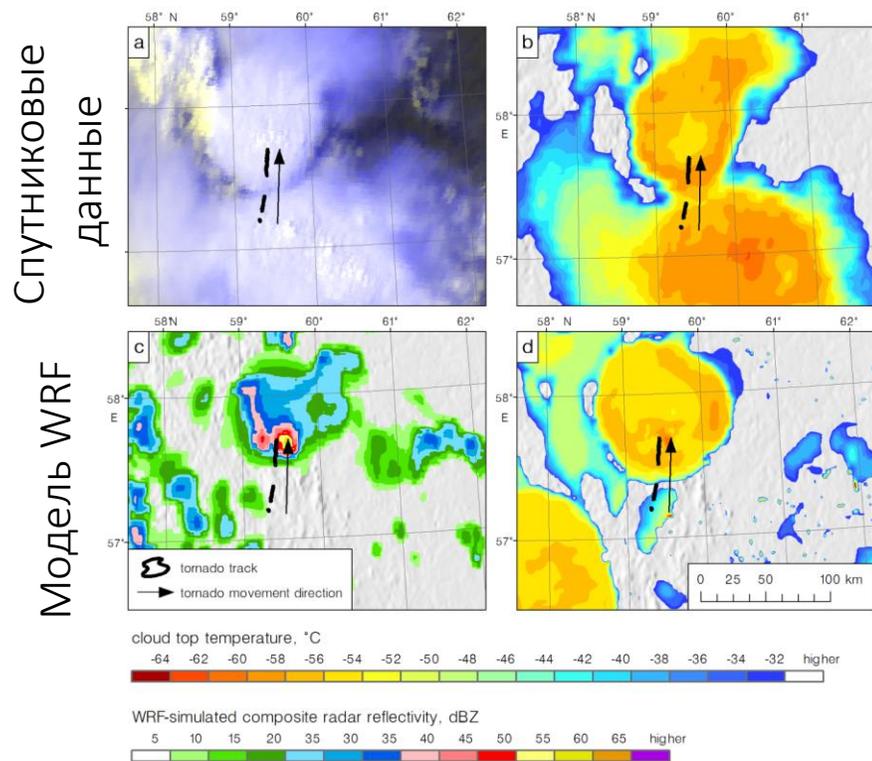
Интенсивность осадков

Распределение радарных
характеристик для 65
МКС на ЕТР



Численное моделирование МКС

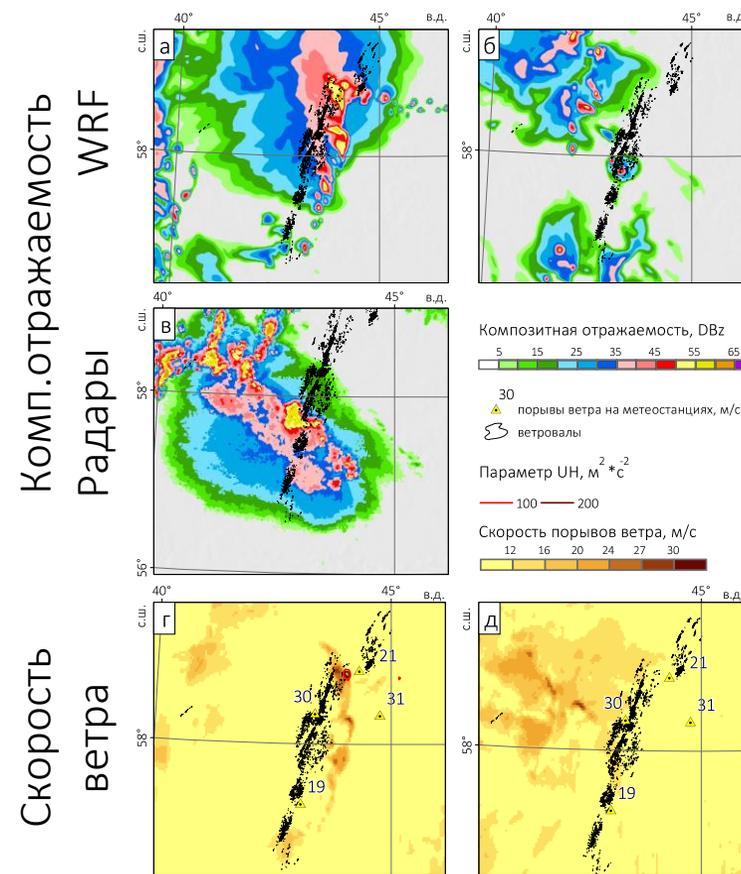
Исследование отдельных случаев МКС с моделями WRF, COSMO, ICON: Эксперименты на чувствительность к заблаговременности, граничным данным, свойствам подстилающей поверхности



МКС с торнадо, Урал, 2017

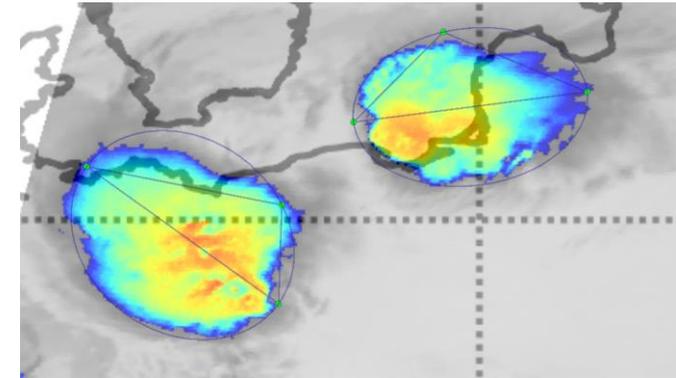
Chernokulsky et al. 2020

МКС 15 мая 2021 (шквалы, смерчи)

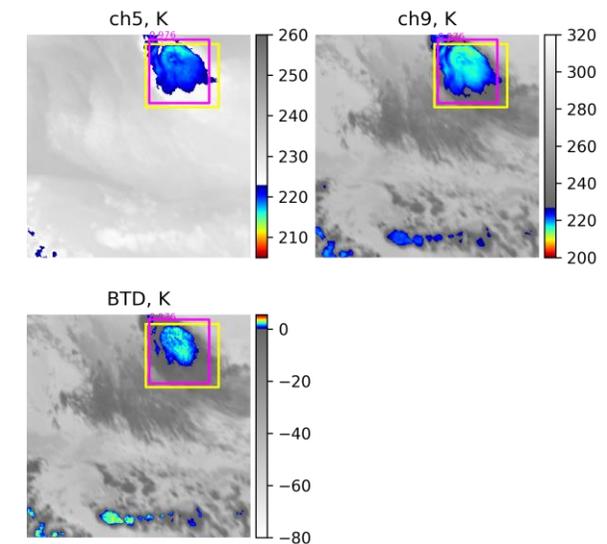


Чернокульский и др., 2021

1. Данные SEVIRI (15 мин), спутники Meteosat. (2010–2020).
Канал 5 – WV 6.2 μm ,
Канал 9 – IR 10.8 μm ,
Их комбинация (btd)
2. GeoAnnotate-assisted: клиент-серверное приложение для разметки событий МКС
3. Разметка снимков (сейчас: 3785 объектов (205 треков), включая 2053 МКК, 328 СЯ)
4. Свёрточная нейронная сеть “RetinaNet” с рядом модификаций
5. Задача: детектирование объектов на изображениях (в том числе оценка вероятности принадлежности к классу МК и фильтрация меток по значению вероятности принадлежности к классу МКС)

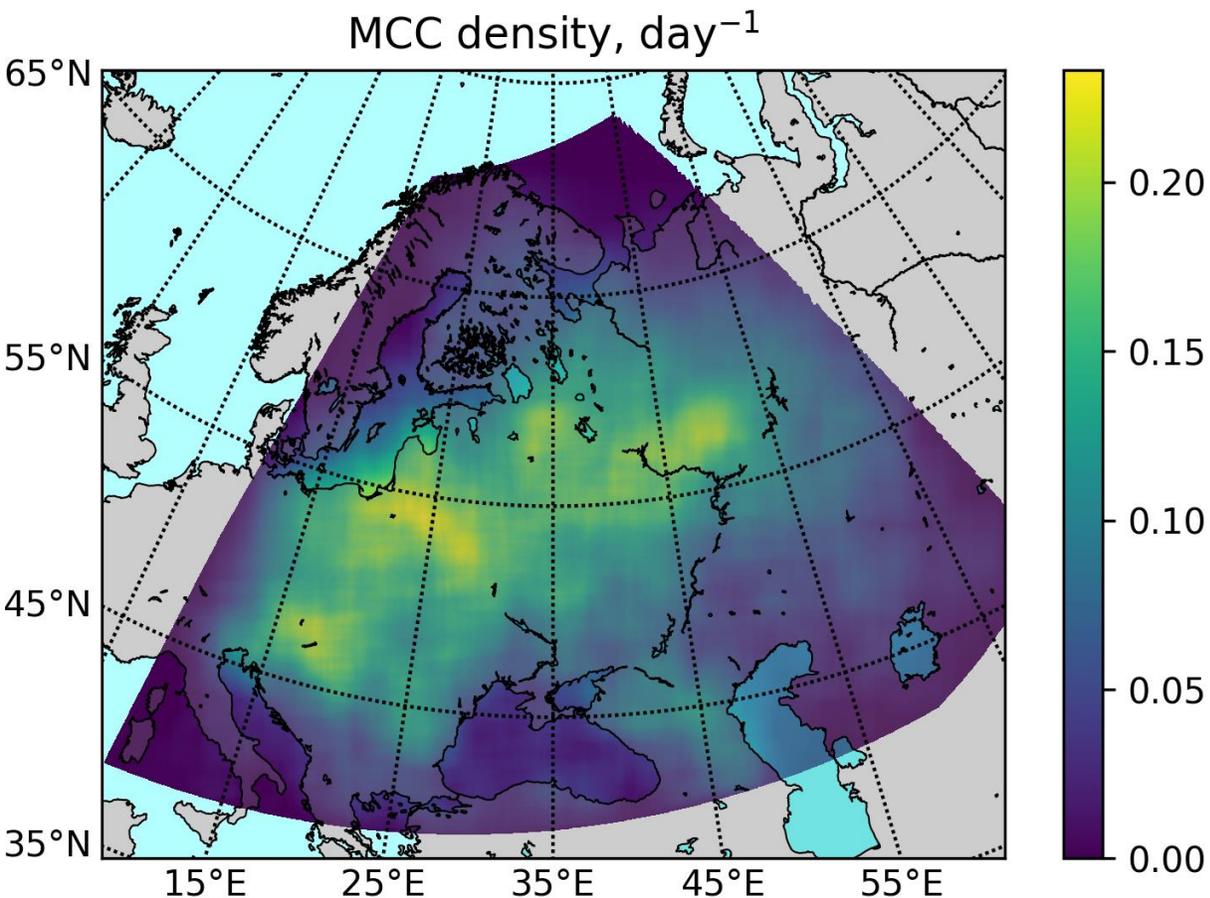


Выделение контуров МКС, обычно совпадает с максимальным градиентом изотерм (РЯТ), чаще всего около 240 К

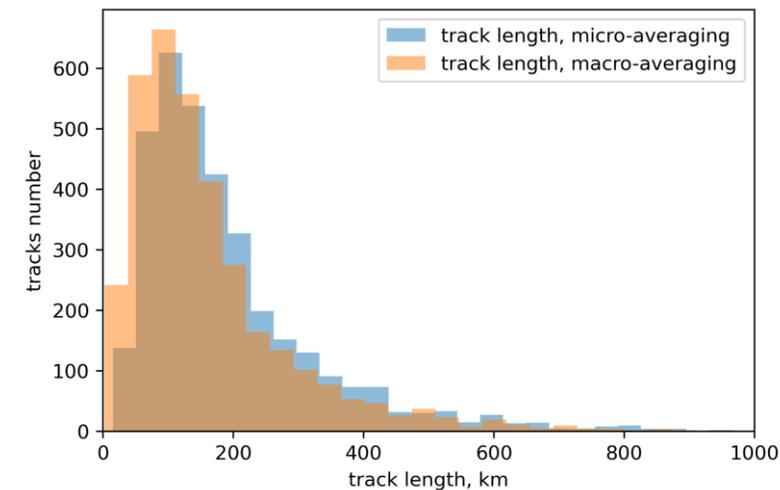


Итоговая статистика: 50716 меток МКС, 3478 треков МКС
май-август, 2010–2020

(в среднем, около 300 МКС формируется над регионом каждый год)



Распределение МКС по длине пути (км)



Сейчас:
формирование выборки линейных МКС

Индексы конвективной неустойчивости

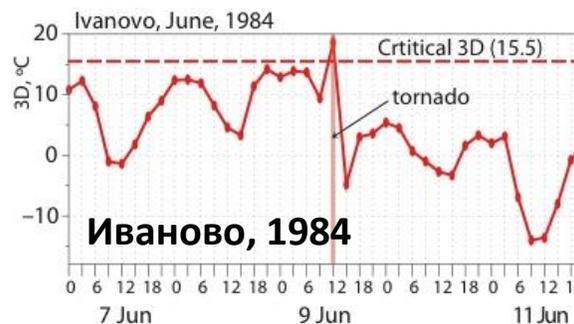
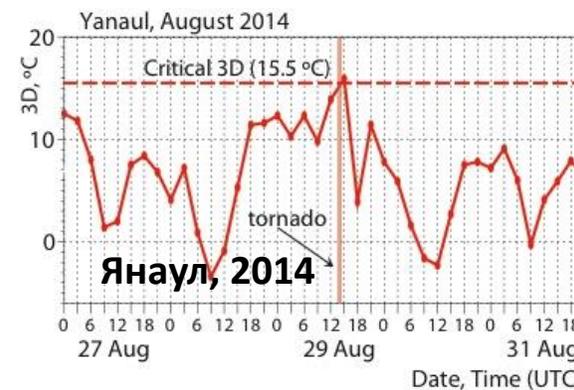
Ингредиентный подход

Выполнение определенных условий – наличие т.н.

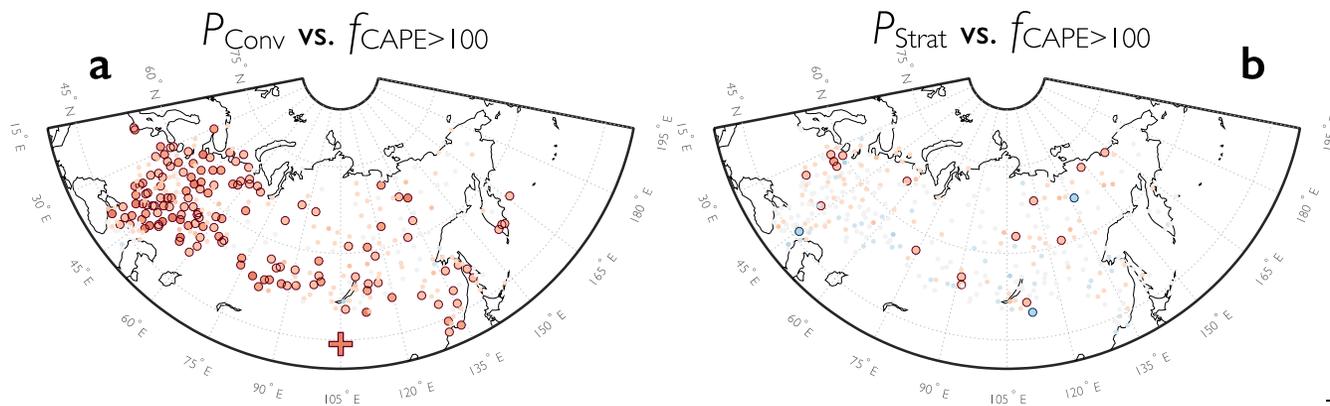
«ингредиентов»:

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

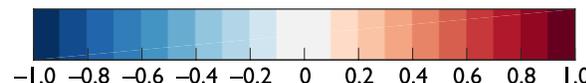
Ингредиенты могут быть представлены в виде индексов (CAPE, SRH, DLS, MLS, LLS, 3D, SWEAT, WMAXSHEAR, etc.)



Значение индекса 3D

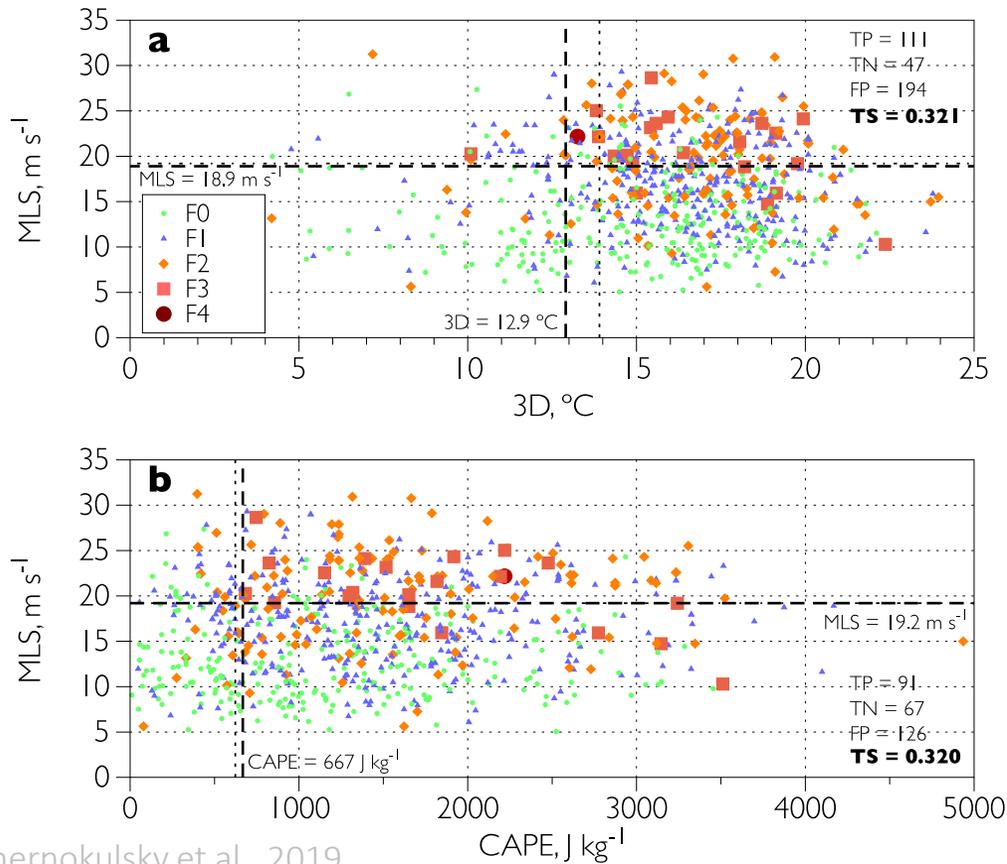


Связь CAPE с осадками

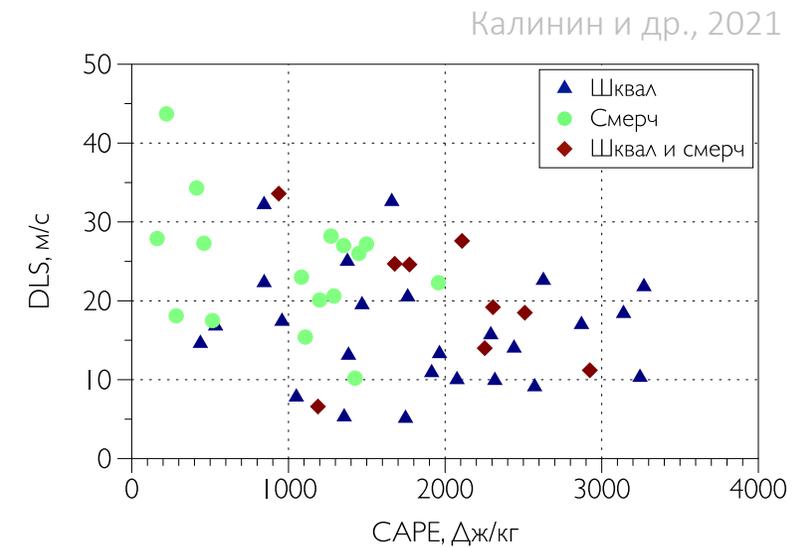


Индексы конвективной неустойчивости

Создана база данных по >50 индексам конвективной неустойчивости (термодинамические, динамические, композитные) по данным радиозондирования, реанализов ERA-Interim и ERA5 (с 1950 г.), моделям CMIP5, модели ГГО

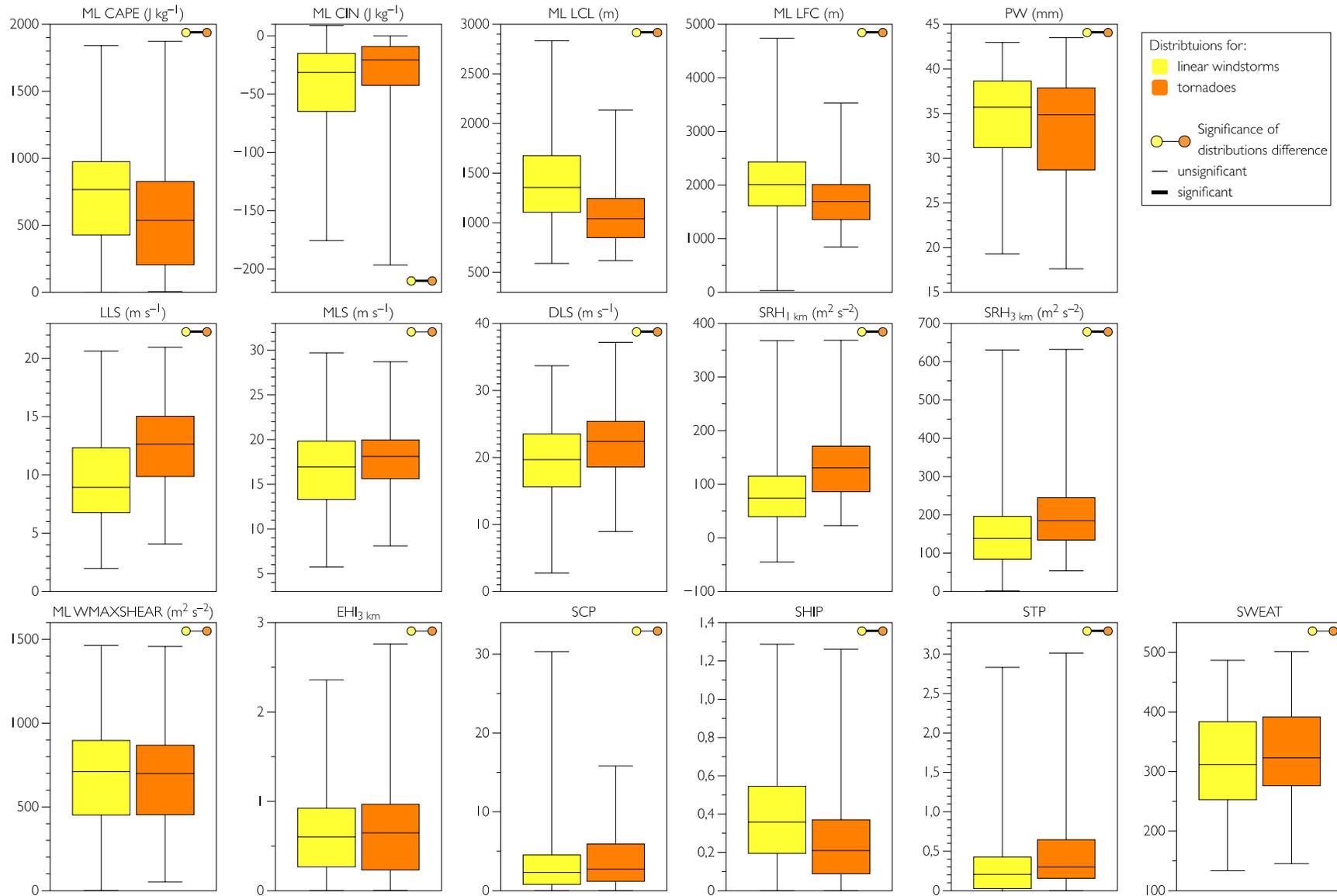


Значения индексов конвективной неустойчивости (по данным ERA-Interim) для различных случаев смерчей в Северной Евразии.



Сильные смерчи и шквалы на ЕТР

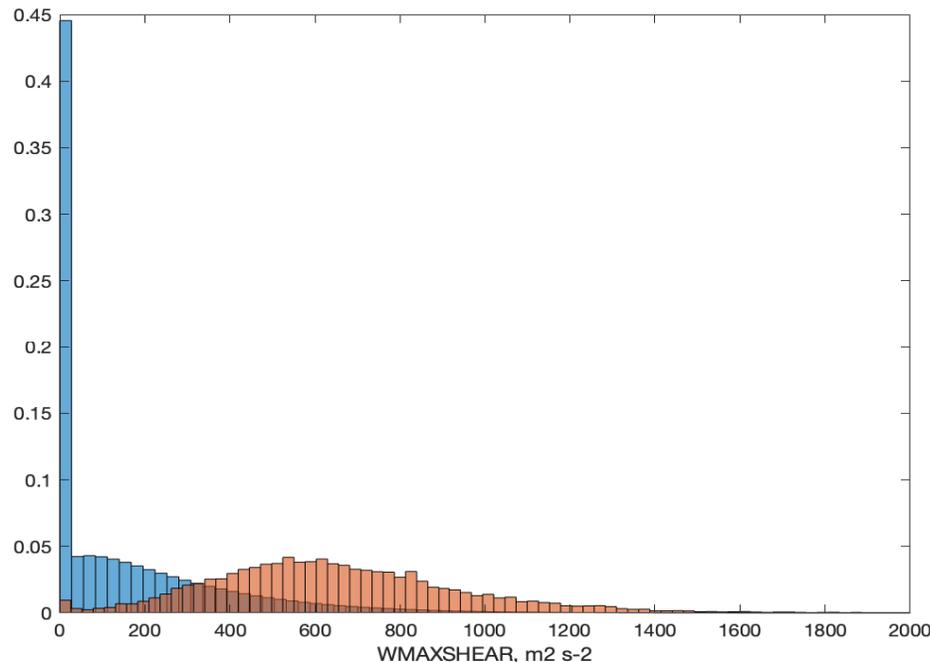
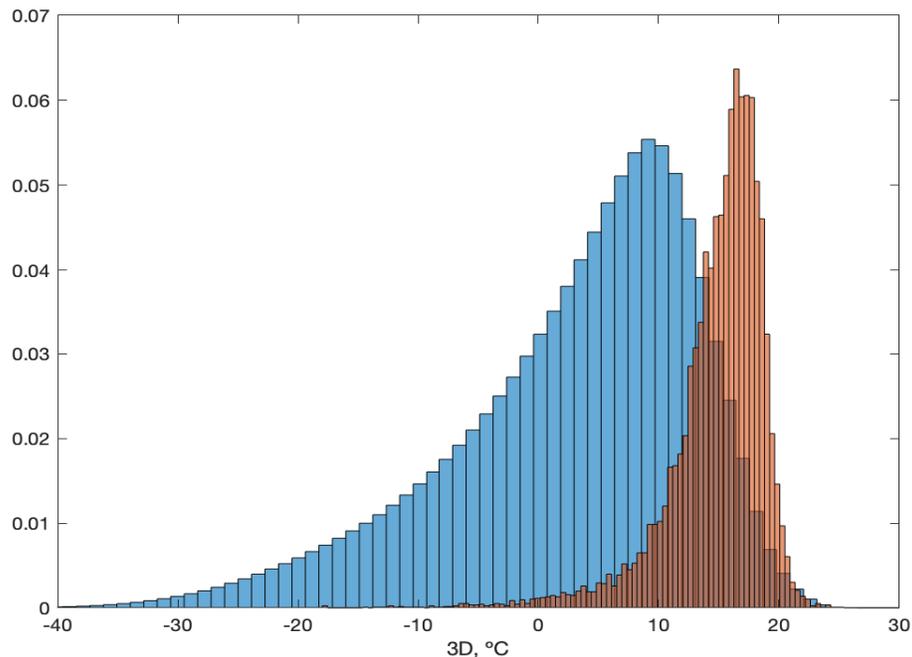
Распределение индексов для смерчей и шквалов



Значения индексов конвективной неустойчивости (по данным ERA5) для различных случаев смерчей и шквалов в Северной Евразии.

Chernokulsky et al., 2023

Распределение индексов для МКС

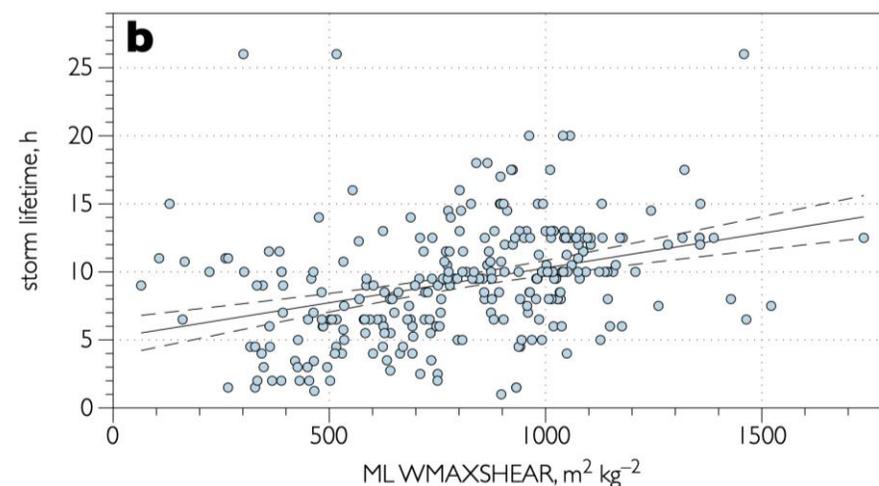


Chernokulsky et al., 2023

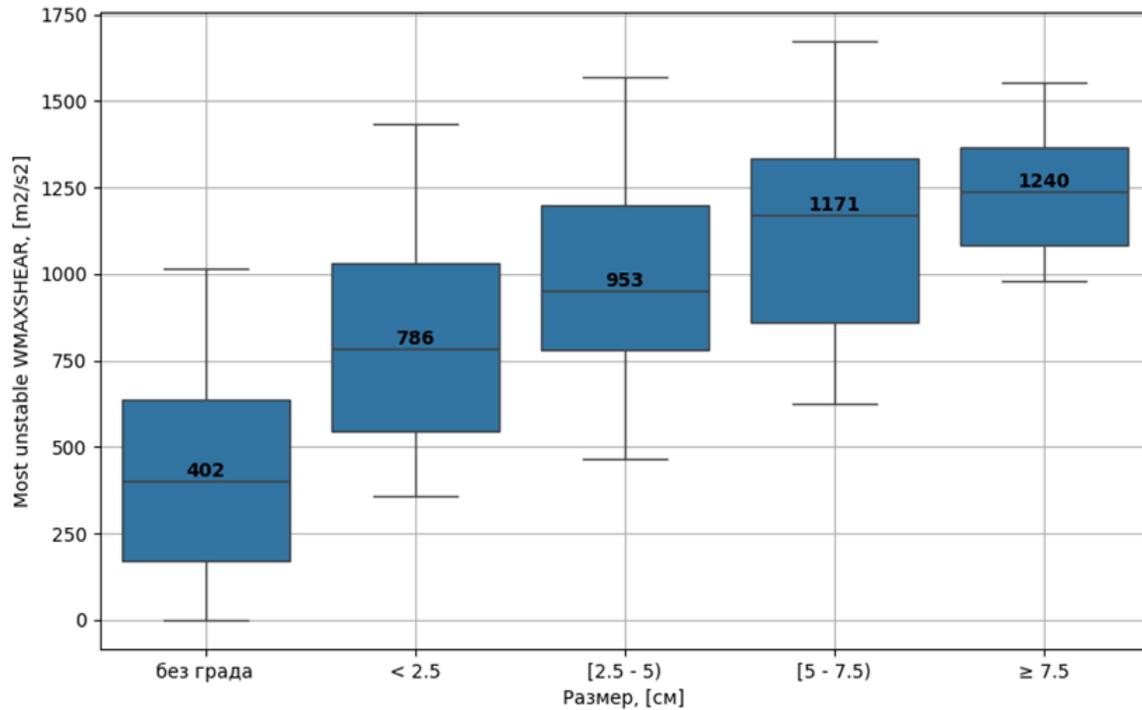
Распределение индексов 3D (слева) и WMAXSHEAR (справа), рассчитанных по данным ERA-5, для событий МКС (красный цвет) и для всех сроков (синий цвет)

$$WMAXSHEAR = DLS * (2CAPE)^{1/2}$$

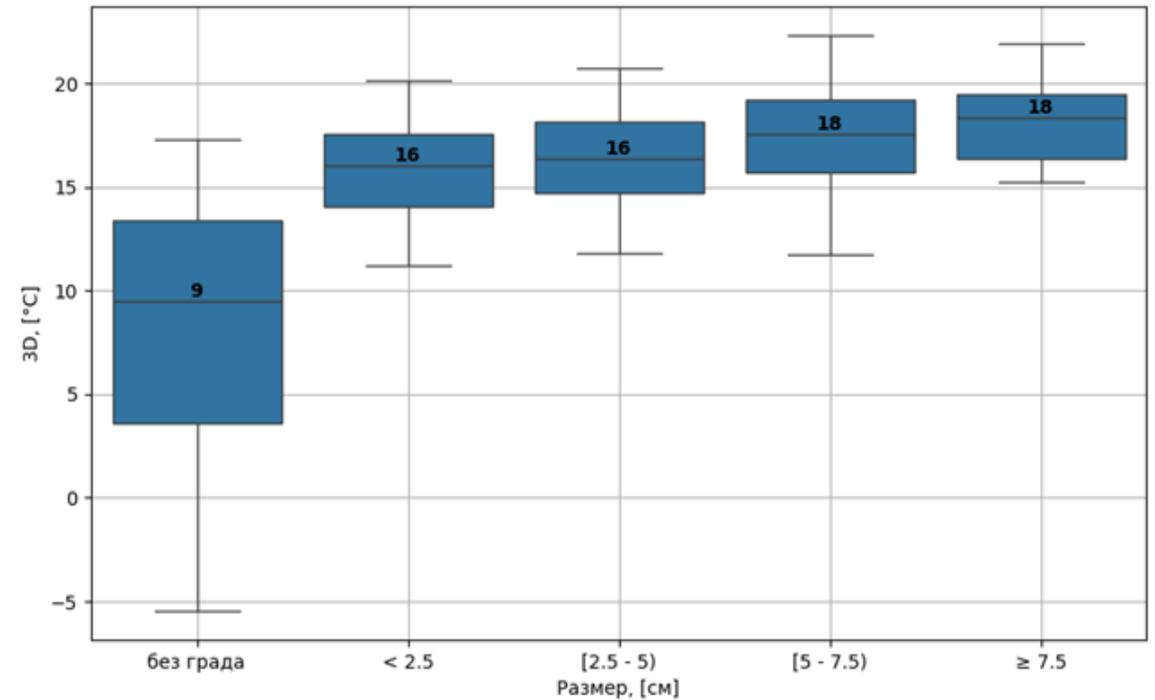
Зависимость времени жизни МКС от значения индекса WMAXSHEAR



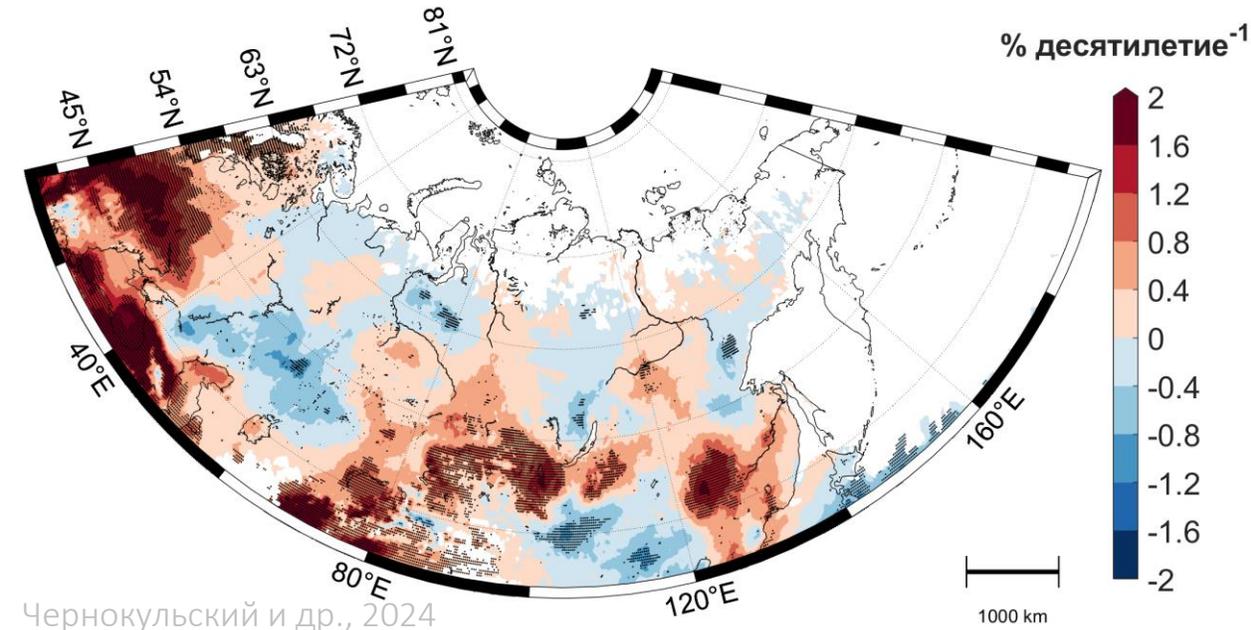
Значения индексов конвективной неустойчивости (по данным ERA5) для града разного размера



WMAXSHEAR

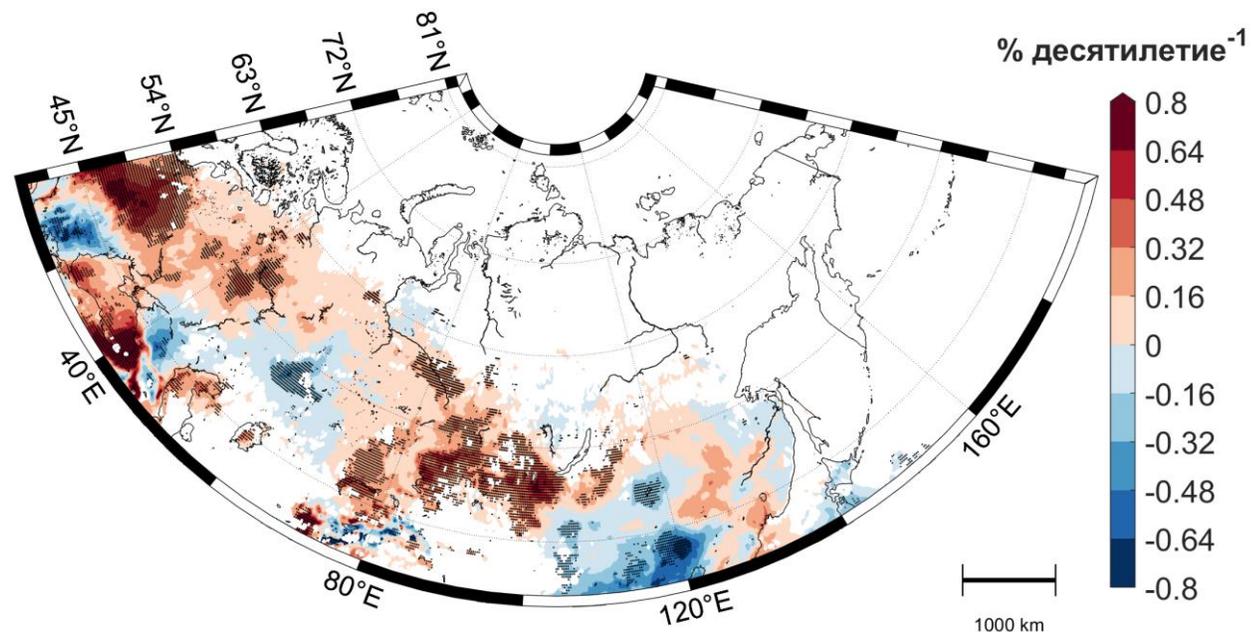


3D

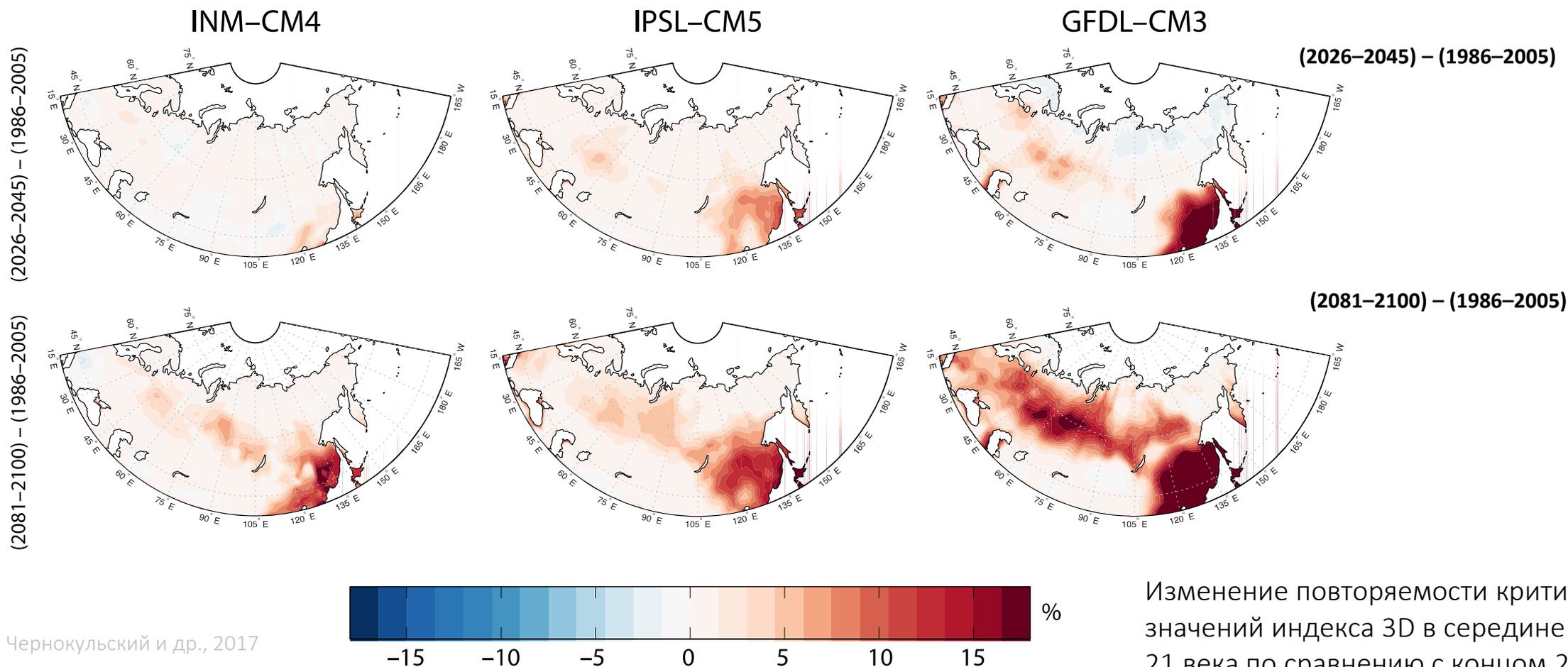


Изменения повторяемости условий умеренной конвекции (критические значения индекса CAPE ($>150 \text{ Дж кг}^{-1}$) в апреле-сентябре за 1958-2020 гг. по данным ERA5)

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



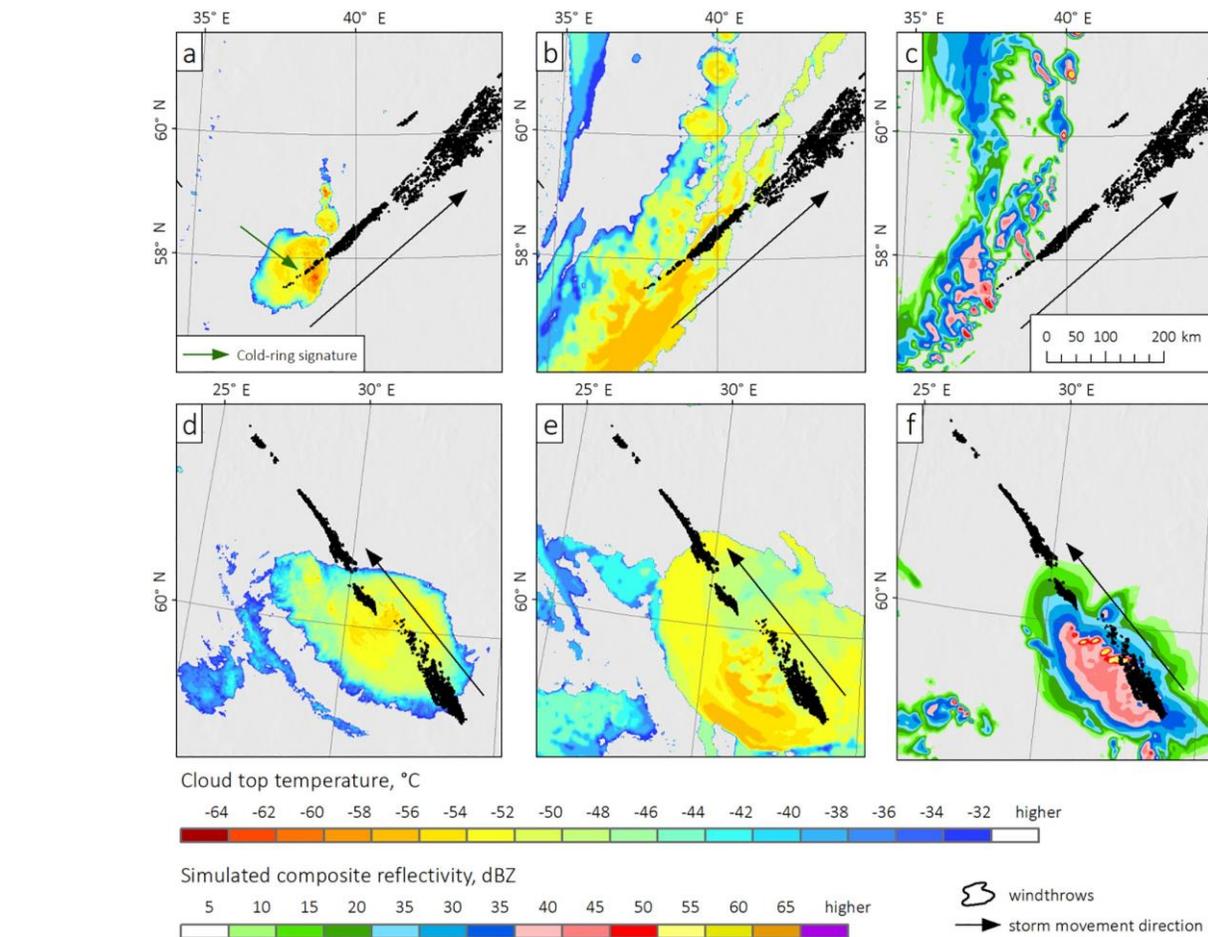
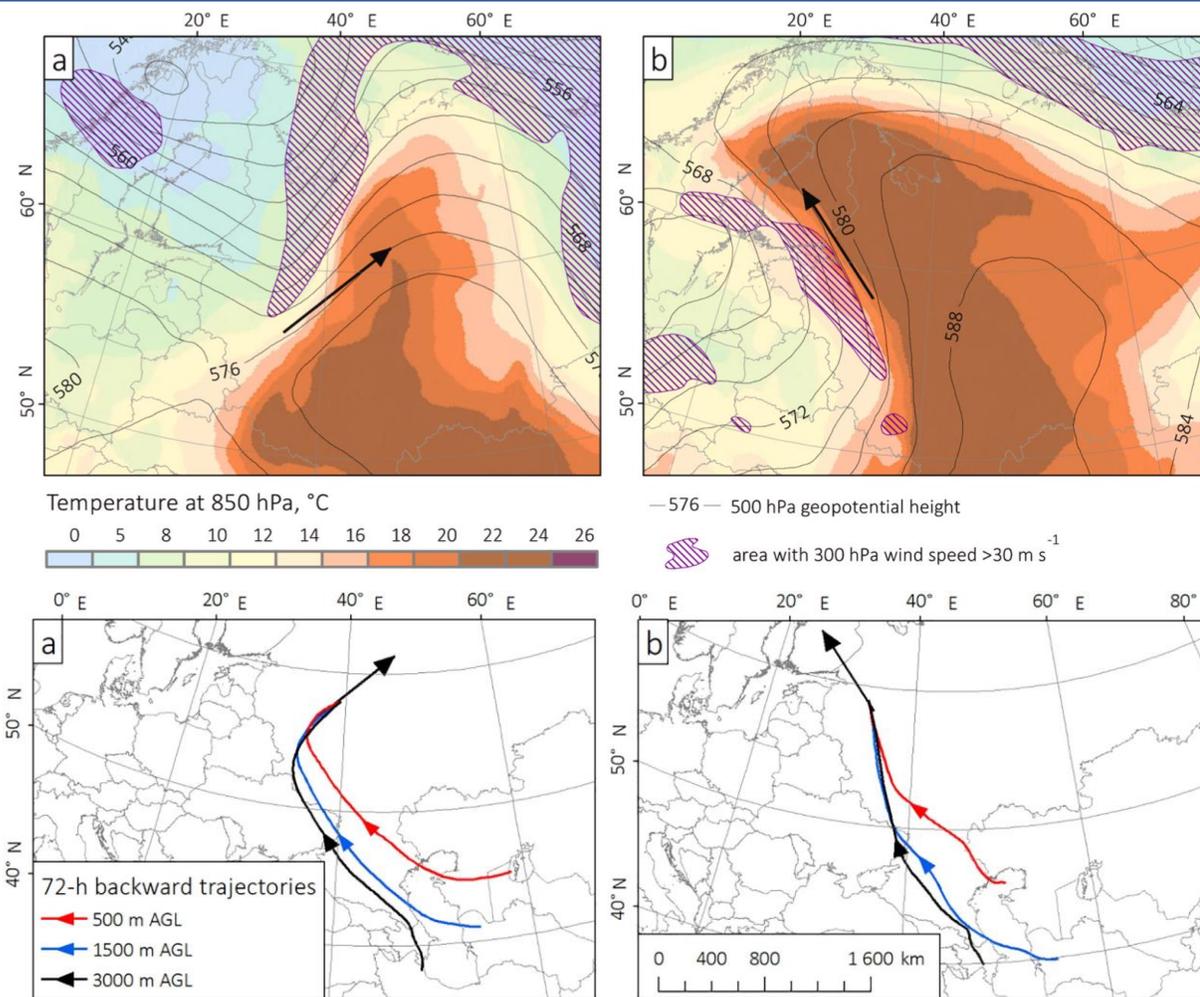
Ожидаемые изменения индексов



Изменение повторяемости критических значений индекса 3D в середине и в конце 21 века по сравнению с концом 20 века при умеренном сценарии RCP-4.5 для различных климатических моделей.

Механизмы изменчивости конвективных явлений

Деречо на ЕТР 27 июня и 29 июля 2010 г.



Chernokulsky et al, 2022

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

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

Роль роста ТПО в росте индексов неустойчивости

Формирование большой доли сильных смерчей на ЕТР происходит при адвекции теплой влажной воздушной массы с морских поверхностей (Средиземное, Черное, Каспийское моря)

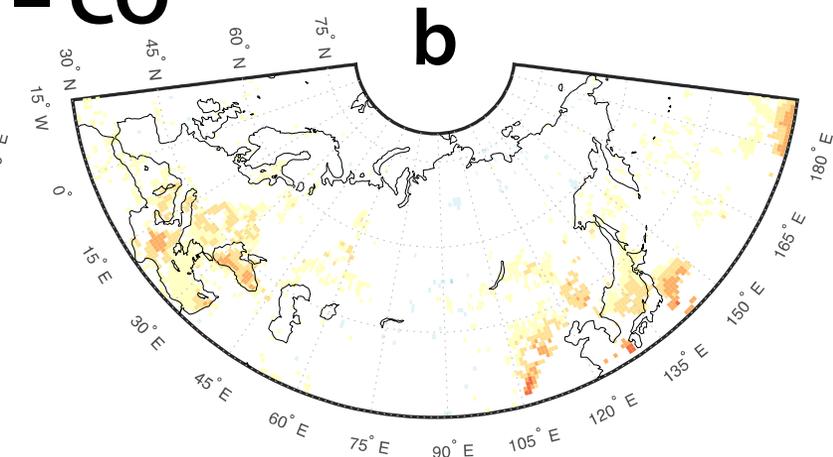
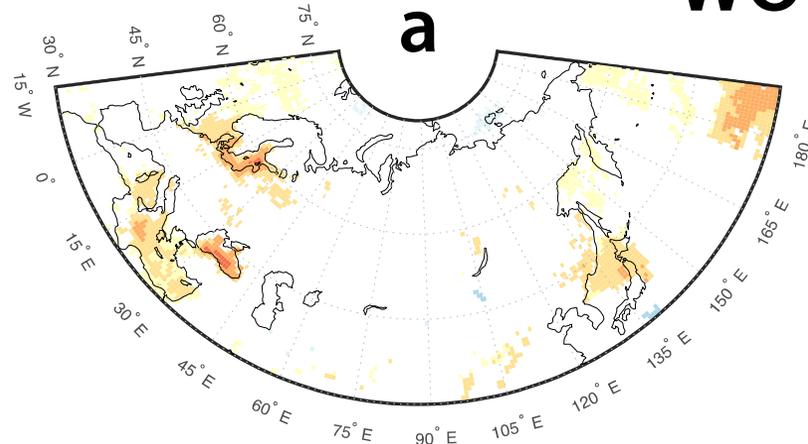


Finch and Bikos, 2012

$$f_{CIN < 50, CAPE > 100}$$

$$f_{CIN < 30, CAPE > 1000}$$

WO – CO

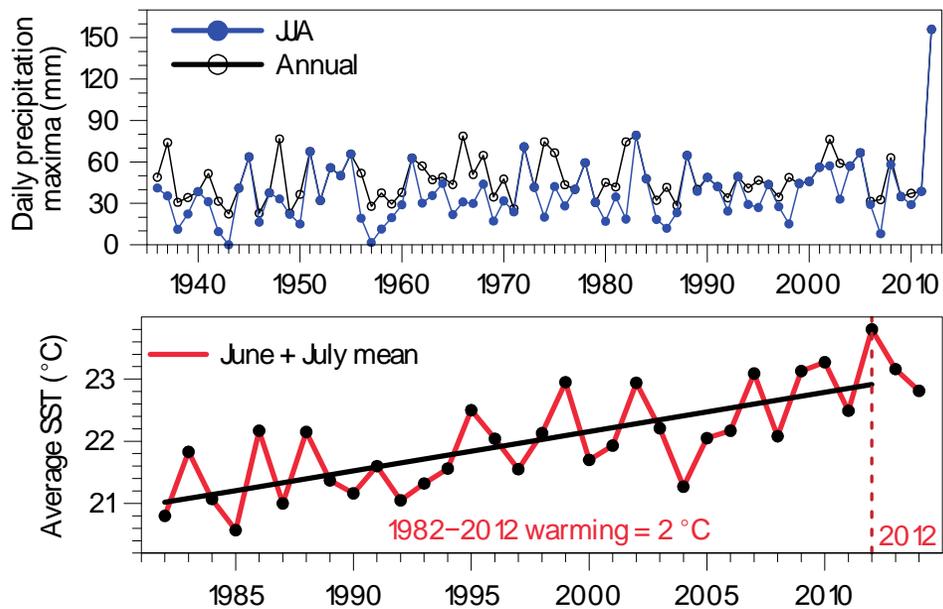


Yarinich et al., 2019

Повторяемость условий с высоким риском образования смерчей: разница между модельными экспериментами (модель ECHAM5) с «теплым» (2000–2012) и «холодным» (1970–1999) океаном.

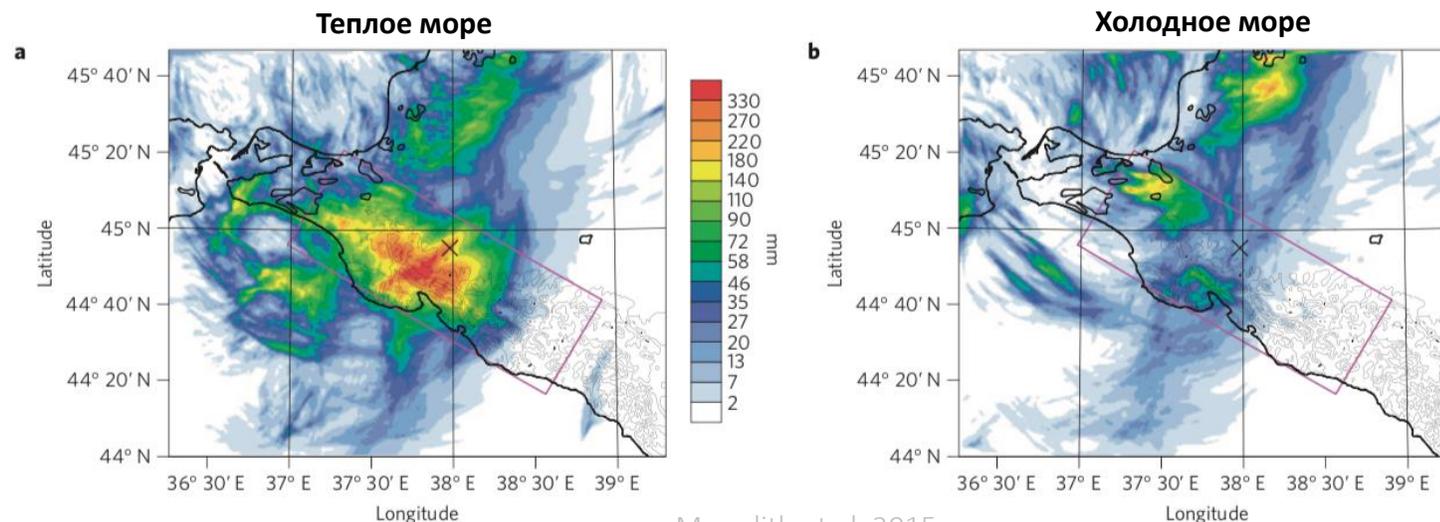
Ливни в Крымске: атрибуция к глоб. потеплению

Крымск, максимальная суточная сумма осадков

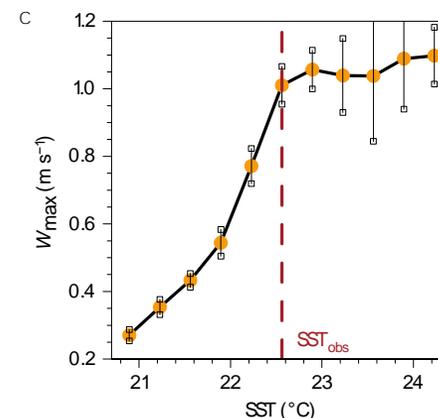
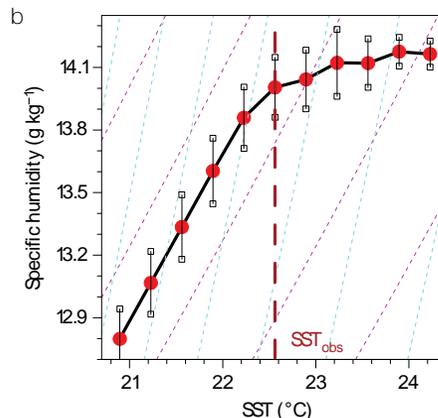
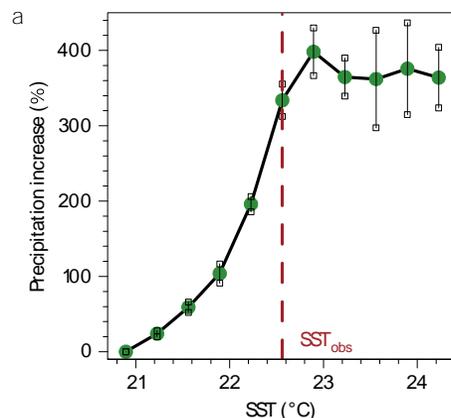


Температура поверхности Черного моря

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

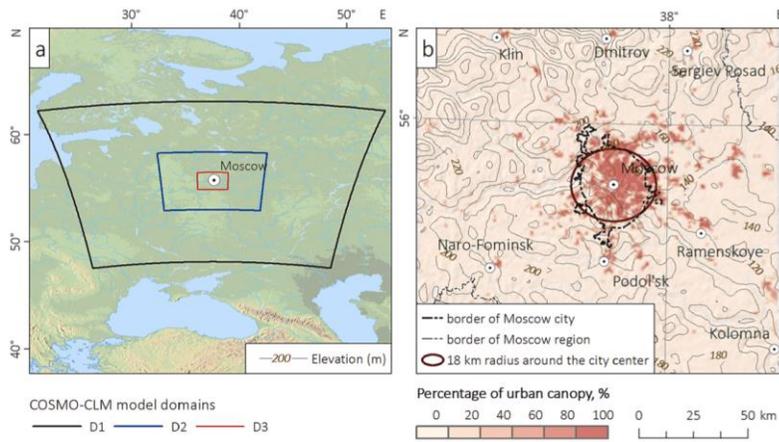


Meredith et al, 2015

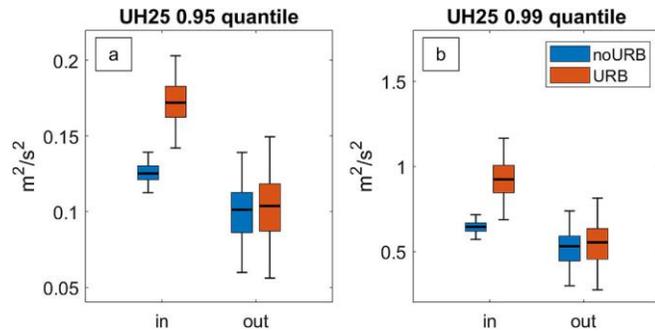


Нелинейность отклика на рост ТПО Черного моря: изменение осадков, удельной влажности, макс. вертикальной скорости

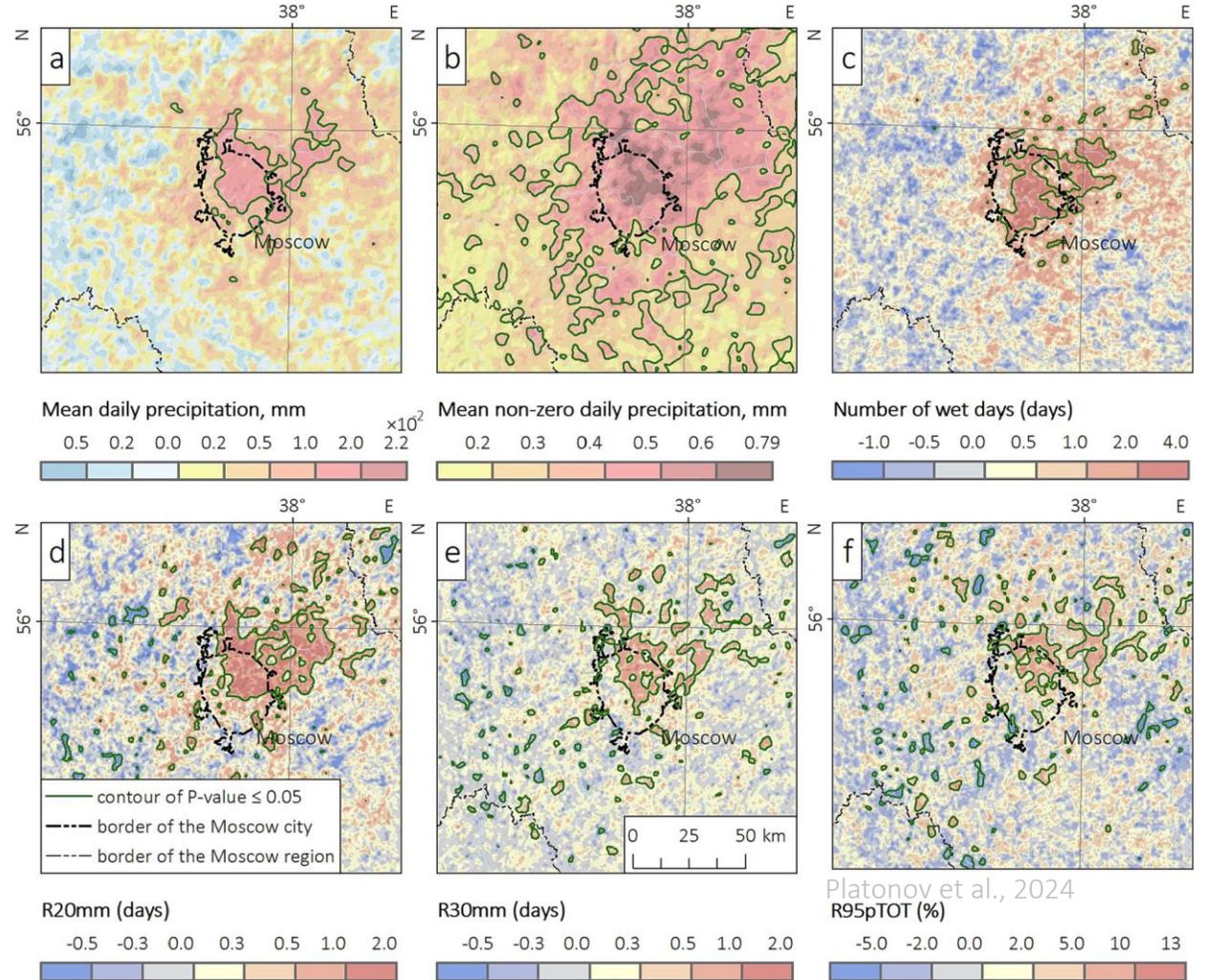
Влияние Москвы на КОЯП: модельные оценки



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

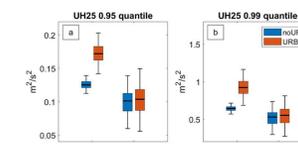
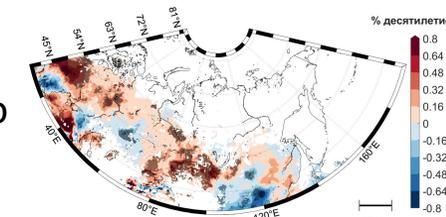
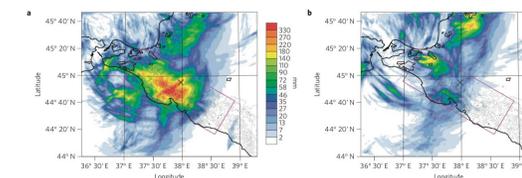
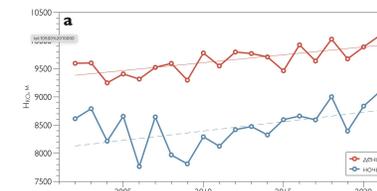
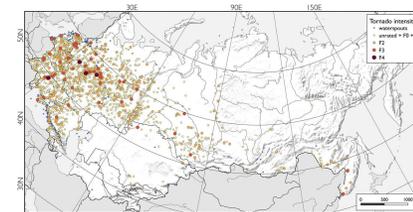


Распределение восходящего потока спиральности (индекс КОЯП)



Разность разных характеристик осадков между экспериментами с городом и без города

- Созданы уникальные базы данных по смерчам (на территории Северной Евразии), сильным ливням (Россия), шквалам (лесная зона России, без ДВ), ветровалам (лесная зона России, без ДВ), индексам конвективной неустойчивости (для территории Северной Евразии).
- 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, 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 (в том числе в Арктике);
- 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!

Alexander Chernokulsky

a.chernokulsky@ifaran.ru