

V Всероссийская конференция
с международным участием
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»

Экстремальные скорости ветра в Атлантическом секторе Арктики: статистика и циркуляционные модели

Ломакин Илья Романович^{1,2}, Кислов Александр Викторович¹

E-mail: ilya.r.lomakin@gmail.com

¹ Географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

² Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации



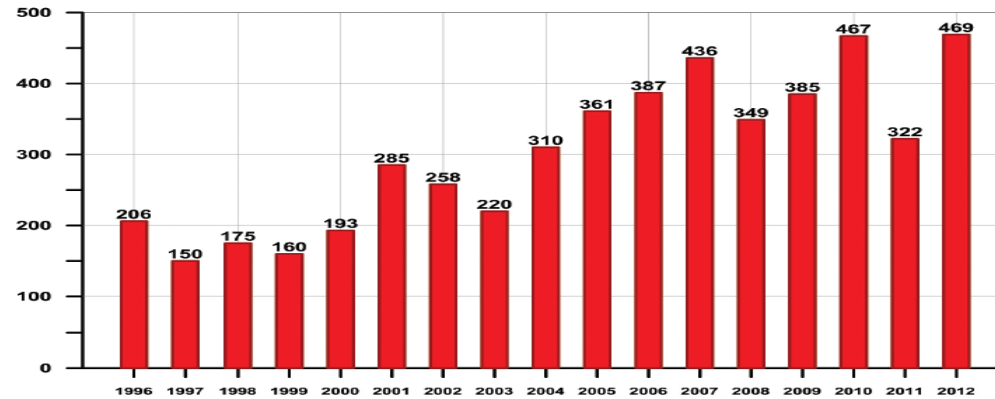
Москва
20 ноября 2024 г.



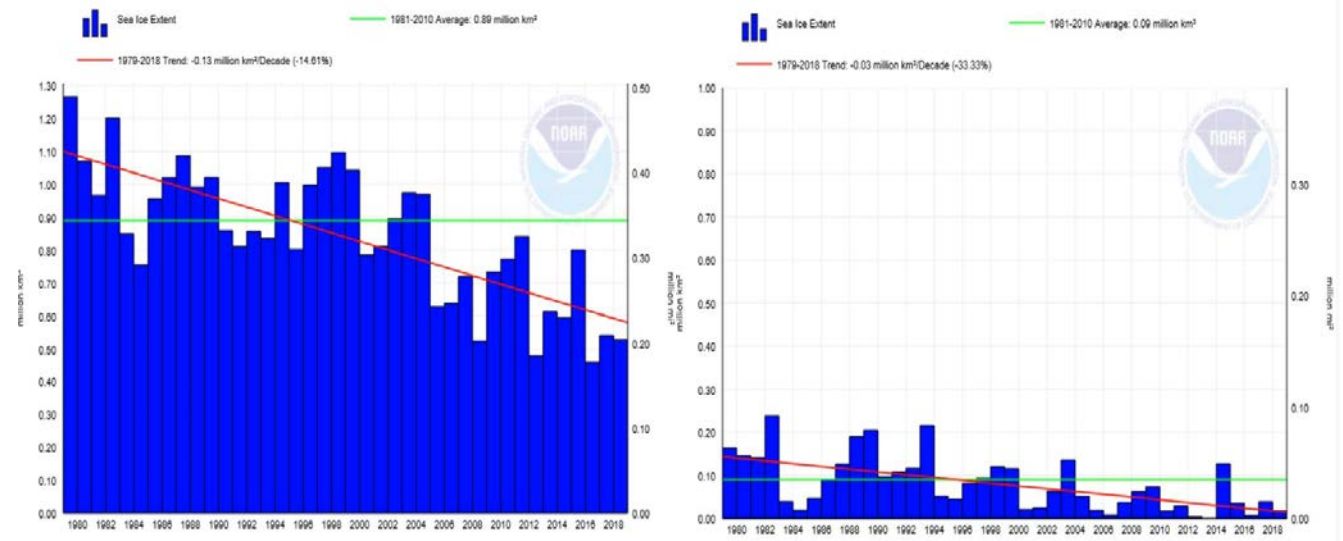
Тематика и актуальность работы

- “Экстремальное метеорологическое явление представляет собой событие, которое <...> наблюдается столь же редко или еще реже, чем 10-й или 90-й процентиль функции распределения вероятности, оцениваемой по данным наблюдений” [IPCC]

- Понятие «опасного явления погоды»: для побережья морей и в горных районах – при порывах скорости ветра 35 м/с или средней скорости не менее 30 м/с. [Наставление..., 2019]



Количество опасных погодных явлений на территории России с 1996 по 2012 г. [Росгидромет]
Тренд последних десятилетий сохраняется



Тренд площади льда в Баренцевом море с 1981 по 2018 г. [NOAA]

Цели и задачи

Исследование режима и происхождения экстремальных скоростей ветра над Атлантическим сектором Арктики в современном климате (1979–2023)

- Исследование и сопоставление режима экстремальных скоростей ветра в холодный сезон (ноябрь-март) по данным реанализов с различным пространственным разрешением и спутниковых данных
- Построение эмпирической функции распределения вероятностей (ФРВ) и сопоставление её с теоретической моделью с целью определения степени применимости последней к самым крупным экстремальным величинам
- Создание календарей экстремальных скоростей ветра в Баренцевом море (составление списка событий с соответствующими им датами) на основе всех рассмотренных источников данных, исследование синоптических ситуаций, при которых наблюдались эти события, и проверка гипотезы, наблюдались ли в этих случаях полярные мезомасштабные циклоны (ПМЦ).

Данные и методы. Функция распределения вероятностей

Основу классической статистической теории экстремумов составляет определение функции распределения вероятностей (ФРВ) экстремальных значений

- В настоящей работе использовано распределение Вейбулла:

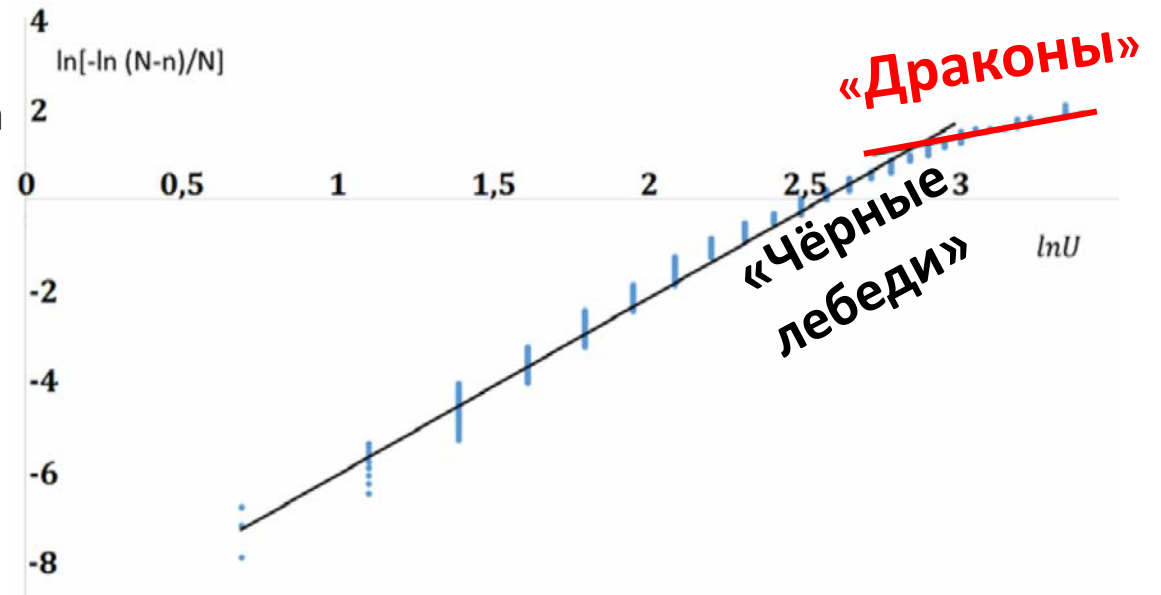
$$\frac{n}{N} \approx F(U) = 1 - \exp(-AU^k)$$

накопленная повторяемость вероятность модуль скорости ветра параметры распределения

- Удобно представление в специальных координатах:

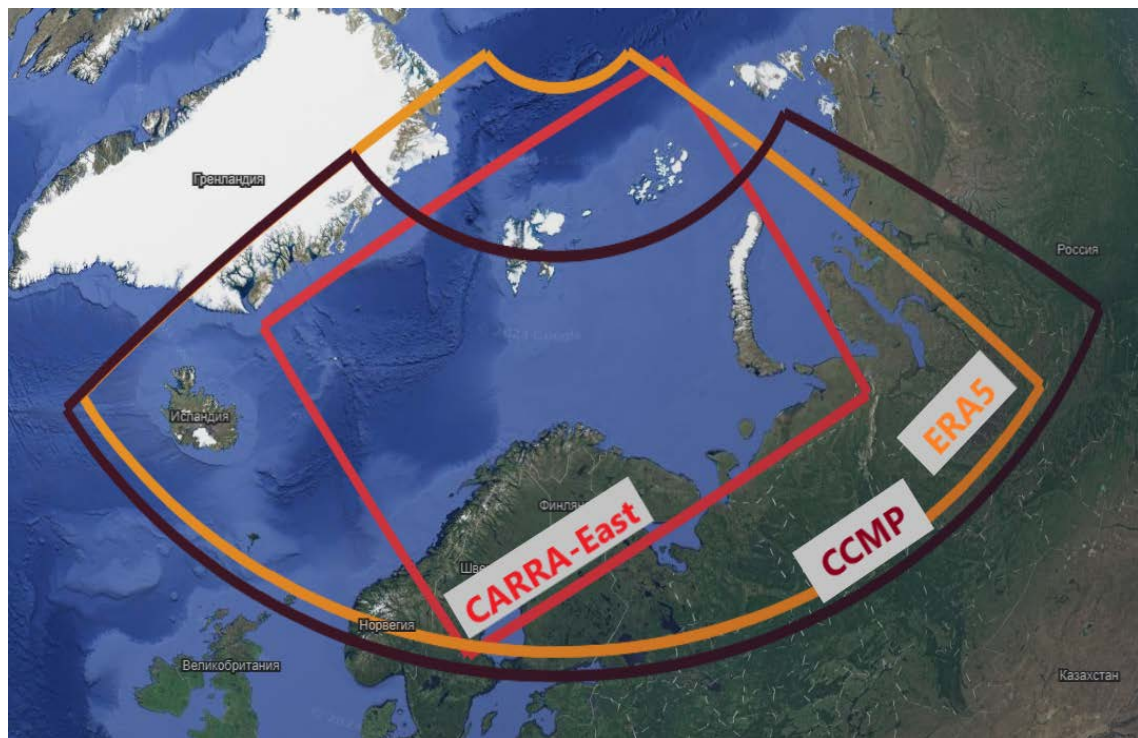
$$\ln[-\ln(1 - F(U))] = k \ln(U) + \ln(A)$$

- Принцип *iid* – *independent and identical distribution*
- Концепция «чёрных лебедей» и «драконов» [Taleb, 2010; Sornette, 2009]



Сопоставление функции распределения повторяемостей экстремумов модуля скорости ветра с моделью распределения Вейбулла (в специальных координатах) (по данным станции Марресале (Западный Ямал) за период 1936-2013 гг. [Кислов и др., 2015])

Данные и методы. Источники данных



- Отбор максимального за 2 суток значения (метод независимых штормов) – «просеивание» ряда
- Ранжирование ряда
- Исключение «искусственных» интервалов

	CCMP v3.1 [Meers et al., 2022]	CARRA-East [Yang et al., 2020]	ERA5 [Hersbach et al., 2020]
	Спутниковый архив	Реанализ	
Шаг сетки	0,25° x 0,25° ~ 31 x 31 км	2,5 x 2,5 км	0,25° x 0,25° ~ 31 x 31 км
Кол-во узлов сетки	482 x 75 = 36150	989 x 789 = 780321	441 x 101 = 44541
Шаг по времени	6 ч	3 ч	1 ч
Ряд данных	Холодный период (ноябрь-март)		
	1993/1994-2022/2023 29 лет	1990/1991-2022/2023 32 года	1979/1980-2022/2023 43 года
Кол-во событий	2293	2476	3352

Данные и методы. Анализ «сверхмощных» событий

- Создание календаря экстремумов скорости ветра – **более 300 событий** по данным ERA5 за период 1979-2023 гг., соответствующих $p>0,999$

- Анализ синоптической ситуации – синоптические карты с фронтальным анализом Немецкой службы погоды (DWD)

- Построение карт полей скорости ветра и атмосферного давления по данным реанализов ERA5 и CARRA на уровне моря для каждого события с шагом в 3 часа

- Происхождение экстремумов в акватории Баренцева моря – **поиск полярных мезомасштабных циклонов (ПМЦ)** из глобальной климатологии [Stoll et al., 2022]

Дата	Кол-во узлов ERA5	V_{max} м/с	MSLP, мин в циклоне, гПа	Комментарий	Карта
05.02.1981	2	26	945	Циклон у берега Норвегии, максимум к Ю от центра	
17.02.1981	108	23	970	Циклон в Гренландском море, максимум к ЮВ от центра	
21.02.1981	63	24	975	Циклон в Баренцевом море, двигался на СВ, максимум к Ю от центра, также высокие скорости к 3 от центра на начальной стадии	

Фрагмент календаря экстремумов скорости ветра за период 1979-2023 гг. по данным реанализа ERA5 для Атлантического сектора Арктики

Физические модели экстремумов

- Синоптически обусловленные ветры
- Местные ветры

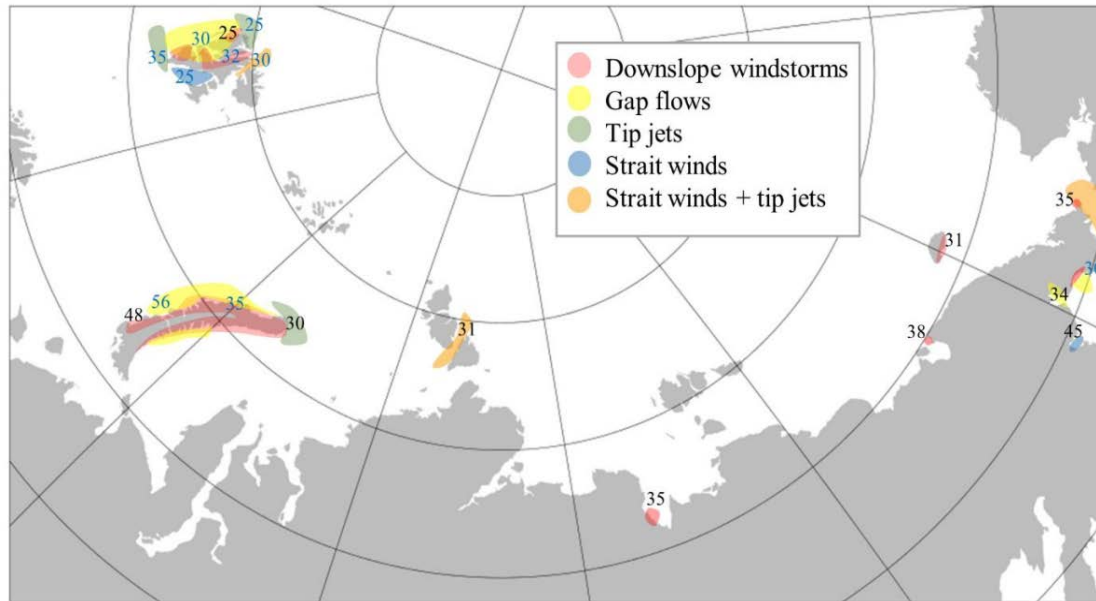
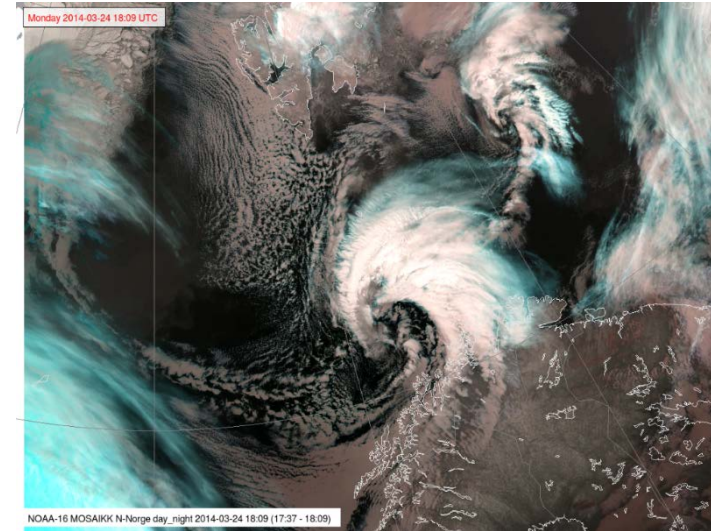


Схема местных ветров,
наблюдаемых в Российской Арктике.

Числа указывают максимальную скорость ветра (м/с)
по данным станционных наблюдений (чёрный цвет)
или спутниковым и модельным данным (синий цвет)

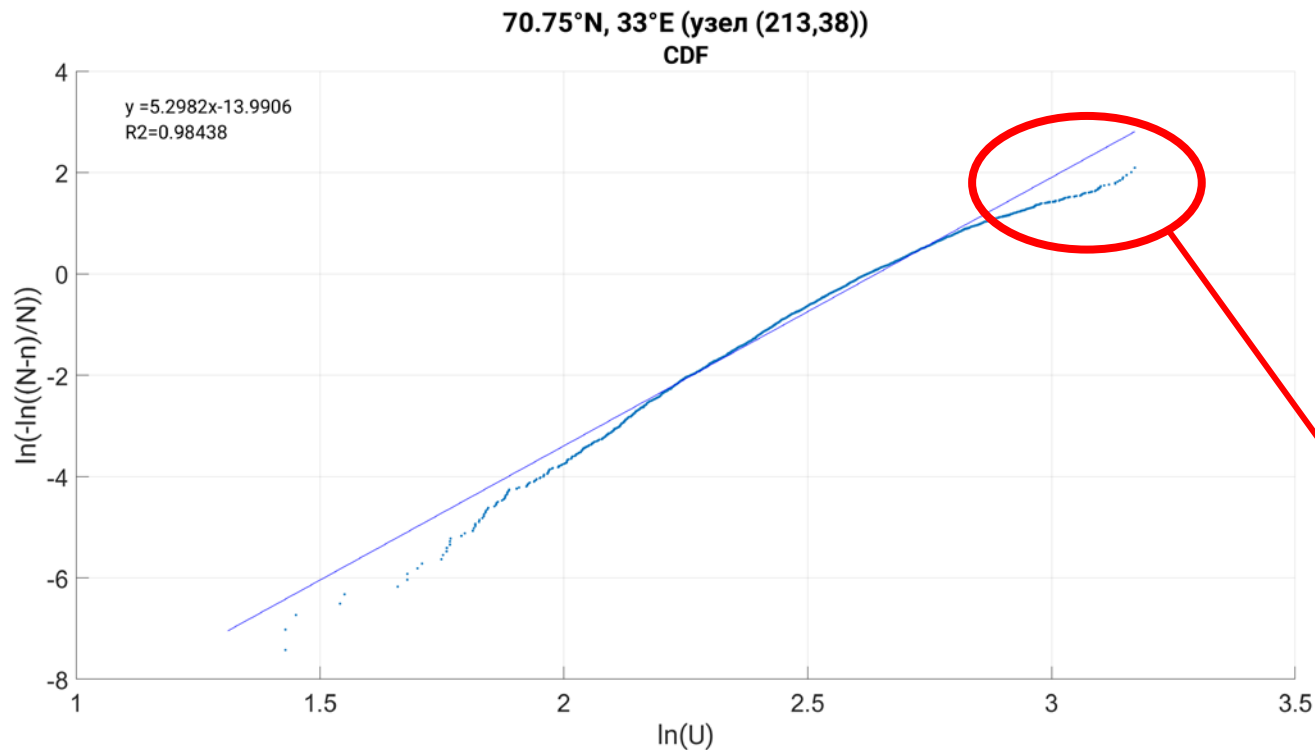
[Shestakova, Repina, 2019]

- Полярные мезоциклоны



MET-Norway/NOAA; [Mallet, 2014]; [Orimolade et al., 2018]

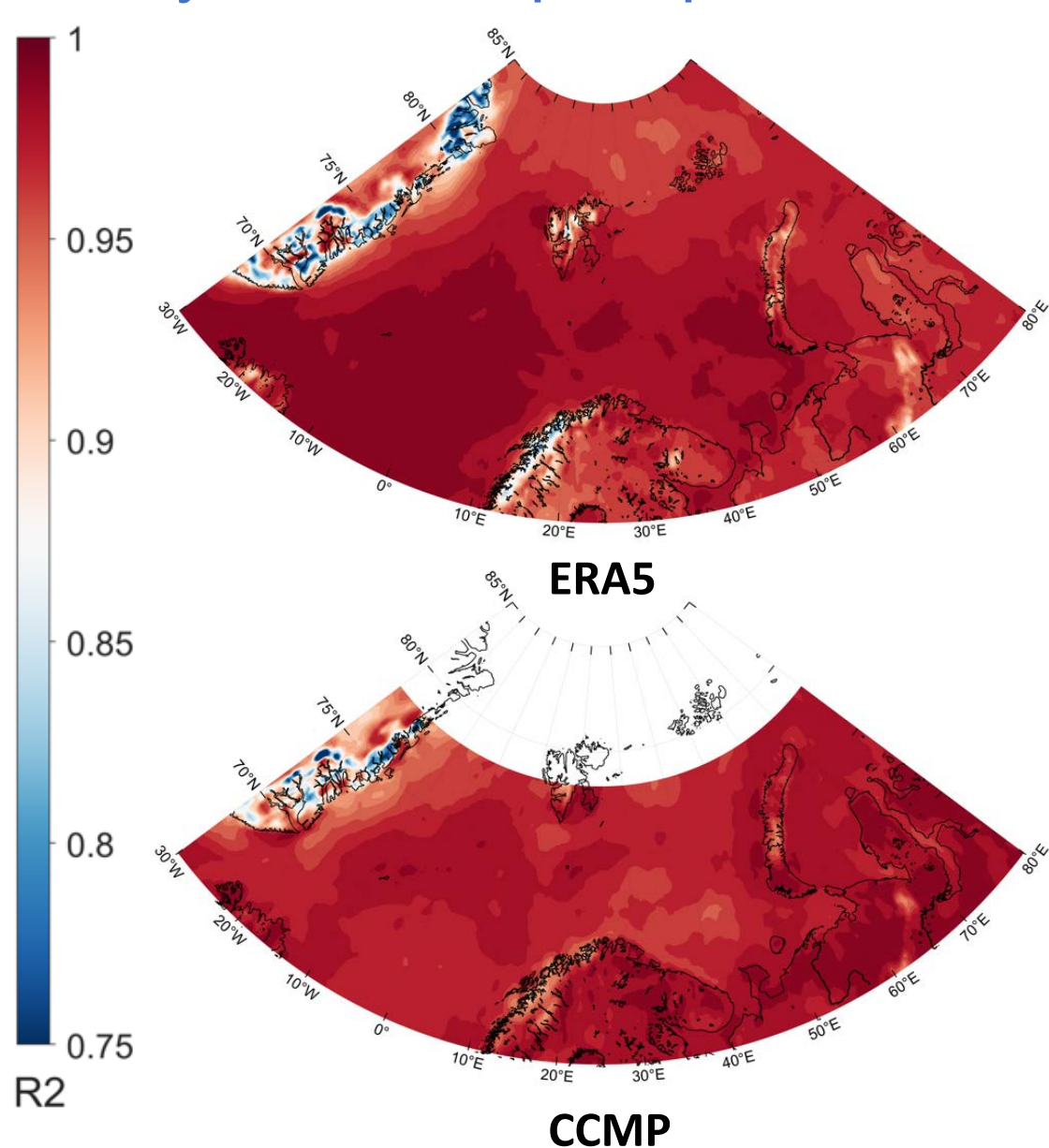
Вейбулловское распределение. «Драконы»



Сопоставление функции распределения повторяемостей экстремумов модуля скорости ветра с моделью Вейбулловского распределения (в специальных координатах) по данным реанализа ERA5 для 70,75° с.ш., 33° в.д.

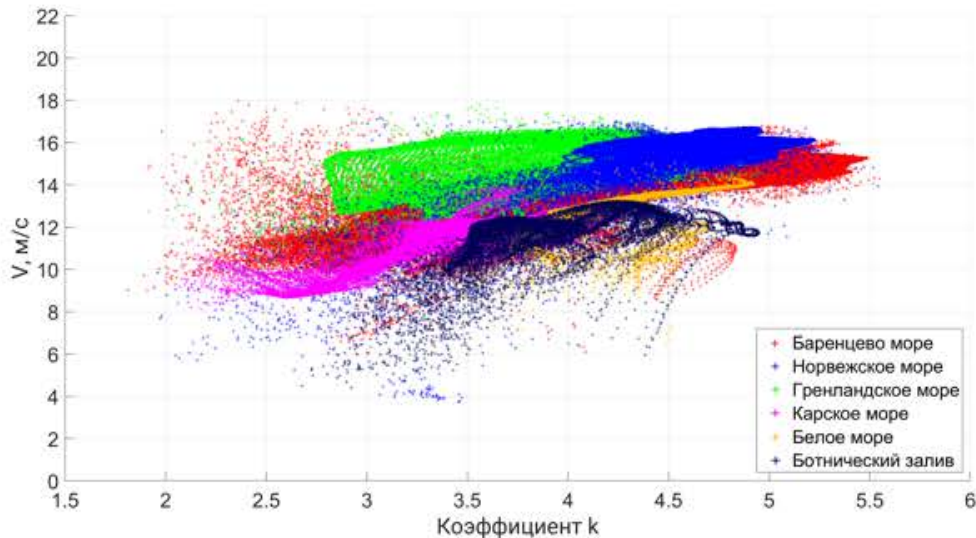
- Коэффициент детерминации $R^2=0,98$ для узла 70,75° с.ш., 33° в.д.
- Типичная картина отчётливого отклонения «хвоста» распределения от прямой аппроксимации по данным реанализа (и других источников) – «драконы»
- Для массы других узлов автоматическое выделение «драконов» остаётся проблематичным

Вейбулловское распределение. Коэффициент детерминации

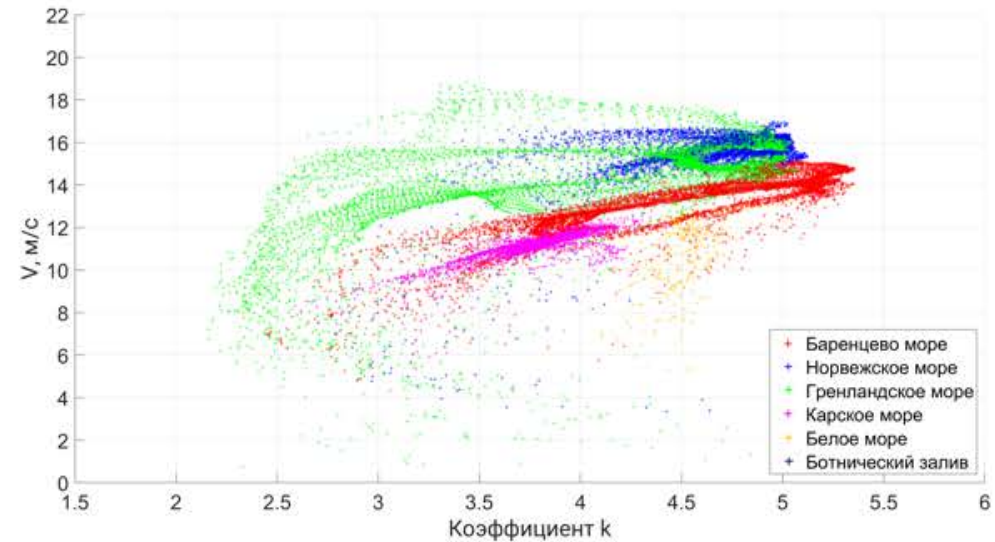


- Для акватории Баренцева моря среднее значение коэффициента R^2 для всех источников составляет 0,97-0,98
- Более низкие значения во всех источниках над сушей, в особенности в областях со сложным рельефом и изрезанной береговой линией севера Скандинавии, о. Шпицберген и Новая Земля, наиболее низкие – на восточном побережье Гренландии

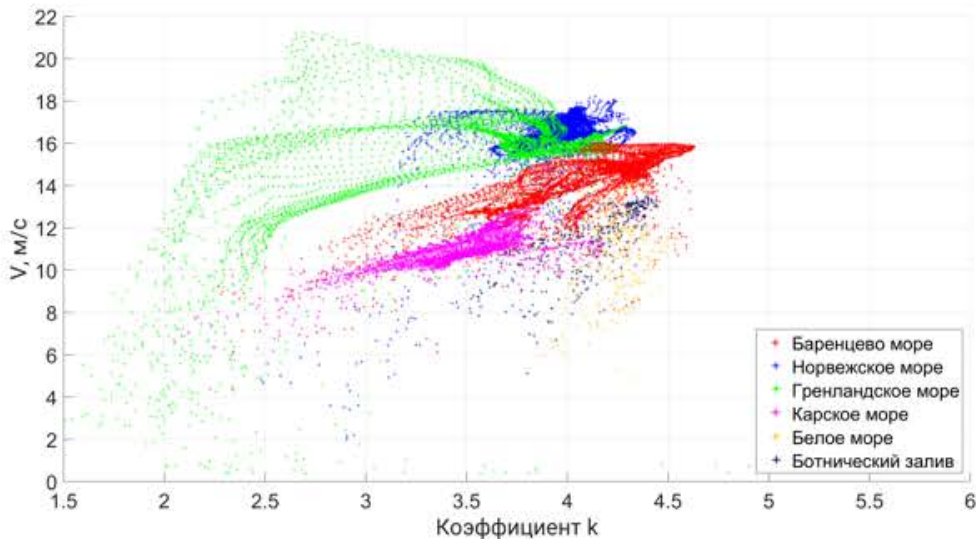
Вейбулловское распределение. Параметры



CARRA – более 780 тыс. узлов



ERA5 – более 44 тыс. узлов



CSMP – более 36 тыс. узлов

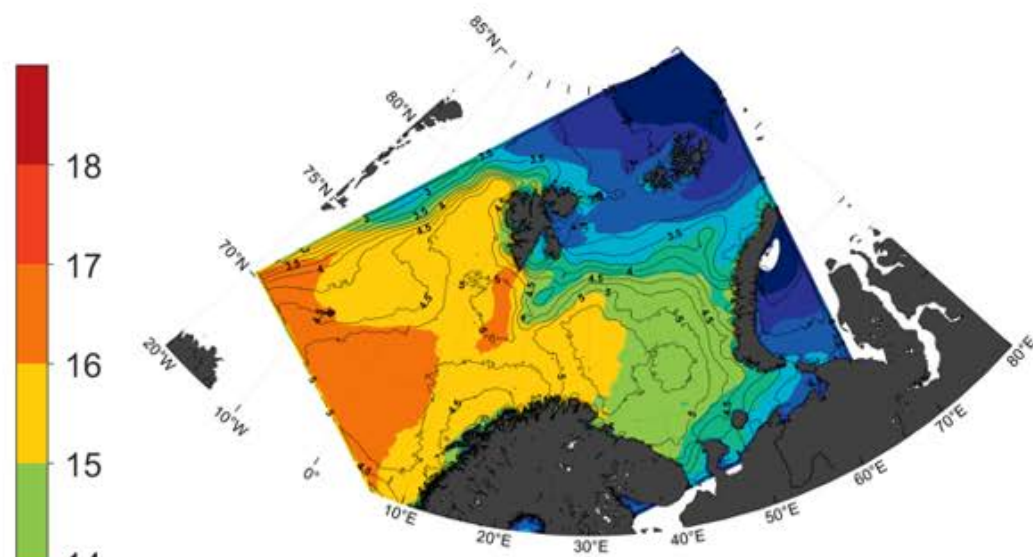
$$F(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U}{V} \right)^k \right]$$

— по оси абсцисс k

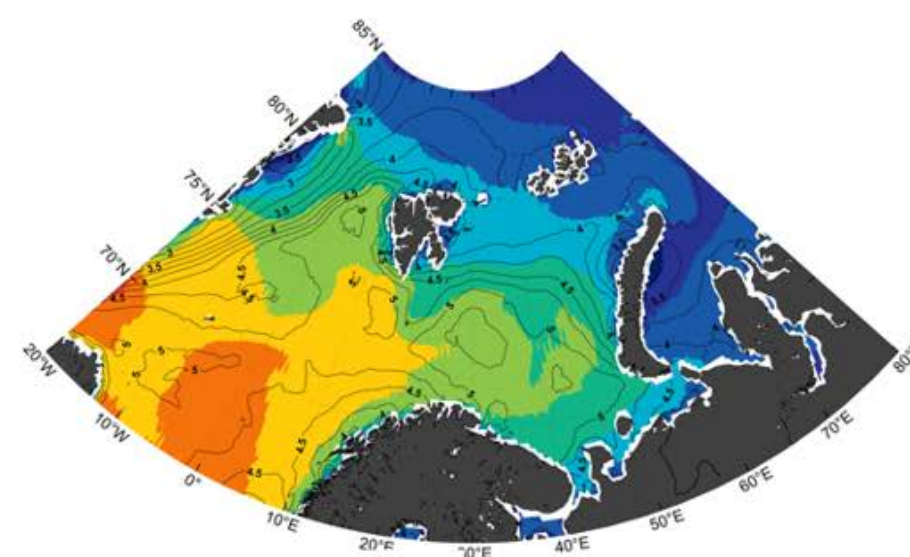
— по оси ординат V

- Хорошее согласие со стационарными данными на суше
- Близкая между источниками данных географическая картина различий между морями
- 2-3 «ветви» значений для Баренцева и Гренландского морей по данным ERA5 и CSMP

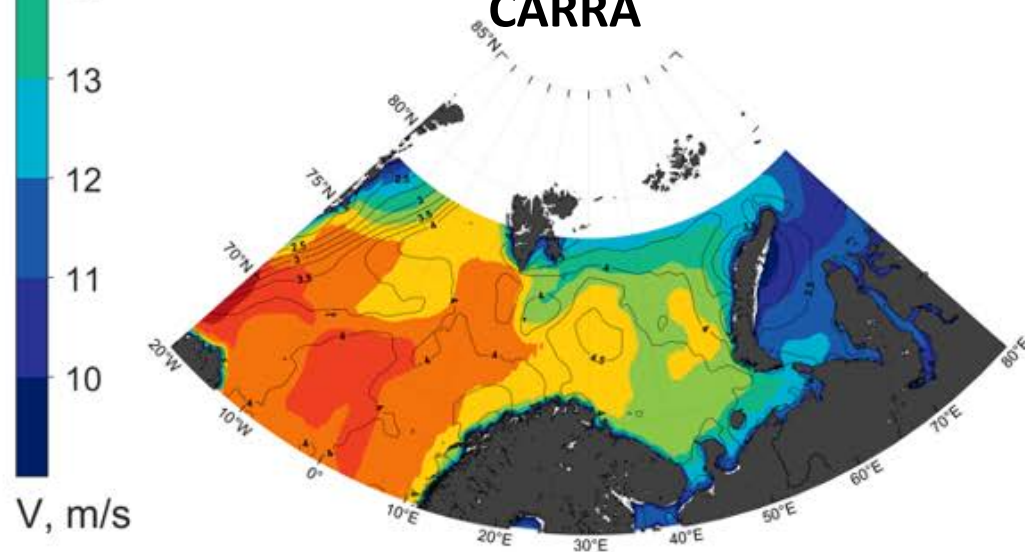
Вейбулловское распределение. Параметры



CARRA



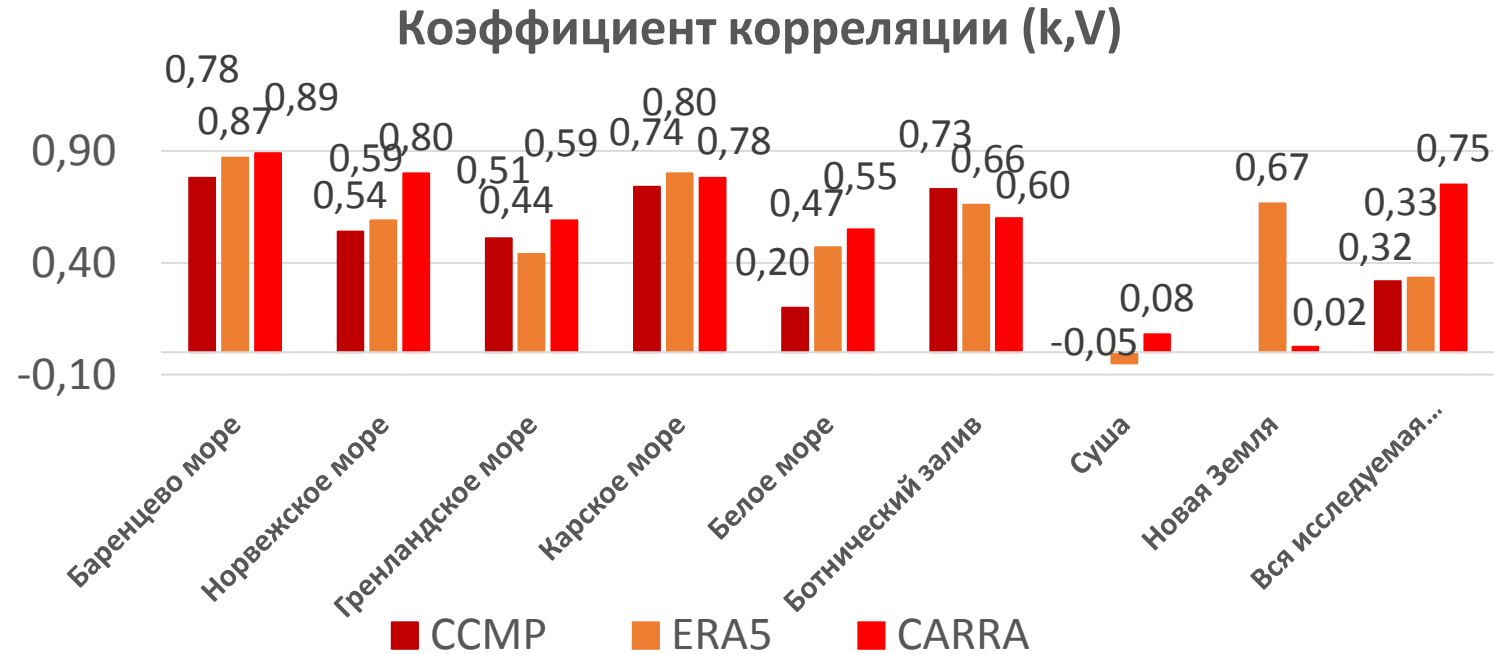
ERA5



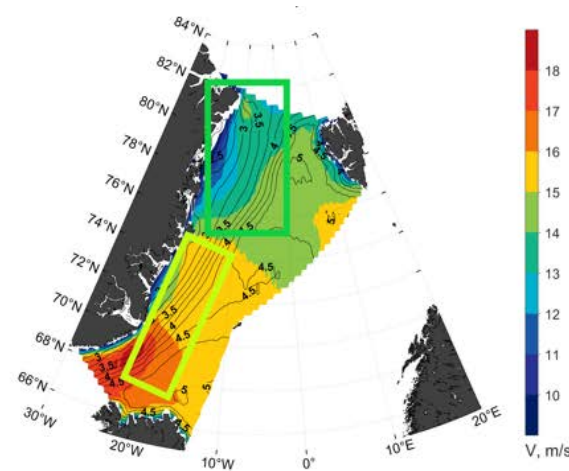
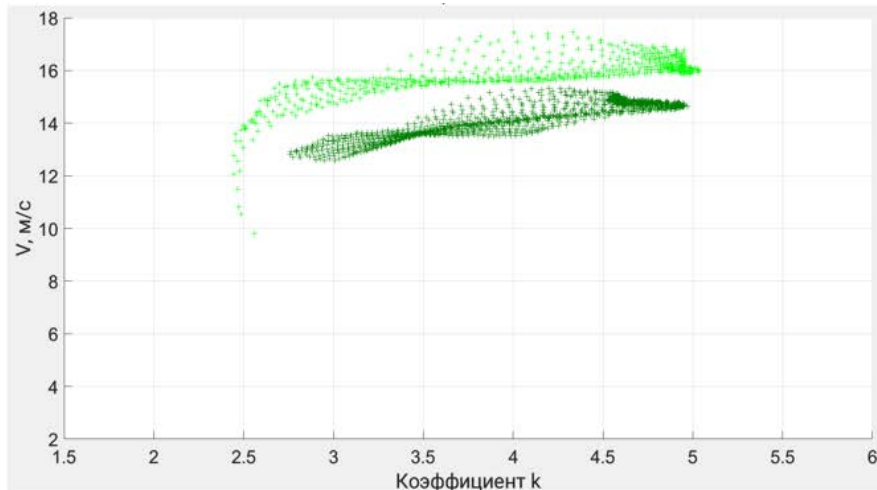
CSMP

- Для CSMP характерны повсеместно более высокие V и одновременно более низкие значения k
- Для Баренцева моря наибольшие значения параметров k и V характерны для западной его части, граничащей с Норвежским морем, и наименьшие на юге у побережья ЕТР и в северо-востоке

Вейбулловское распределение. Параметры



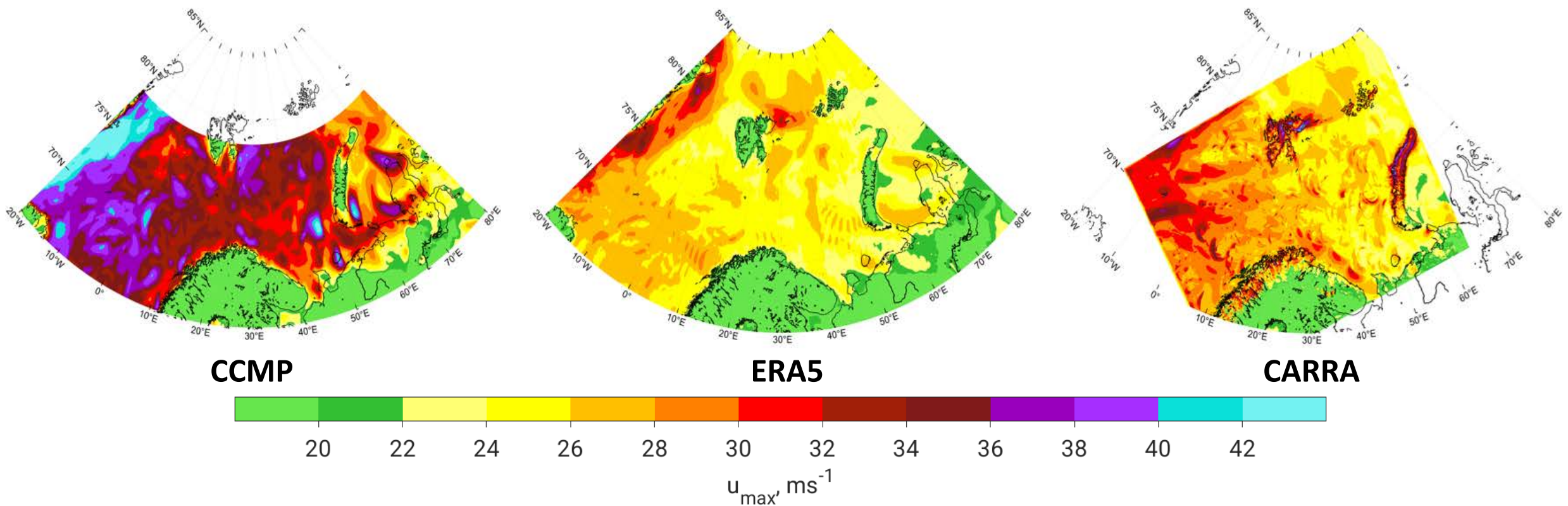
- Параметры Вейбулловского распределения хорошо скоррелированы над морями и почти не коррелируют над сушей
- Ветви по ERA5 и CCMP отвечают различным частям акваторий Баренцева и Гренландского морей с контрастными условиями



Карты параметров распределения Вейбулла k и V по данным реанализа ERA5 для Гренландского моря

Абсолютные максимумы скорости ветра

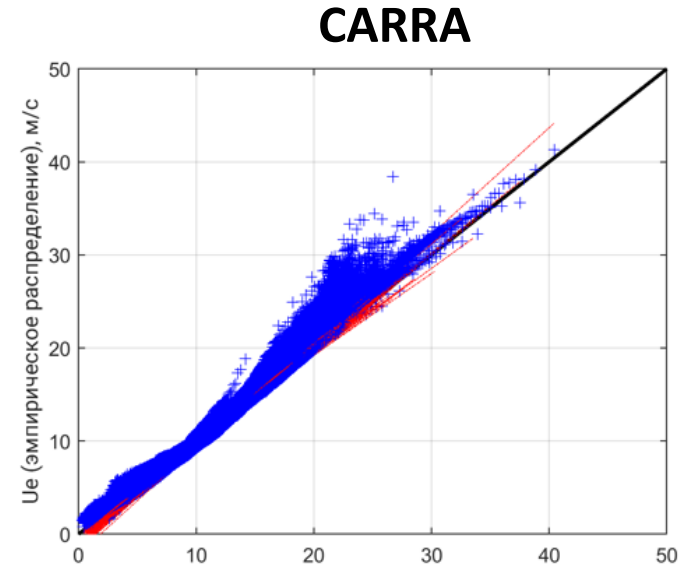
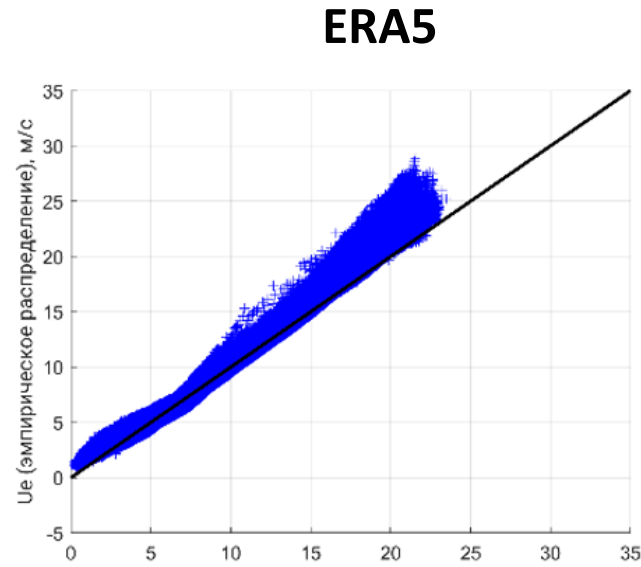
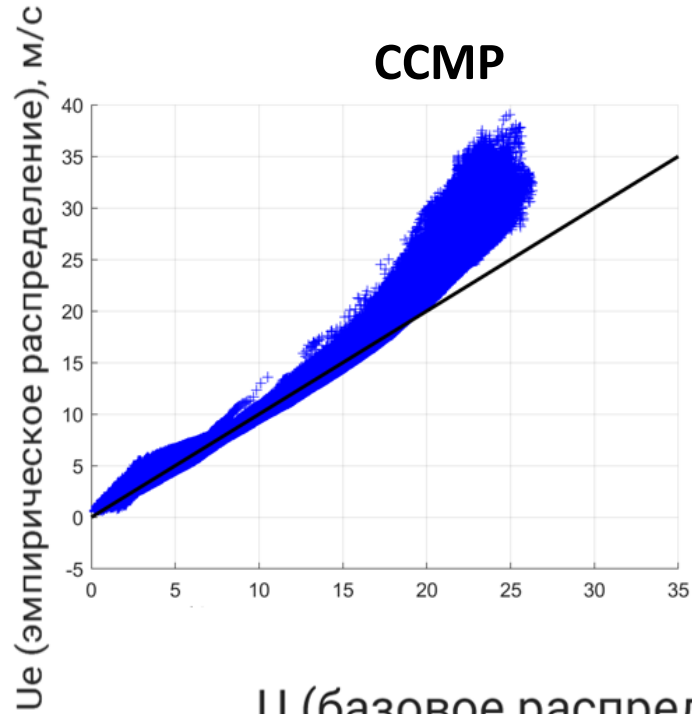
1993/1994-2022/2023



- Значительное расхождение между источниками данных
- CCMP – крупные области максимумов со скоростями 36-40 м/с у побережья в Карском море, в особенности у северной оконечности п-ова Ямал
- ERA5 – небольшие по площади пятна максимумов в форме параллельных гряд, например, к западу от о. Новая Земля или в Норвежском море у берега Норвегии
- CARRA – гораздо выше значения в материковых горных районах (от 22-30 до 38 м/с), над морями маленькие по площади пятна максимальных значений, очень похожи на «следы» ПМЦ

Применимость базового распределения

Баренцево море

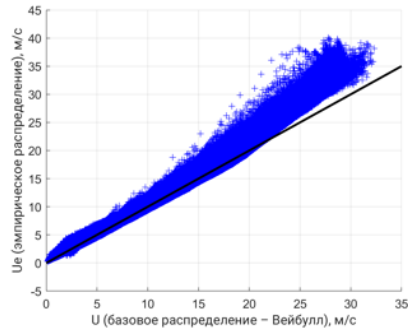


$$U(p) = \frac{1}{A} \left(\ln \frac{1}{1-p} \right)^{1/k}$$

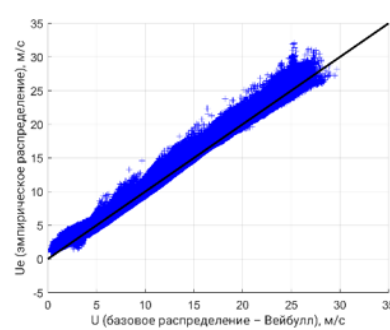
- Для наибольших p расхождение остаётся отчетливо выраженным во всех трёх источниках, но особенно отчётливо для CCMP
- Для ERA5 более низкие как эмпирические значения по сравнению с CARRA и CCMP, так и значения по базовому распределению
- Поскольку квантильные значения скоростей на осях соответствуют разным вероятностям, картина различий несколько «размывается»

Применимость базового распределения

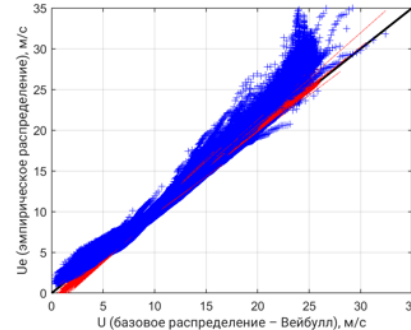
CCMP



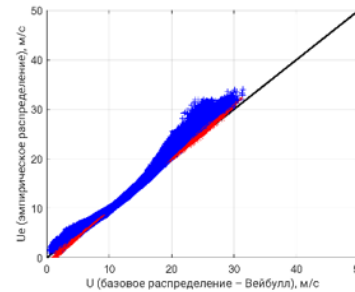
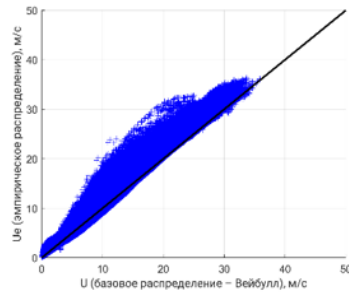
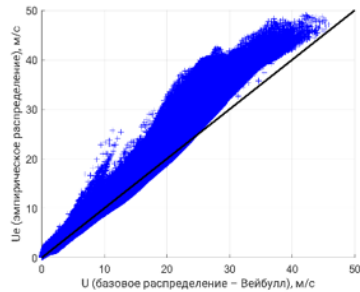
ERA5



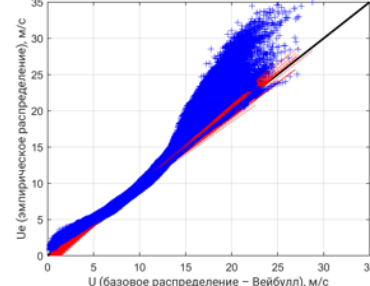
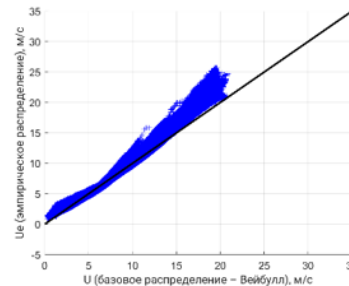
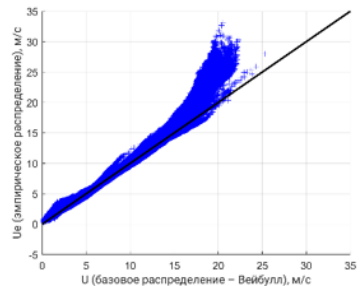
CARRA



Норвежское море



Гренландское море

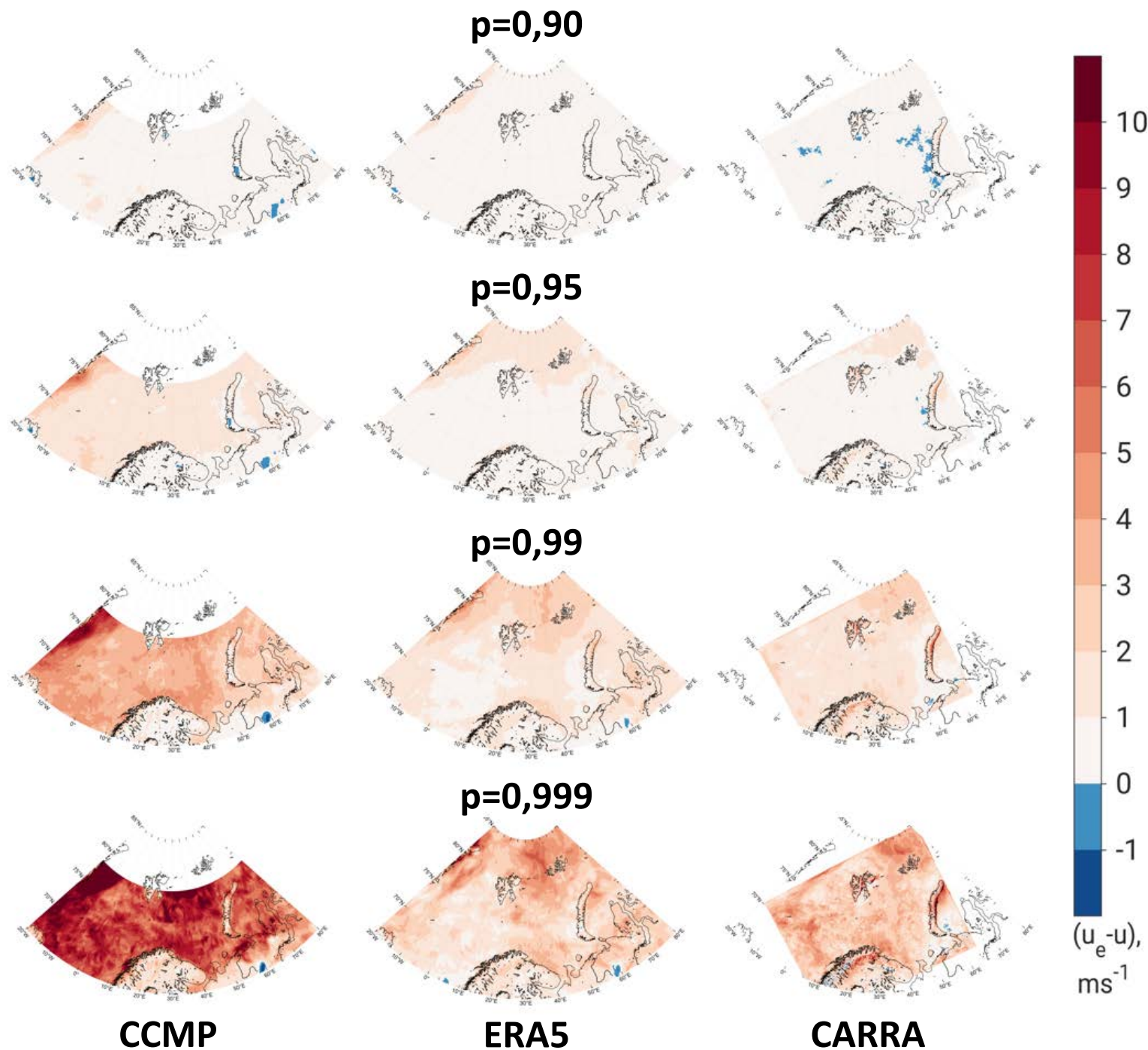


Карское море

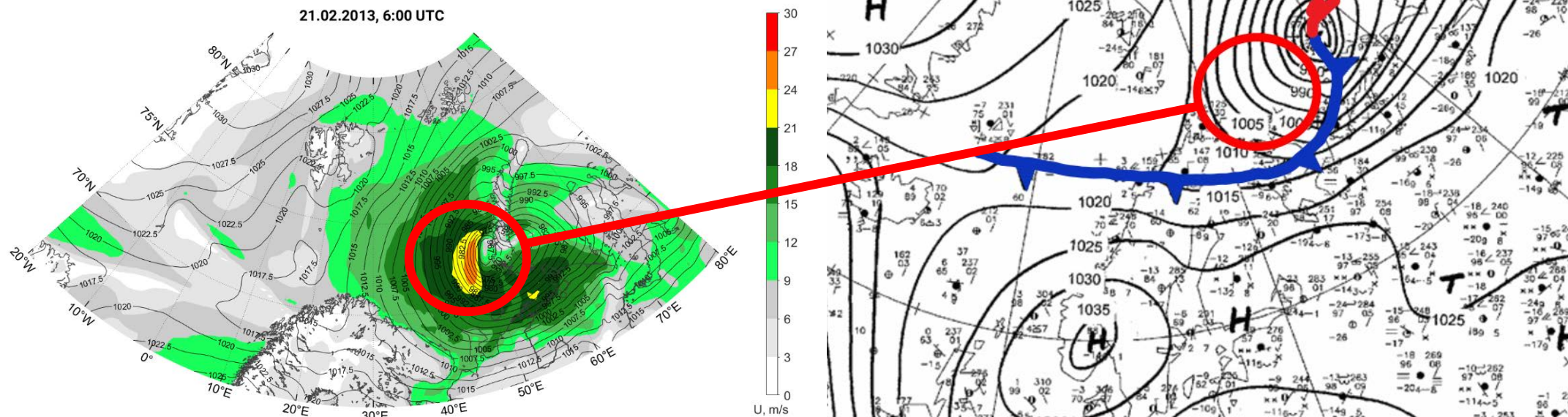
- Аналогичная картина возрастающих отклонений при больших p для других морей
- Недооценка скорости ветра вейбулловской моделью в области наиболее редких аномалий по данным реанализов и спутниковым данным может составлять 10 м/с и более

Применимость базового распределения

- Увеличение различий по мере роста p
- Наиболее значительная разница для спутниковых данных
- На суше максимумы соотносятся с локализацией местных ветров в регионах со сложным рельефом
- Для Баренцева моря при $p > 0,999$ характерны значения около 4-5 м/с.



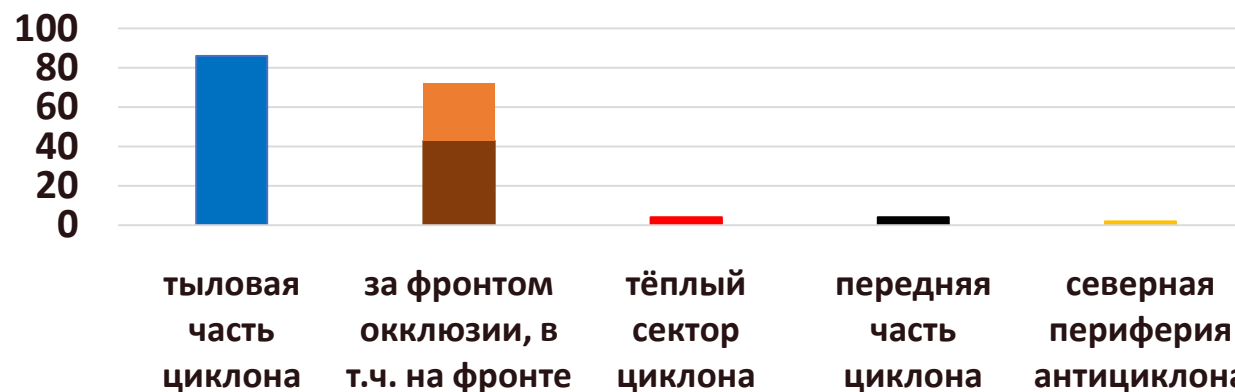
Циркуляционные системы, соответствующие экстремальным скоростям ветра



Пример одного из случаев «драконов» в Баренцевом море 19-21 февраля 2013 г.: скорость ветра до **27 м/с**

Локализация зон максимумов скорости ветра
(по данным карт с фронтальным анализом)

- Случай «дракона» – глубокий циклон синоптического масштаба
- По станции Малые Кармакулы (Новая Земля) – 24 м/с и 33 м/с средняя и максимальная скорости ветра соответственно
- ПМЦ отсутствует



Декабрь 2003 г. – март 2023 г., Атлантический сектор Арктики, события $p > 0,999$

Выводы

- Параметры вейбулловского распределения и квантильные значений скорости ветра демонстрируют сходную географическую картину различий между различными морями. Для абсолютных максимумов за 29 холодных сезонов различия между источниками более выражены: наибольшие значения демонстрирует CCMR (до 36-40 м/с), затем CARRA (от 22-30 м/с в Баренцевом море до 38 м/с в Норвежском и Гренландском морях), затем ERA5 (22-28 м/с).
- Для скоростей ветра Атлантического сектора Арктики допустимо применение квантильных значений для вероятностей, не превышающих ~ 0.90 , рассчитанных по распределению Вейбулла для всей выборки. Для наиболее экстремальных событий, наблюдавшихся 1-3 раза за исследуемый период, базовые квантильные значения могут быть заметно ниже наблюдавшихся – от 2-3 до 10 и более м/с в зависимости от источника информации. Таким образом, для оценки вероятности «сверхбольших» экстремумов, базовое распределение не подходит ни по одному из источников.
- На основе данных реанализа ERA5 построен календарь экстремальных событий, соответствующих повторяемости более 0,999 (3 события за исследуемый период). Выявлено, что практически всегда случаи наиболее сильных ветров, соответствующие «драконам», связаны с циклонами на арктическом фронте, и наблюдаются чаще всего в их тыловой части и за фронтом окклюзии или непосредственно на нём. В незначительной части случаев в области, где наблюдался максимум ветра, были обнаружены ПМЦ. Масса подобных ситуаций обнаружены и для «чёрных лебедей». Чем отличаются случаи «драконов» от «чёрных лебедей» обнаружить на основе классического фронтального анализа не представляется возможным, однако, по крайней мере можно сделать вывод, что не присутствие/отсутствие ПМЦ обеспечивают эти различия.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта 23-Ш-07-33 «Экстремальные природные явления в Арктике в условиях современного потепления климата», выполняющегося в интересах Междисциплинарных научно-образовательных школ Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

А также в рамках госзаказа № 121051400081-7 «Погодные и климатические процессы различных пространственно-временных масштабов в условиях антропогенного воздействия»