

Восстановление динамических параметров приводного атмосферного слоя на основе совмещения данных радиометра SFMR и спутника Sentinel-1 в режиме съемки EW

Поплавский Е.И., Русаков Н.С., Ермакова О.С., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.

**Нижний Новгород, ИПФ РАН
2023 г.**

Опасные морские погодные явления:

- **тропические циклоны** (часто приводят к человеческим жертвам в прибрежной зоне, вызывают многомиллионные убытки, представляют большую опасность для коммерческого и пассажирского судоходства)
- **внетропические проникновения** (могут существенно повлиять на погоду умеренного и субтропического поясов, например, сильные шторма в Дальневосточных морях России)
- **полярные ураганы** (появляются в том числе и в Восточной Арктике, затрудняя навигацию по Северному морскому пути и освоение арктического шельфа)

Наличие таких опасных морских погодных явлений, характеризующихся штормовым ветром, обуславливает высокие требования к качеству прогностических моделей и методам мониторинга поверхности океана.



Существующие проблемы восстановления турбулентного напряжения

Важнейшей динамической характеристикой атмосферного пограничного слоя, определяющей взаимодействие между атмосферой и океаном, является касательное турбулентное напряжение τ или связанная с ним динамическая скорость ветра u_* :

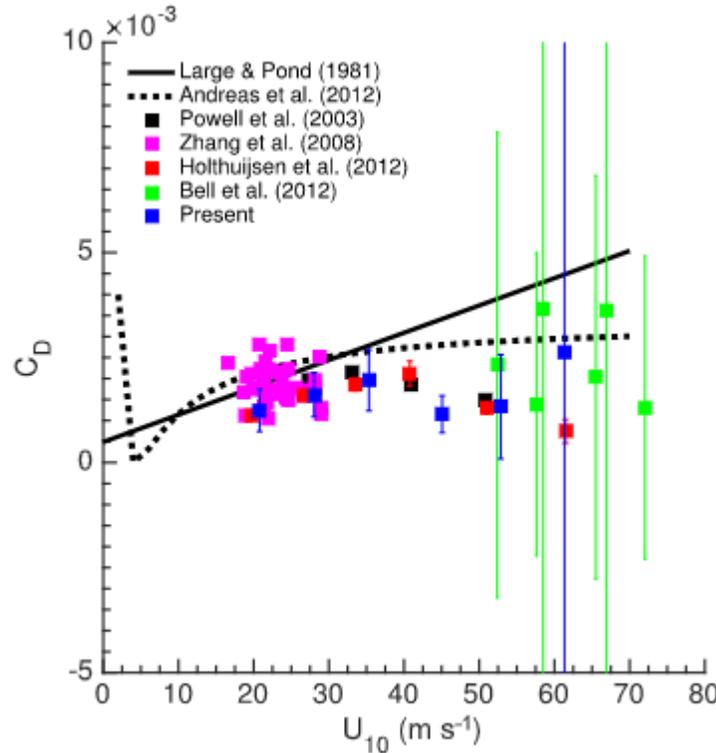
$$\tau = \rho_a u_*^2$$

$$\tau = \rho_a C_D U_{10}^2 \quad \text{- «балк-формула»}$$

$$U_{10} = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{H_{10}}{z_0}\right)$$

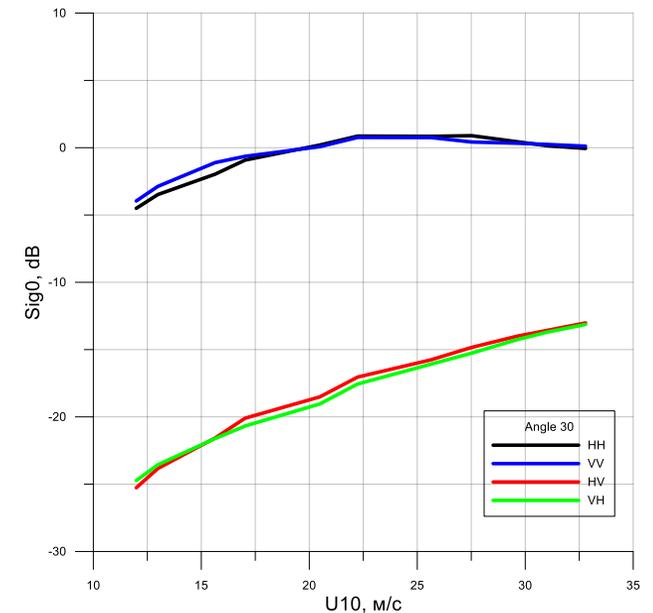
$$C_D = \left(\frac{u_*}{U_{10}}\right)^2 = \frac{\kappa^2}{\ln^2\left(\frac{H_{10}}{z_0}\right)}$$

$\kappa = 0.4$ - постоянная Кармана,
 z_0 - параметр шероховатости

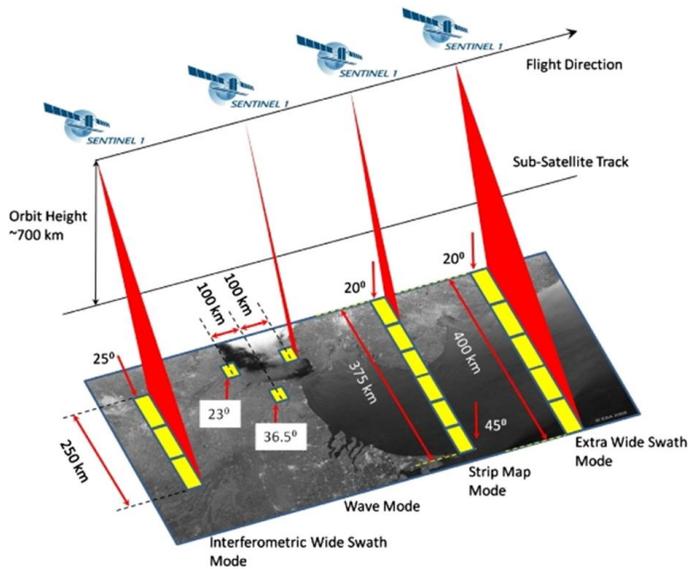


Зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от U_{10} . (из работы [Richter et al., 2016])

Насыщение сигнала на соосной поляризации



Зависимость удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) водной поверхности от U_{10} (Troitskaya et al., 2018)



В настоящей работе были использованы PCA изображения, полученные с помощью инструмента C-SAR, базирующегося на спутниках Sentinel-1A и Sentinel-1B Европейского космического агентства (ESA) для C-диапазона (с частотой 5.405 ГГц) на перекрестной поляризации для режима обзора EW (углы падения $20^\circ - 47^\circ$).

- Для каждого спутникового снимка Sentinel-1 были отобраны синхронизированные с ним по времени и пространству измерения с радиометра SFMR.
- Микроволновый радиометр SFMR измеряет на шести рабочих частотах 4.55, 5.06, 5.64, 6.34, 6.96, 7.22 ГГц яркостные температуры океана. Пространственное разрешение измерений SFMR составляет 1.5 км при типичной скорости самолета 150 м/с, а время сбора данных для всех каналов SFMR составляет 10 секунд.
- В результате анализа для совмещения были отобраны PCA-изображения ураганов Karl (2016, TS), Michael (2018, категория 5), Lorenzo (2019, категория 5), Teddy (2020, категория 4), Larry (2021, категория 3), Sam (2021, категория 4).

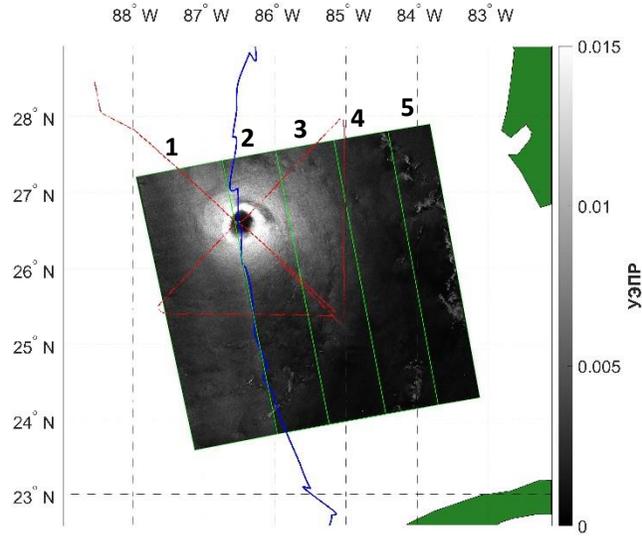


Исследовательские самолеты NOAA



Радиометр под крылом самолета

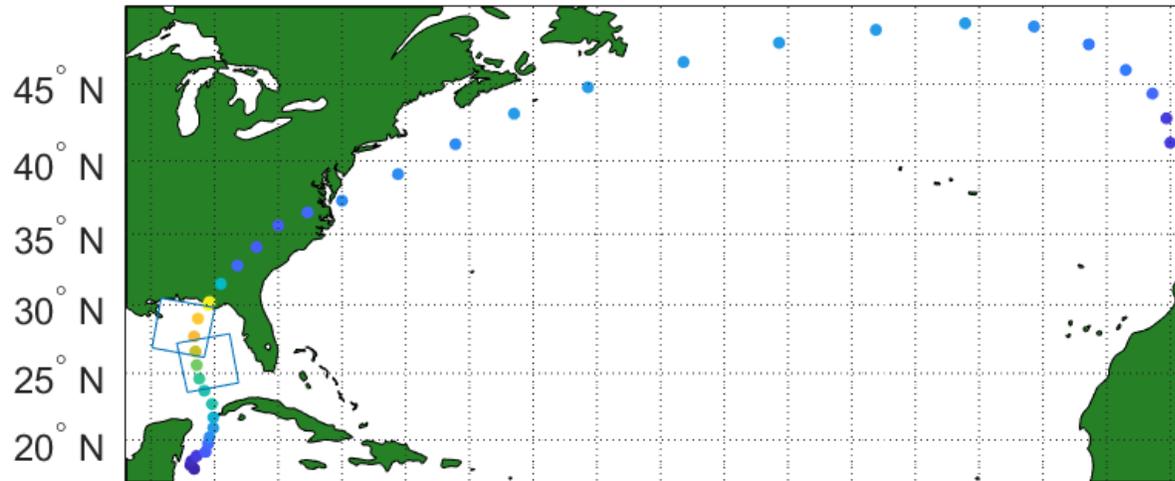
Совмещение PCA-изображений со спутника Sentinel-1 и данных SFMR



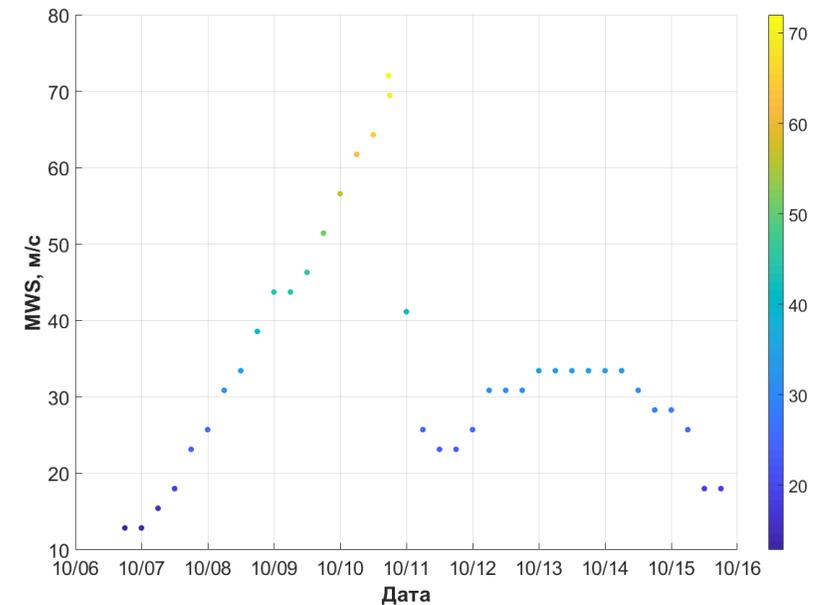
а

Иллюстрация набора данных для урагана Michael: **(а)** PCA-изображение (09.10.2018) в режиме работы EW на VH поляризации (ортогональной), красная кривая - траектория движения самолета с SFMR, наложенная на изображение Sentinel-1, синяя кривая - траектория урагана, зелеными линиями и цифрами отмечены различные субполосы; **(б)** трек урагана Michael с максимальной скоростью ветра, обозначенной цветом, и контуры отображенных для совмещения PCA-изображений; **(в)** зависимость максимальной скорости ветра урагана Michael от времени.

80° W 60° W 40° W 20° W



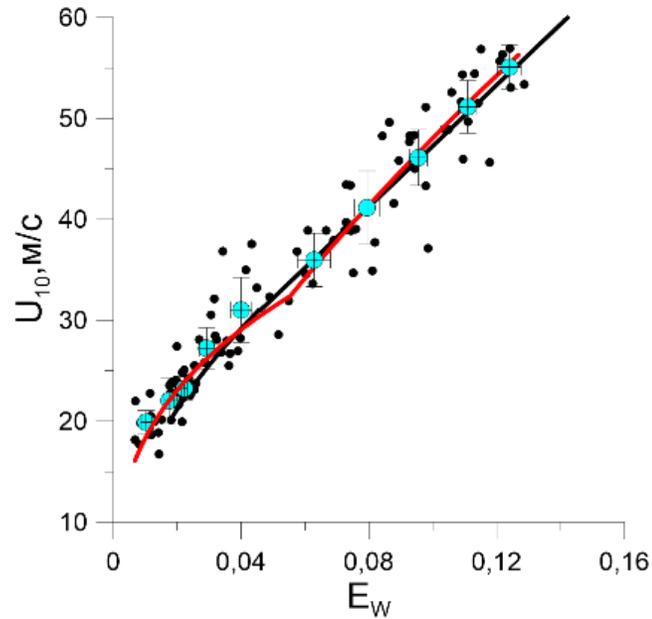
б



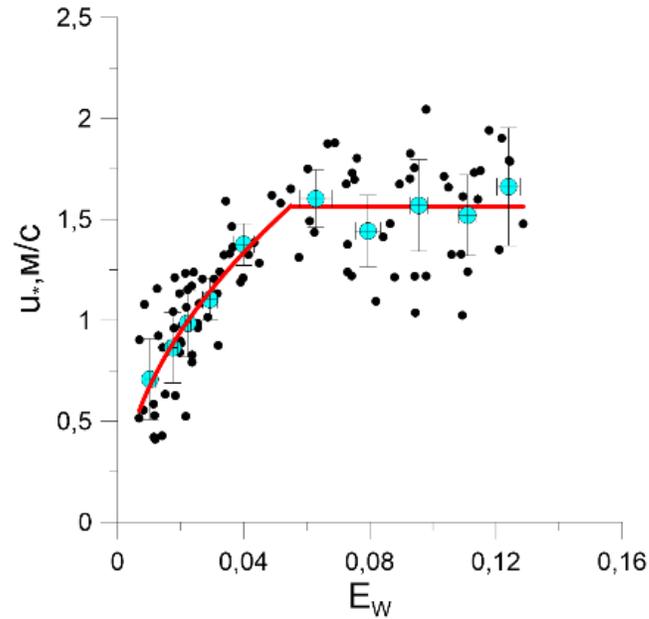
в

Эмпирические зависимости излучательной способности поверхности воды от динамических параметров атмосферного пограничного слоя

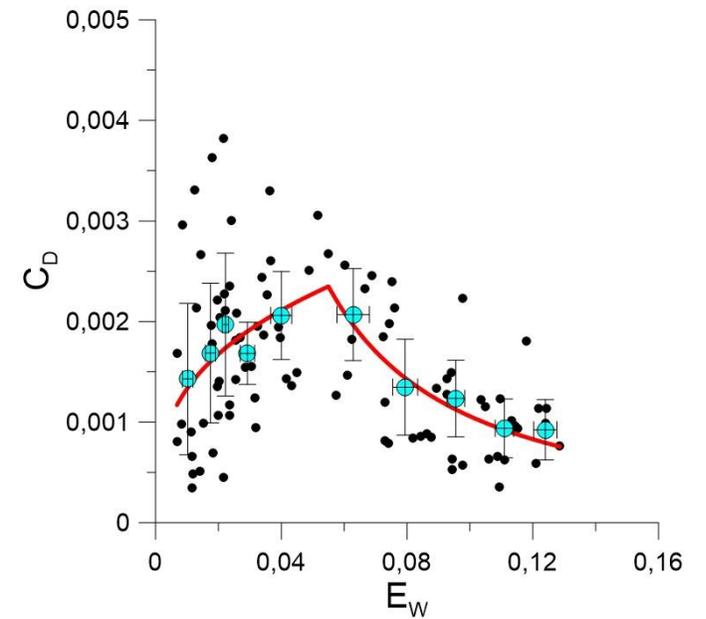
Для восстановления приповерхностной скорости ветра и динамической скорости ветра по данным радиометра SFMR были использованы эмпирические зависимости между излучательной способностью и данными динамическими параметрами атмосферного пограничного слоя, полученные в работе (Ermakova et al., 2023):



$$U_{10} = \begin{cases} 85E_w^{1/3}, & 0.0068 \leq E_w \leq 0.055, \\ 223E_w^{2/3}, & 0.055 < E_w \leq 0.1286 \end{cases}$$



$$u_* = \begin{cases} 6.68E_w^{1/2}, & 0.0068 \leq E_w \leq 0.055, \\ 1.56, & 0.055 < E_w \leq 0.1286 \end{cases}$$



$$C_D = \begin{cases} 0.0062E_w^{1/3}, & 0.0068 \leq E_w \leq 0.055, \\ 4.89 \cdot 10^{-5} E_w^{-4/3}, & 0.055 < E_w \leq 0.1286 \end{cases}$$

На основе представленных зависимостей сначала производилась оценка величин скорости ветра и скорости трения ветра по данным SFMR в заданный момент времени в определенной точке пространства, а далее полученные величины сравнивались с величинами УЭПР, полученными со спутниковых снимков в этой же пространственной точке.

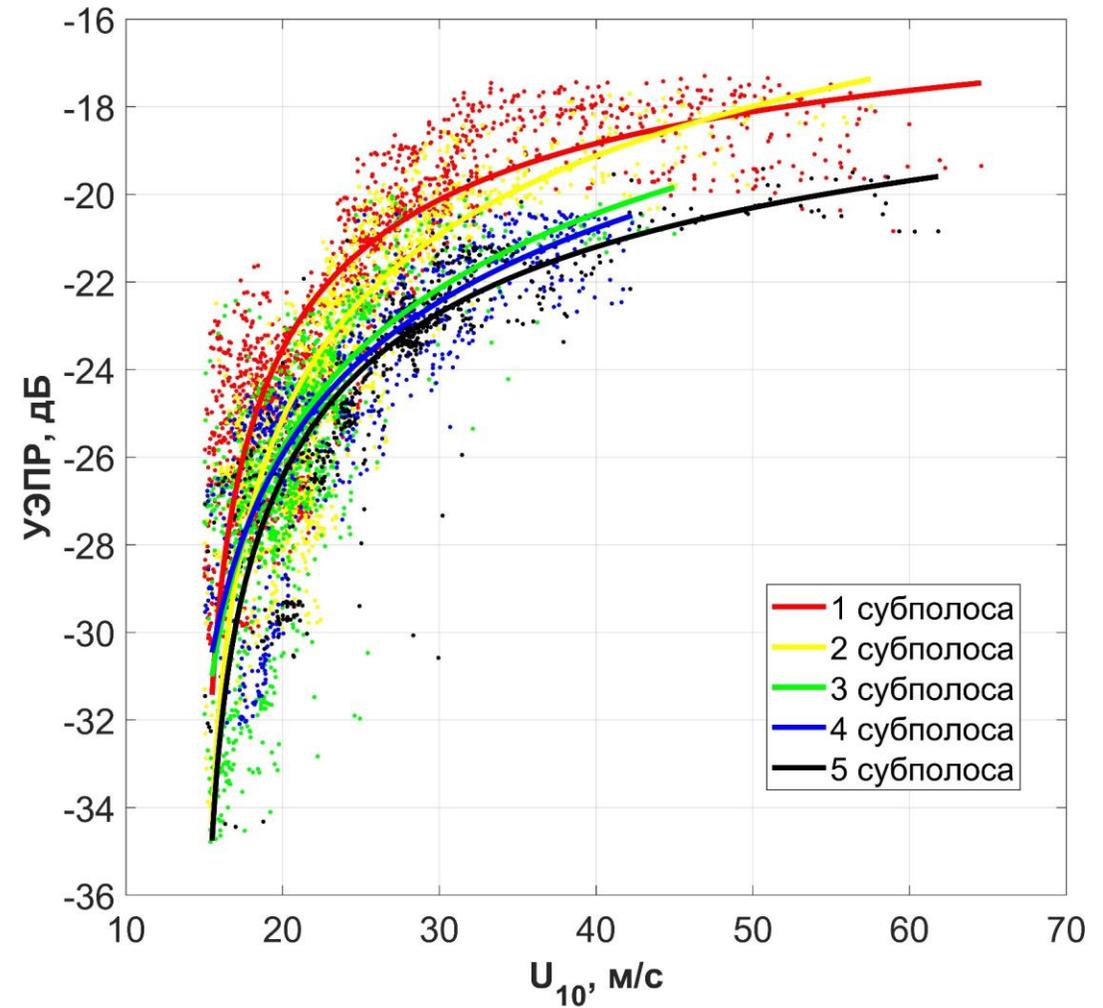
Восстановление параметров атмосферного пограничного слоя при ураганных ветрах по РСА-изображениям со спутника Sentinel-1

Степенная аппроксимация:

$$\sigma_{0VH} = \alpha(\theta) U_{10}^{\gamma(\theta)} + \beta(\theta)$$

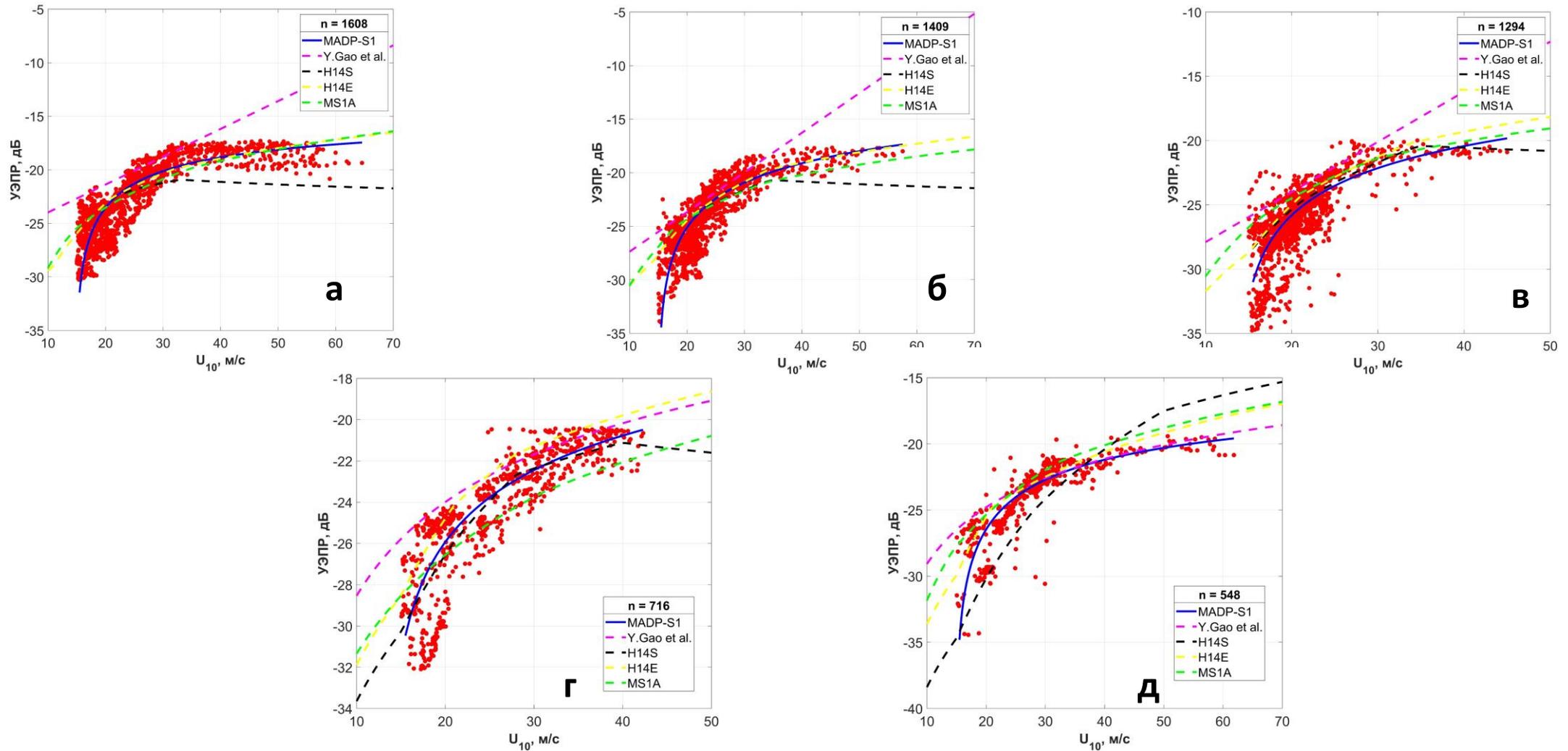
Аппроксимации массивов совмещенных данных были сделаны для каждой субполосы РСА-изображения, охватывающих углы падения **20°-29.2°** (субполоса 1), **29.2°-34.47°** (субполоса 2), **34.47°-39.66°** (субполоса 3), **39.66°-43.89°** (субполоса 4) и **43.89°-46.97°** (субполоса 5) .

Диапазон скоростей ветра составил 15 – 65 м/с.



Зависимости УЭПР от скорости ветра U_{10} для 5-ти субполос.

Восстановление приповерхностной скорости ветра



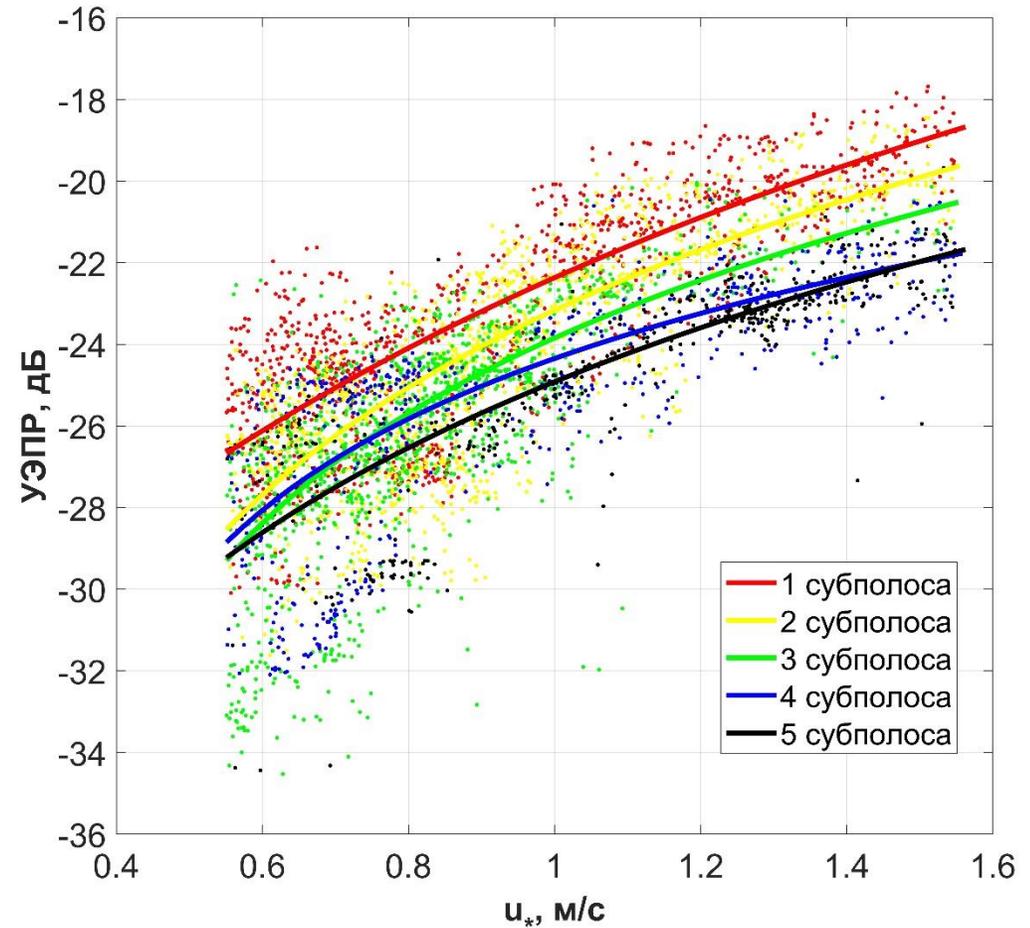
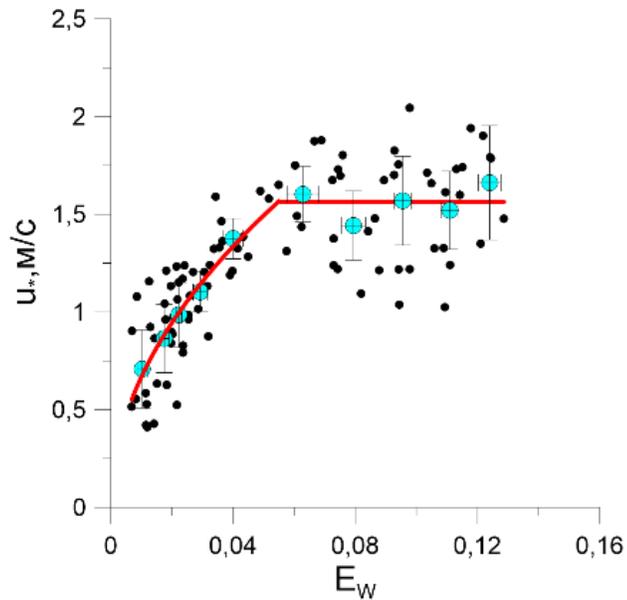
Зависимости УЭПР от скорости ветра U_{10} для субполосы 1 (а); субполосы 2 (б); субполосы 3 (в); субполосы 4 (г); субполосы 5 (д).

Синяя сплошная линия соответствует предложенным в данной работе степенным аппроксимациям, пунктирные кривые иллюстрируют следующие ГМФ: **Y.Gao et al. (2021)** (фиолетовый), **MS1A** (зеленый), **H14E** (желтый), **H14S** (черный), n соответствует количеству точек данных, используемых для построения предлагаемой в данной работе ГМФ.

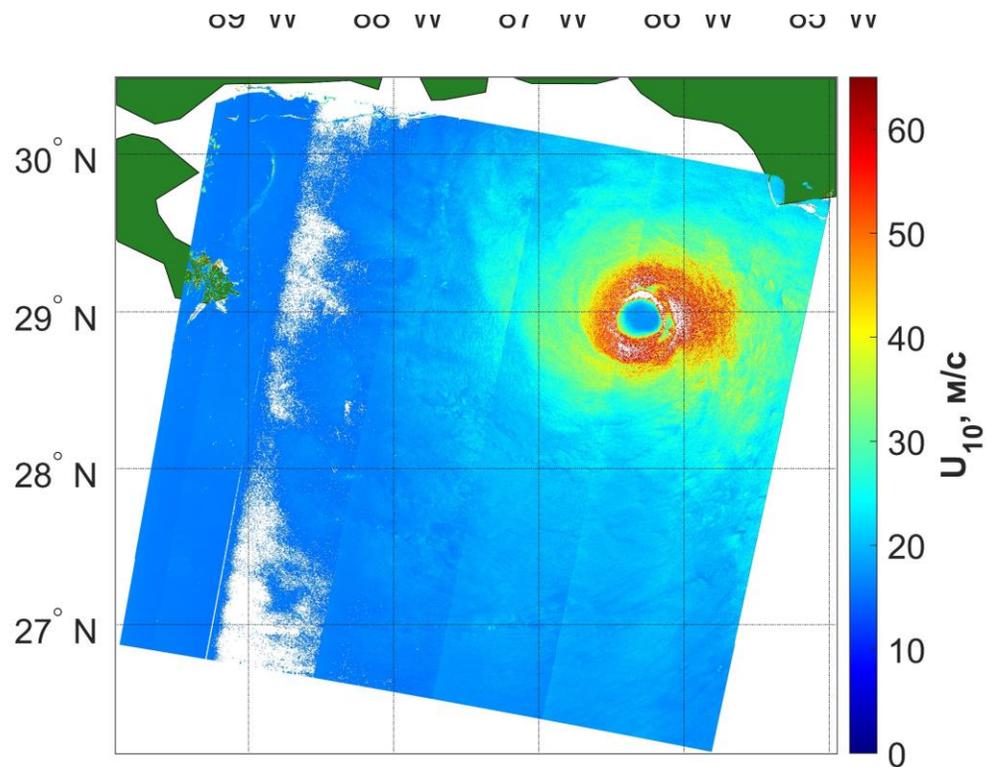
Восстановление динамической скорости ветра

Степенная аппроксимация:

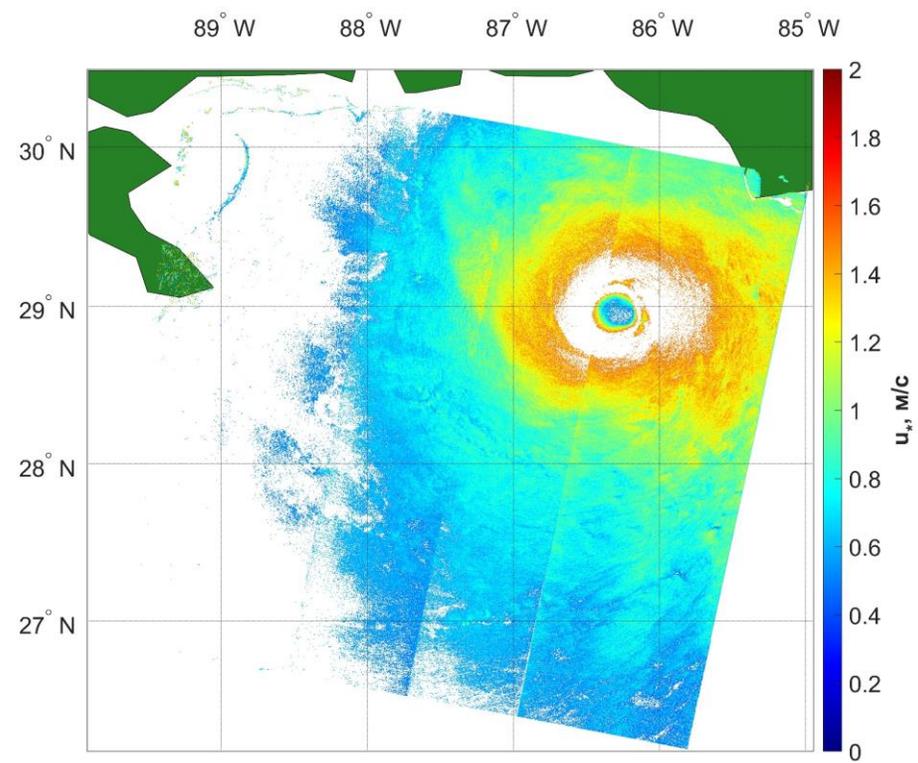
$$\sigma_{0VH} = \alpha(\theta)u_*^{\gamma(\theta)} + \beta(\theta)$$



Зависимости УЭПР от динамической скорости u_* для 5-ти субполос. Кривые – степенные аппроксимации.



а



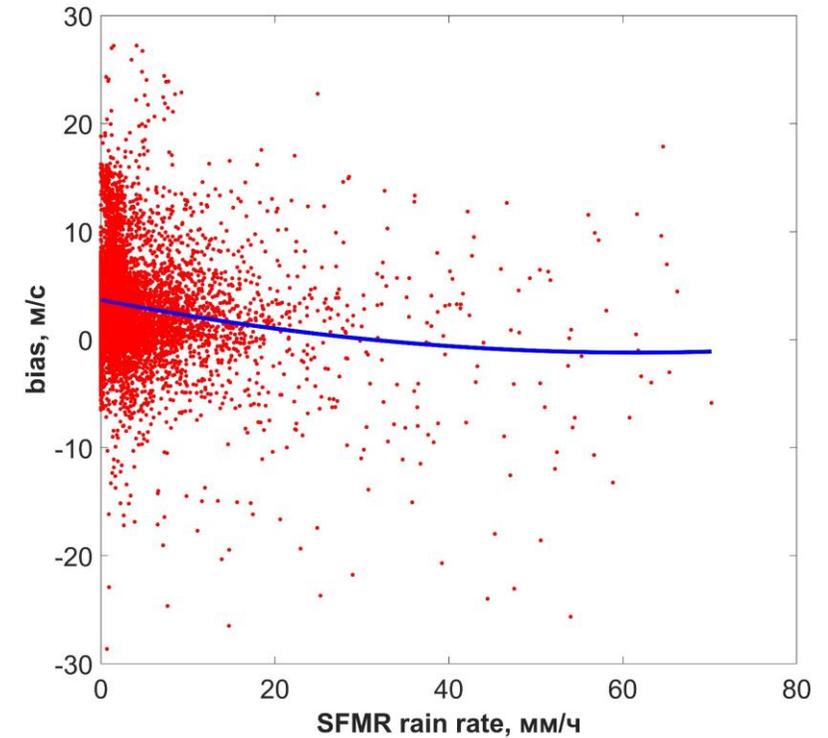
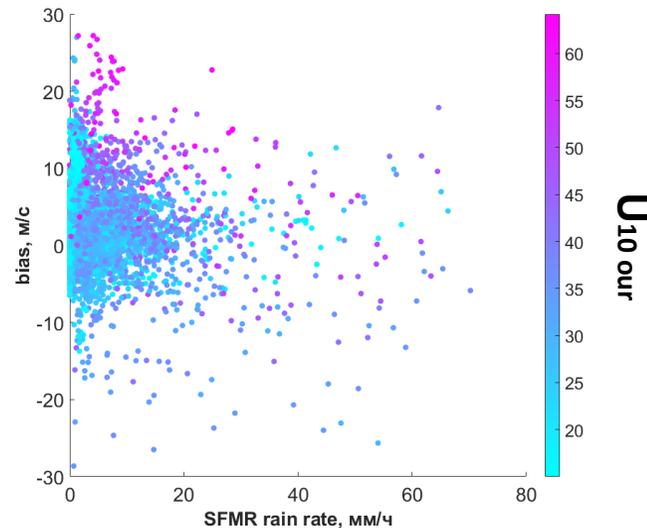
б

Иллюстрация распределения U_{10} **(а)** и u_* **(б)**, полученных по РСА-изображению урагана Michael 10 октября 2018 года со спутника Sentinel-1.

Было проанализировано отклонение скорости ветра, полученной с помощью предложенных аппроксимаций, от скорости ветра SFMR, в зависимости от интенсивности осадков.

$$bias = U_{our} - U_{SFMR}$$

Как видно из графика, предложенная ГМФ в области малых осадков переоценивает значения скорости ветра по сравнению со скоростью ветра, восстановленной SFMR. При увеличении интенсивности осадков данная разница уменьшается.



Зависимость биаса (смещения) от интенсивности дождя, измеренной SFMR

Заключение

Предложена геофизическая модельная функция, позволяющая восстанавливать распределение поверхностной скорости ветра и динамической скорости по спутниковым РСА-изображениям на ортогональной поляризации с C-SAR инструмента, базирующегося на спутниках Sentinel-1A, Sentinel-1B, в режиме обзора EW. ГМФ построена для 5-ти субполос радиолокационного снимка и применима в широком диапазоне ветровых условий, включая экстремальные (15-65 м/с).

Преимущество предлагаемой ГМФ заключается в том, что она позволяет восстанавливать динамическую скорость (или турбулентное напряжение) напрямую из радиолокационных данных без использования балк-формул.

Было проведено сравнение предложенных зависимостей УЭПР от U_{10} с существующими ГМФ и показано, что они лучше всего согласуются с MS1A и H14E.

Было проанализировано отклонение скорости ветра, полученной с помощью предложенных аппроксимаций, от скорости ветра SFMR, в зависимости от интенсивности осадков. Было установлено, что предложенная ГМФ преимущественно переоценивает скорости ветра по сравнению с SFMR, а в области интенсивных осадков разница между ними минимальна.