

# ВЕТРОВОЙ ДРЕЙФ, ПЕРЕМЕШАННЫЙ СЛОЙ И СКОРОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ, РАССЧИТЫВАЕМЫЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Алексанина М.Г.

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,  
Дальневосточный федеральный университет*

Владивосток, Россия

[margeo@mail.ru](mailto:margeo@mail.ru)



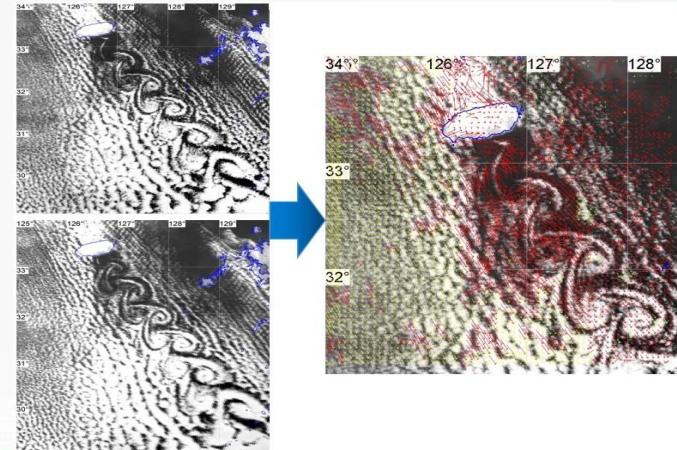
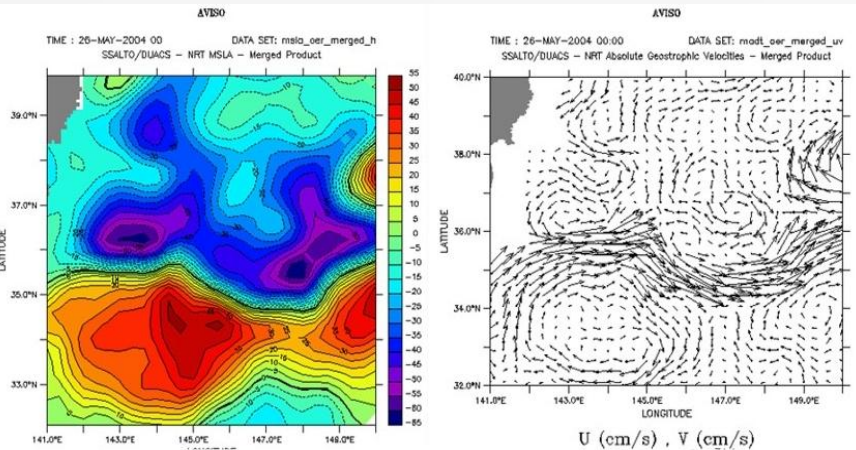
**Двадцать первая международная конференция  
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

**13 - 17 ноября 2023 г. Москва**

# Подходы к оценке скоростей течений поверхности океана по спутниковым данным

Спутниковые альтиметры

Спутниковые изображения в ИК диапазоне спектра



Альтиметрия

Перепад  
уровенной  
поверхности

Скорости  
поверхностных  
течений

Пара ИК  
изображений  
с интервалом  
6-12 часов

Прослеживан  
ие морских  
маркеров

Расчет  
априорной  
точности

Отбраковка  
по априорной  
точности

Скорости  
перемещений  
маркеров на  
поверхности  
моря

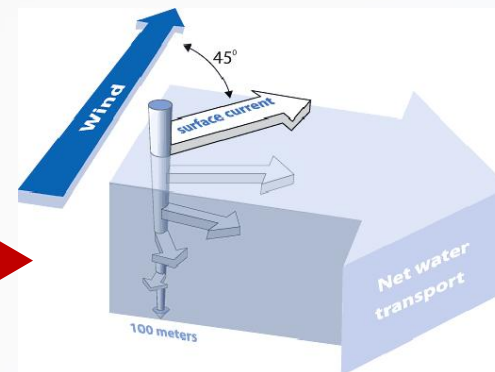
от перепада высоты  
уровенной поверхности моря к  
скоростям течений

прослеживание перемещений  
оптических неоднородностей  
(морских маркеров)  
по временной  
последовательности

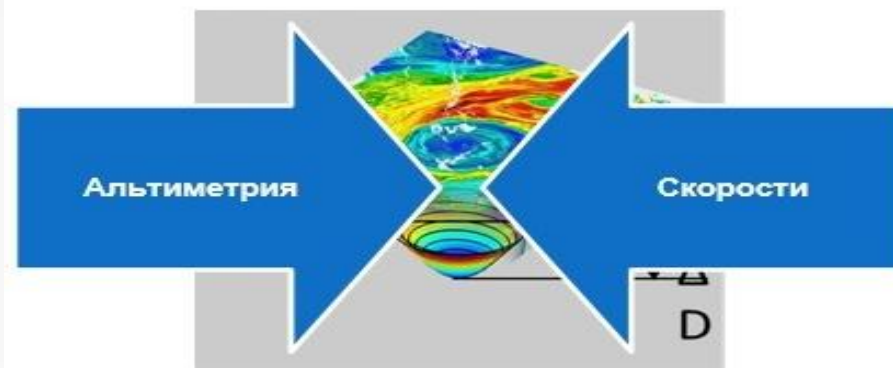
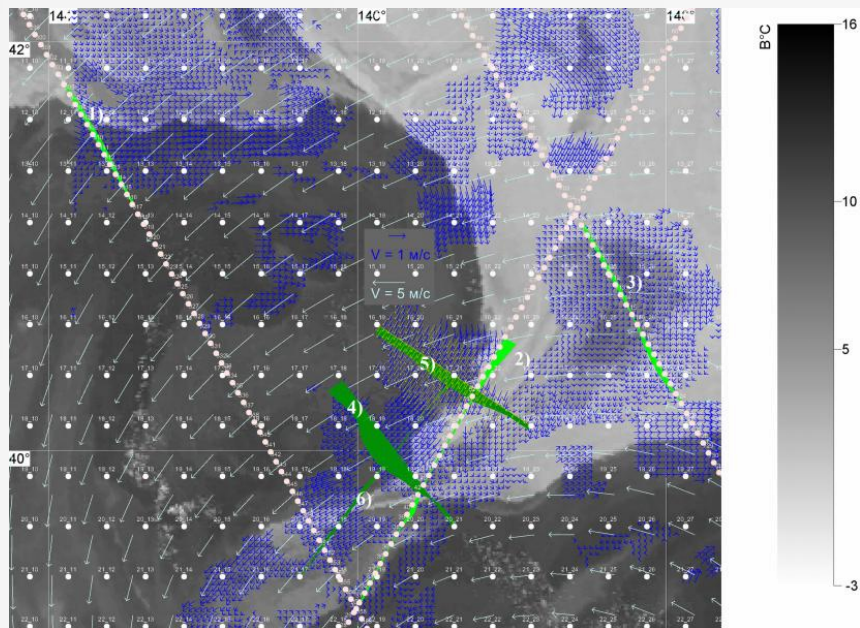
# Два подхода - две разные компоненты скорости - геострофическая и агеострофическая



**Экмановский дрейф**

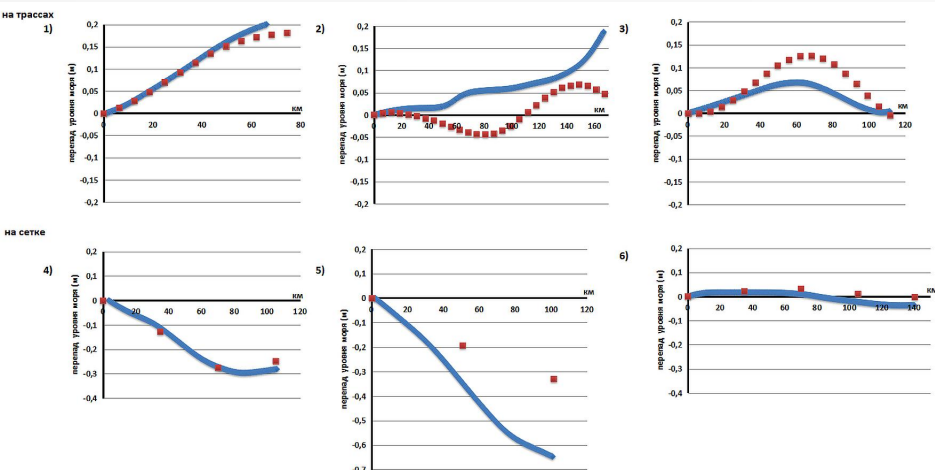


# Сопоставление двух подходов\*



**Сопоставление  
и дополнение**

Расчёт перепада уровенной поверхности  
вдоль альтиметрических трасс в момент  
измерения спутником показал хорошее  
соответствие двух типов измерений

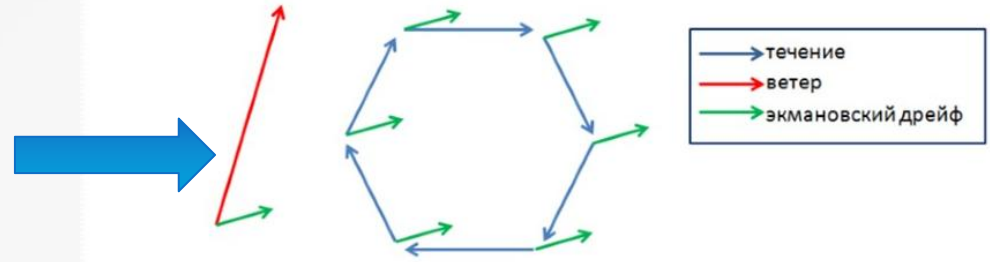


\* Алексанина М.Г., Загуменнов А.А., Шувалов Б.В. Оценка перепадов  
уровенной поверхности моря: скорости перемещений морских  
маркеров по ИК-изображениям в сравнении с данными спутниковой  
альтиметрии // Метеорология и гидрология. 2023. №1. С.43-53. DOI:  
10.52002/0130-2906-2023-1-43-53

# Эксперименты по выявлению ветрового (экмановского) дрейфа\*

- Используемый к решению подход базировался на представлении, что акваторию, линейный размер которой составляет сотни километров, и на которой отсутствуют стационарные течения, можно считать плотной упаковкой вихрей.

**В результате векторного усреднения скоростей перемещений морских маркеров на поверхности моря (SSM) должна доминировать компонента ветрового дрейфа**

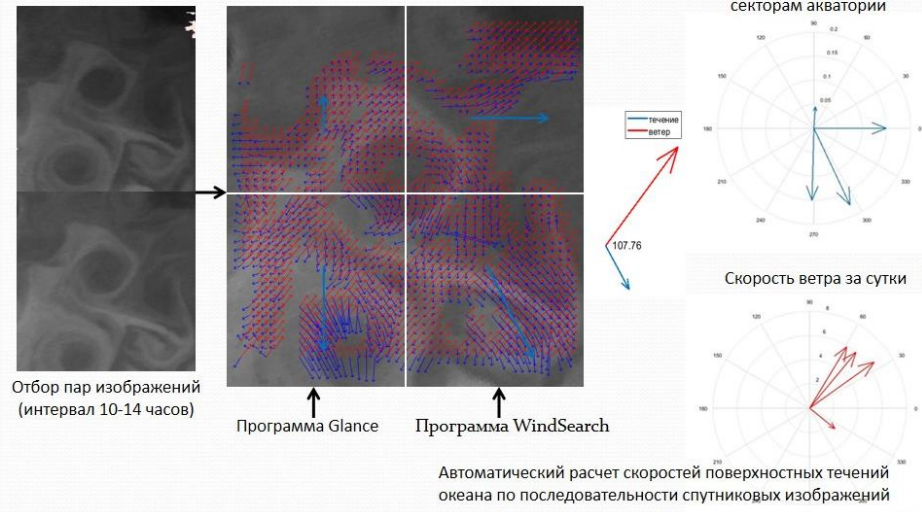


$$\frac{\sum_1^n \text{перемещение маркера}}{n} = \frac{\sum_1^n \text{течение}}{n} + \frac{\sum_1^n \text{экмановский дрейф}}{n} = 0 + \frac{\sum_1^n \text{экмановский дрейф}}{n}$$

n — количество точек на участке

Для средних широт в Японском море в спутниковых скоростях перемещений морских маркеров на поверхности моря **ветровой (экмановский) дрейф** проявляется (64 эксперимента)

- Среднее направление скорости перемещения морских маркеров (SSM) стабильно отклоняется вправо от направления ветра на 90°. Однако ветровой коэффициент нестабилен и меньше 2% в разы.**
- Из-за ветрового перемешивания **перемещение термических неоднородностей (морских маркеров) будет обусловлено перемещением слоя некоторой толщины, пропорциональной скорости ветра.**



Автоматический расчет скоростей поверхностных течений океана по последовательности спутниковых изображений

\*Aleksanina M., O. Korostyleva O. Estimation of wind drift component or sea surface currents velocities retrieved on satellite imagery // Marine Science and Technology for Sustainable Development: Abstracts of the 26th International Conference of Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON-2019), July 16–19, 2019, Vladivostok, Russia. С. 313.

# Перемешивание ветром формирует квазиоднородный слой, имеющий, фактически, постоянную температуру [\*].

- Хорошая модель формирования квазиоднородного слоя приведена в работе \*\*. Но она требует знаний о стратификации приповерхностного слоя, приводном трении ветра и обмене энергией через поверхность, что недоступно для произвольного участка океана.

\* Isern-Fontanet J., Ballabrera-Poy J., Turiel A., García-Ladona E. Remote sensing of ocean surface currents: a review of what is being observed and what is being assimilated // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017. V.24. No.4. P.613–643.

\*\* Soloviev, A., Lukas R., and Hacker P. An approach to parameterization of the oceanic turbulent boundary layer in the western Pacific warm pool // *Journal of Geophysical Research*. 2001. V.106. No. C3. P. 4421-4435.

## Оценка толщины квазиоднородного слоя

Существует упрощённая и часто используемая эмпирическая модель расчёта глубины перемешанного слоя (MLD) для прогнозирования вариации глубины перемешанного слоя MLD

с использованием скорости ветра ( $U$ ), периода ( $T_s$ ) и высоты волны ( $H_s$ ) [\*\*\*]:

$$MLD = 12.5 \times H_s + 0.2 \times (U \times T_s)$$

# Оценка параметров $H_s$ и $T_s$

по «Coastal Engineering Manual» (СЕМ-Инженерный корпус армии США,) [\*]

\*Choi B-Y, Jo H-J, Lee K-H, Byoun D-H Development of Wind Induced Wave Predict Using Revisited Methods // Journal of Advanced Research in Ocean Engineering. 2018. V.4. No.3. P. 124–134.

DOI:10.5574/JAROE.2018.4.3.124.

В работе \* приведено эмпирическое соотношение для высоты полностью сформированной

волны при любой скорости ветра:  $H_s = \lambda_5 \times U^2/g$ ,

где  $H_s$  — высота полностью сформированной волны;

$\lambda_5$  — безразмерный коэффициент, приблизительно равный 0.27;

$U$  — скорость ветра на высоте 10м;

$g$  — ускорение свободного падения.

**Тогда для высоты волны получаем:  $H_s = 0,27 \times U^2/g$ .**

Для полностью сформированной волны, когда высота волны не зависит от ветрового разгона,

выполняется соотношение  $g \times T_s/u_f = 2,398 \times 10^2$ ,

где  $u_f$  - скорость трения (скорость на уровне поверхности воды) .

Коэффициент аэродинамического сопротивления  $C_D$  для связи скорости трения  $u_f$  со скоростью ветра  $U$  выражается с одной стороны как  $C_D = u_f^2/U^2$ ,

а с другой стороны оценивается как  $C_D = 10^{-3} \times (1,1 + 0,0035 \times U)$ .

Отсюда находим скорость трения  $u_f$ :  $u_f = (C_D)^{1/2} \times (U^2)^{1/2} = U \times (C_D)^{1/2}$ .

Тогда период волны  $T_s$  через ветер  $U$  выражается так:

**$T_s = 2,398 \times U/g \times (0,11 + 0,0035U)^{1/2}$ .**

В итоге получаем оценку глубины перемешанного слоя MLD через скорость ветра  $U$ :

**$MLD = U^2/g \times (3,375 + 0,4796 \times (0,11 + 0,0035U)^{1/2})$**

# Что считали:

Для выбранных 4-х значений скорости ветра  $U$  м/с (1 м/с, 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с) были сделаны оценки ключевых гидродинамических параметров:

1. глубина перемешанного слоя  $MLD$  м,
2. скорость на поверхности моря  $V_0$  м/с,

$$MLD = U^2/g \times (3,375 + 0,4796 \times (0,11 + 0,0035U)^{1/2})$$

Согласно вычислениям Е. Ральфа и П. Ниилера, скорость ветрового течения  $V_0$  имеет следующий вид:

$$V_0 = \frac{0.0068}{\sqrt{\sin|\varphi|}} U_{10}$$

$U_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 метров;  $\varphi$  – географическая широта

3. средняя скорость перемешанного слоя  $V_{MLD}$  м/с и

Средняя скорость ветрового течения по глубине от  $D = 0$  до  $D = D_m$  ( $D_m$  – максимальная глубина перемешивания) с шагом 1 метр

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{D=0}^{D_m} v_x}{D+1} \\ \frac{\sum_{D=0}^{D_m} v_y}{D+1} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = V_0 \exp(-aD) \cos\left(\frac{\pi}{4} - aD\right) \\ v_y = V_0 \exp(-aD) \sin\left(\frac{\pi}{4} - aD\right) \end{array} \right.$$

$v_x, v_y$  – проекции скорости течения на оси  $OX$  и  $OY$ ;

$D$  – глубина моря в метрах.

$U_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 метров;  $\varphi$  – географическая широта.

$$a = \sqrt{\frac{f}{2A}}$$

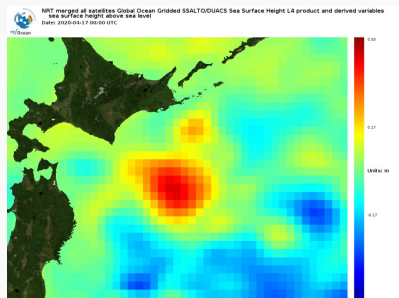
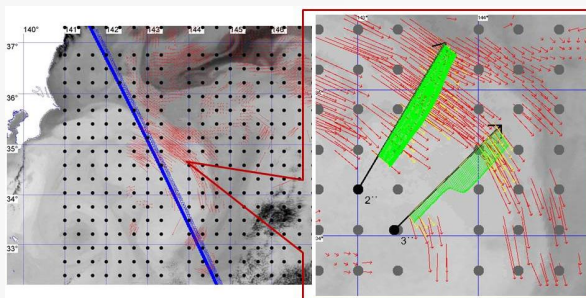
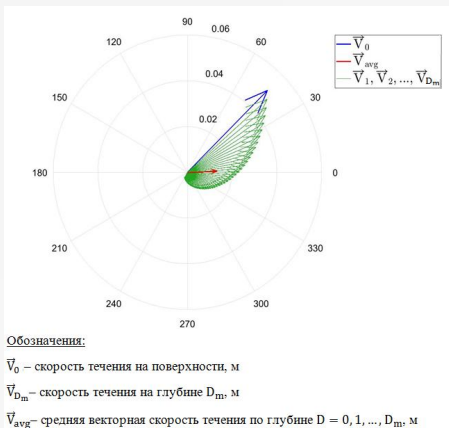
$$A = \frac{(7.6 * U_{10})^2 * f}{\sin|\varphi| * 2\pi^2}$$

$f = 2 \omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса;

$\omega$  – угловая скорость вращения Земли ( $7.29 * 10^{-5}$  секунд);

$A$  – коэффициент турбулентной вязкости.

4. перепад динамической высоты на 100 км, обусловленный ветровым дрейфом  $\Delta T_{wind}$

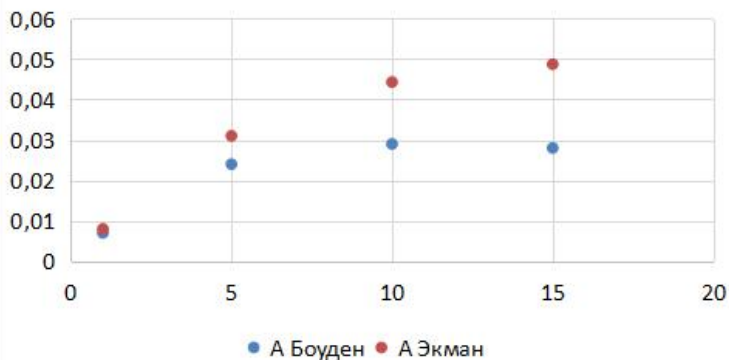


$$\frac{f}{g} \int V t_s dx = \frac{f}{g} \sum_{i=1}^n \bar{V} t_{si} x$$

$$\Delta \eta = \frac{1}{g_A} (\kappa V_t^2 + f V_t) \partial x$$



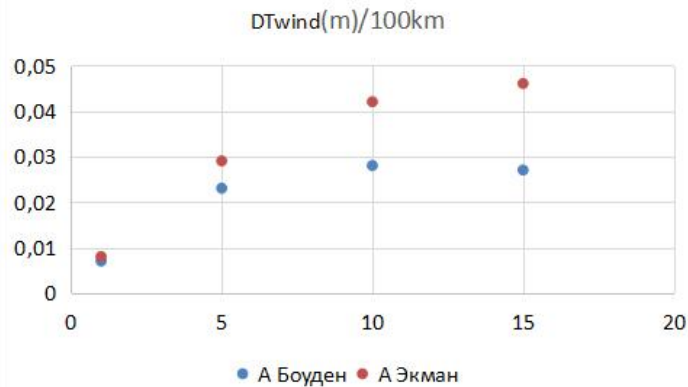
Скорость смещения в слое MLD (m)



h=MLD



При росте ветра экмановская компонента дрейфа перемешанного слоя нарастает.



Но рост её быстро прекращается, так как с ростом скорости ветрового дрейфа на поверхности растёт и глубина перемешанного слоя.

#### Коэффициент турбулентной вязкости A:

Анализируя наблюдения за дрейфом судов, Боуден предложил [\*] формулу

$$A = 1,37 \times 10^{-4} \times U \text{ м}^2/\text{с},$$

которая даёт значение в 2 с лишним раза меньшее, чем значение A по формуле Экмана:

$$A = 3,745 \times 10^{-4} \times U \text{ м}^2/\text{с}.$$

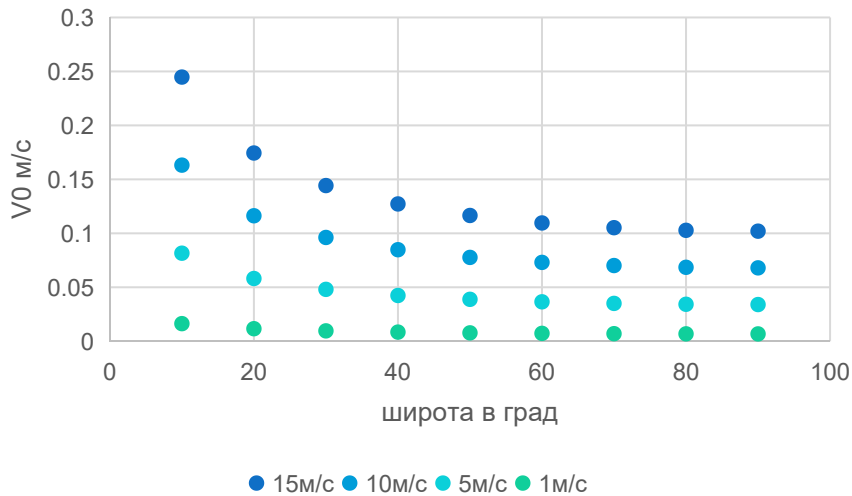
коэффициента турбулентной вязкости  
**A по Боудену**  
 коэффициента турбулентной вязкости  
**A по Экману**

\* Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 324 с.

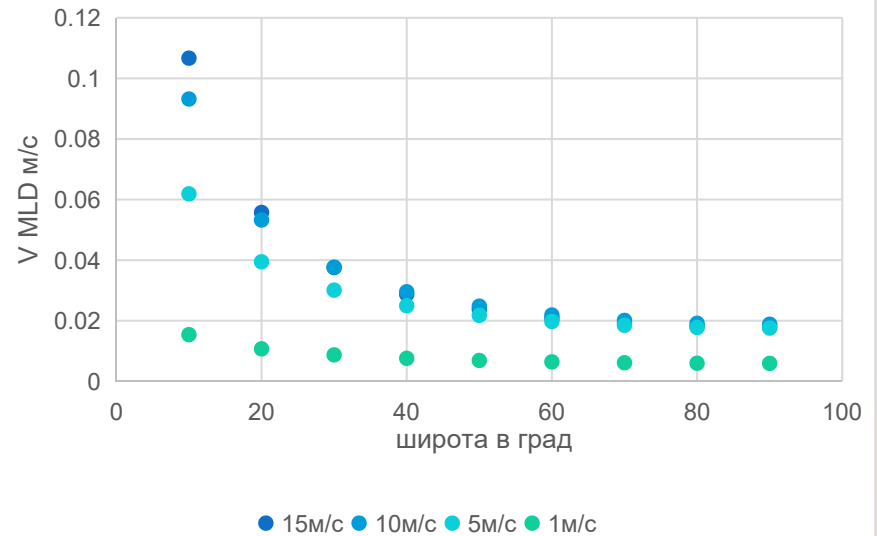


# Влияние широты на дрейф, скорости и перемешанный слой

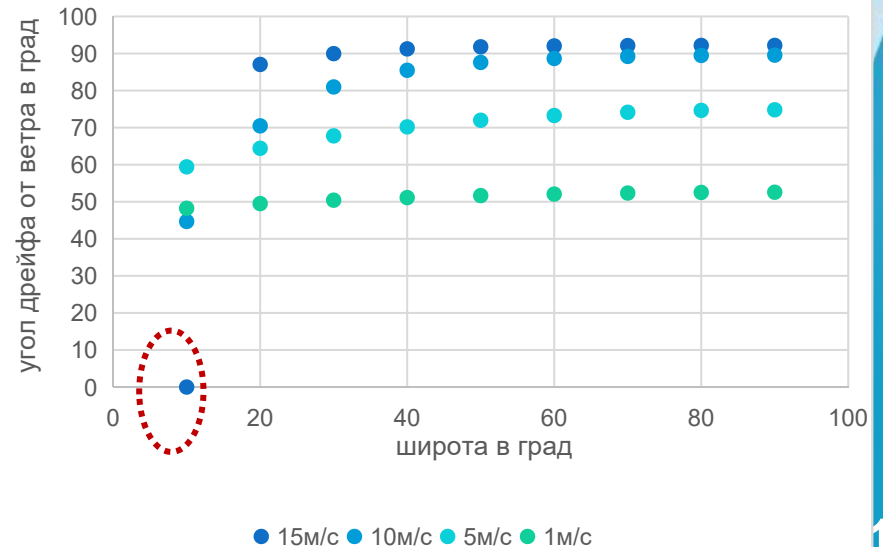
Скорость дрейфа на поверхности моря (м/с)



Скорость смещения слоя MLD (м/с)

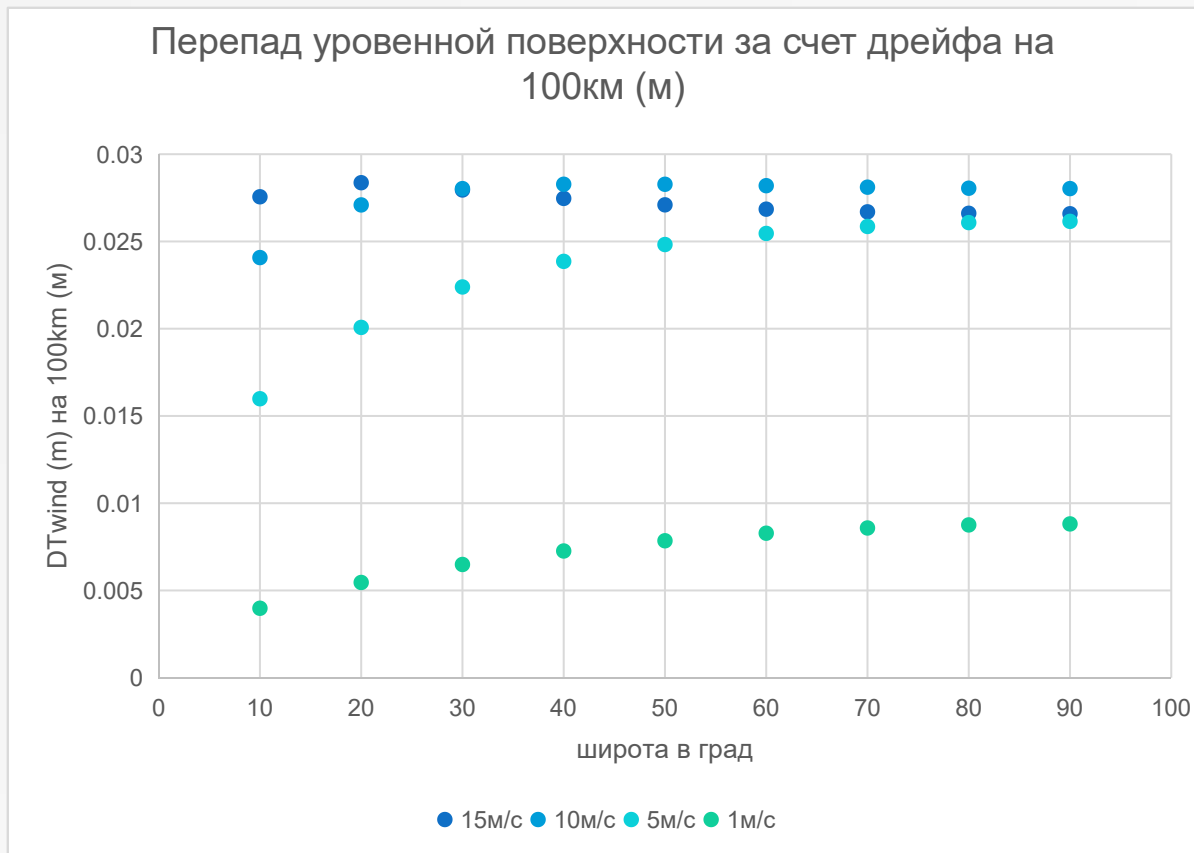


Угол дрейфа от ветра в град



Видно, что средняя скорость ветрового дрейфа на поверхности исследуемой акватории существенно меньше 2% согласно классической теории Экмана и даже меньше 1% от скорости ветра.

Т.е. спутниковые оценки скорости течений по морским маркерам на поверхности моря соответствуют суммарному переносу потока воды в направлении, близком к перпендикулярному от направления ветра, а не течению тонкого слоя на поверхности моря.



**Оценка величины перепада урoвненной поверхности, обусловленная экмановским дрейфом, при худшем направлении ветра, то есть перпендикулярно к направлению, по которому считался перепад урoвненной поверхности моря, сопоставима с точностью альтиметрических измерений 0,03-0,05м.**

# Выводы

В спутниковых оценках скорости перемещений морских маркеров на поверхности моря ветровой (экмановский) дрейф проявляется.

Среднее направление скорости перемещения морских маркеров (SSM) стабильно отклоняется вправо от направления ветра примерно на  $90^\circ$  с большим разбросом.

Величина ветрового дрейфа сильно меньше расчетной. Средняя скорость ветрового дрейфа на поверхности исследуемой акватории существенно меньше 2% согласно классической теории Экмана и даже меньше 1% от скорости ветра.

→ Спутниковые оценки скорости течений по морским маркерам на поверхности моря соответствуют суммарному переносу потока воды в направлении, близком к перпендикулярному от направления ветра, а не течению тонкого слоя на поверхности моря.

→ При росте ветра экмановская компонента дрейфа перемешанного слоя нарастает. Но рост её быстро прекращается, так как с ростом скорости ветрового дрейфа на поверхности растёт и глубина перемешанного слоя.

→ Оценка величины перепада уровенной поверхности, обусловленная экмановским дрейфом, при худшем направлении ветра, то есть перпендикулярно к направлению, по которому считался перепад уровенной поверхности моря, показывает, что величина перепада уровенной поверхности моря за счёт ветрового дрейфа сопоставима с точностью альтиметрических измерений 0,03-0,05м.