

Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция

«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ  
ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга  
окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

Верификация алгоритма определения зон сжатия  
ледяного покрова моря по спутниковым данным  
на примере банки Кашеварова

Алексанина М. Г., Липов И.М.  
Институт автоматки и процессов управления  
Дальневосточного отделения Российской академии наук  
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия



# Расчет сжатия льда на основе скоростей дрейфа льда

Дрейф льда



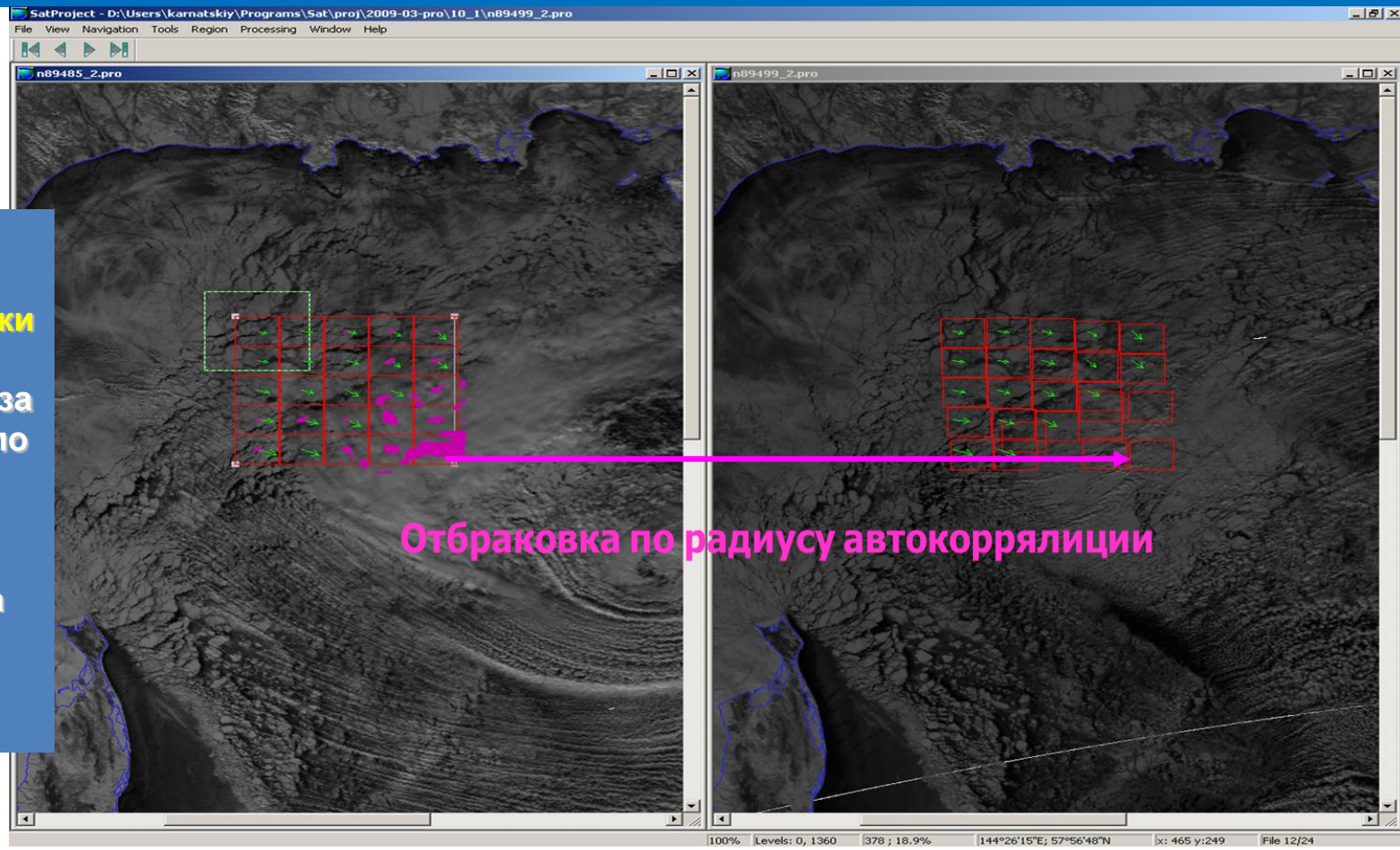
Сжатие  
льда

- Расчет скоростей дрейфа льда, рассматриваемых **как скорости перемещений маркеров**, которые определяются по последовательности изображений с метеорологических спутников в различных диапазонах спектра
- **Локальный показатель сжатия/разрежения** рассматривается как **скорость изменения расстояния между отдельными элементами ледяного покрова моря**. Определяется двумя параметрами — скалярной величиной и направлением оси сжатия/разрежения.



# Дрейф льда - расчет скоростей перемещений ледового покрова моря

**Использование критерия априорной оценки точности** примерно в 2 раза уменьшило число неверно отбракованных скоростей, при этом в 1.5-2 раза увеличил число отбракованных правильно.



Рассчитывается скорость перемещения ледовых полей по временной последовательности спутниковых изображений на основе методики, изложенной в работе

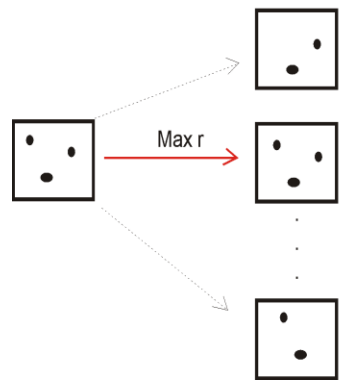
- Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Карнацкий А.Ю. Автоматический расчет скоростей перемещений ледовых полей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.2011.Т.8. №2.С.9-17.



# В основе расчета скоростей – метод максимальной кросс-корреляции (МКК)

Поиск на 2-м изображении наиболее похожего образа окна-шаблона – выбор того вектора, который отражает перемещение структуры

1 Изображение      2 Изображение



## Функция кросс-корреляции

**A, B – яркости пикселей изображений**

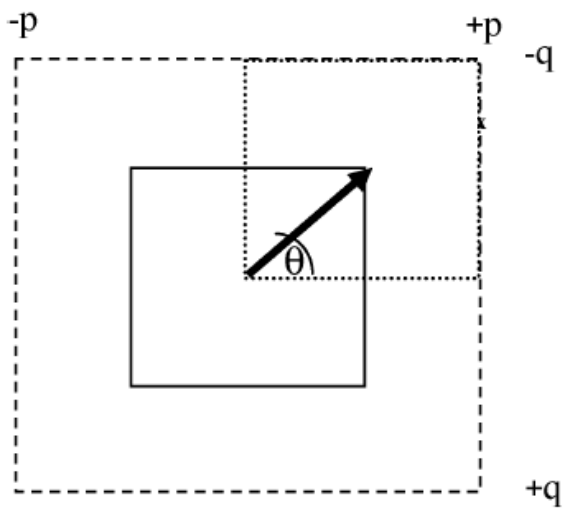
$$r(p, q) = \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} \times \sum_y \sum_x \{ [A(x, y) - \bar{A}] \cdot [B(x + p, y + q) - \bar{B}] \} = \frac{Cov(p, q)}{\sigma_A \sigma_B}$$

## Скорость перемещения

$$v = \frac{[(p_{\max} \Delta x)^2 + (q_{\max} \Delta y)^2]^{1/2}}{\Delta t}$$

## Угол направления перемещения

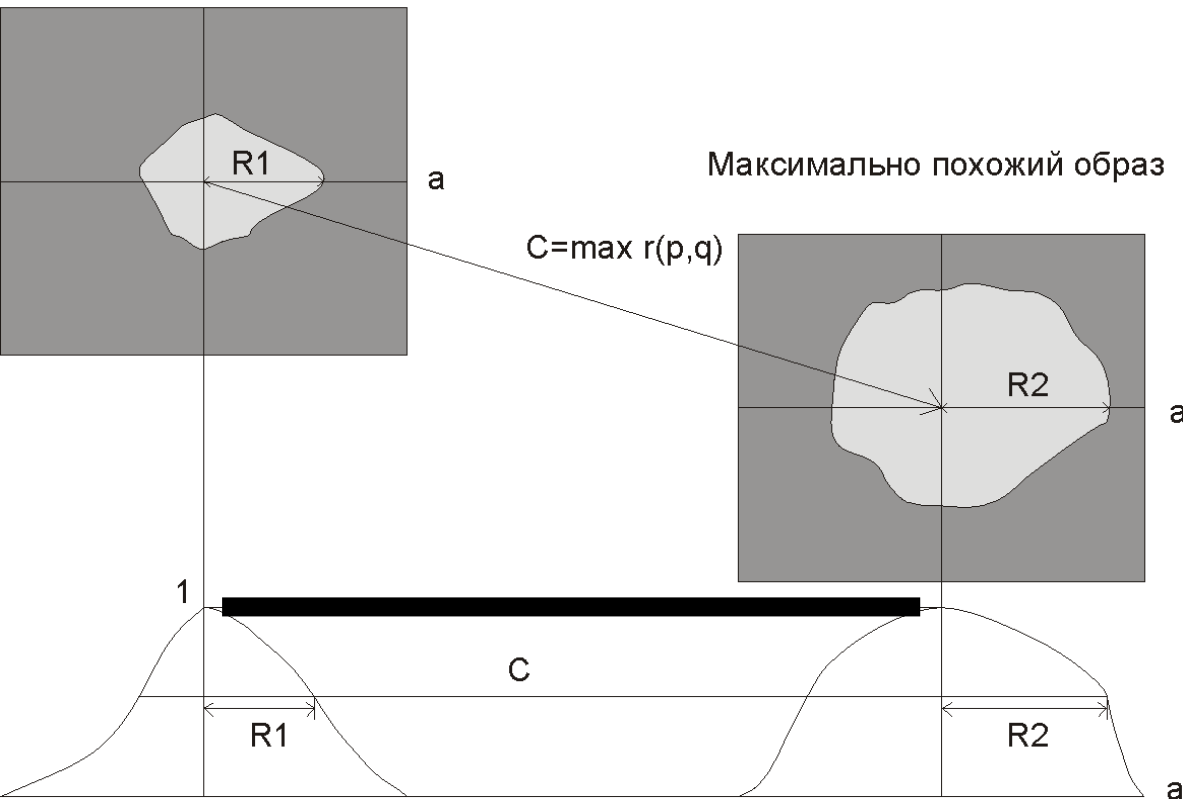
$$\theta = \arctan(q_{\max} \Delta y / p_{\max} \Delta x)$$





# Сущность модификации – отбраковка векторов по критерию «априорной точности»

Окно-шаблон



- Автокорреляция – характеристика схожести области самой себе

- Пусть  $R^* = \max(R1, R2) / \Delta t$  при  $C = \max r(p, q)$

- Зададим порог  $P$

**Если  $R^* < P$ , перемещение удовлетворяет нас с заданной точностью, иначе - вектор удаляется**



# Критерий сходства двух изображений \*

\*Wangand Z., Bovik A.C. A universal image quality index // IEEE Signal Processing Letters. 2002. Vol. 9. P. 81–84.

## Модифицированный критерий сходства изображений

*мера похожести*  $K = r^\alpha \cdot E^\beta \cdot S^\gamma$

Коэффициент корреляции  $r(p, q)$

Нормированное рассогласование яркостей  $E(p, q)$ :

где  $I$  – яркость пиксела

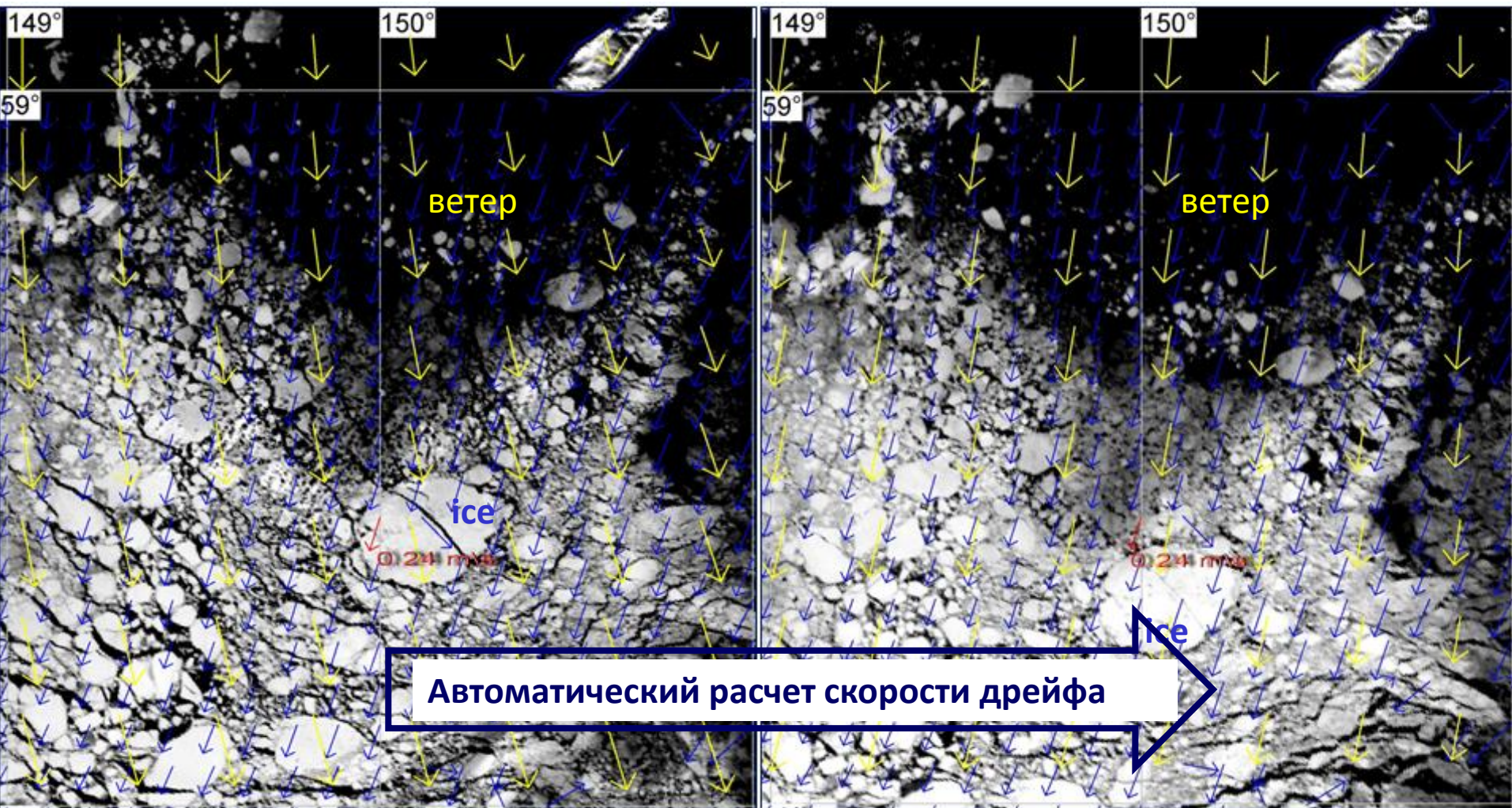
$$E(p, q) = 1 - \frac{1}{e_1 + e_2} \times \sum_j \sum_i |[I(i, j) - \bar{I}1] - [I(i + p, j + q) - \bar{I}2]|$$
$$e_1 = \sum_j \sum_i |I(i, j) - \bar{I}1| \quad e_2 = \sum_j \sum_i |I(i + p, j + q) - \bar{I}2|$$

Дисперсия  $S$

$$S(p, q) = \frac{2\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$



# Скорость дрейфа по паре спутниковых изображений с интервалом в 24 часа



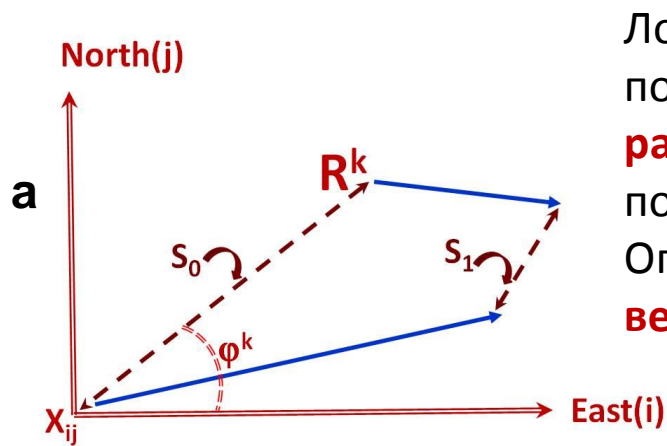
Спутниковые изображения ( радиометр MODIS) Охотского моря за 5 и 6 апреля 2010  
Пространственное разрешение ~ 250m временной интервал  $\Delta t \sim 24h$



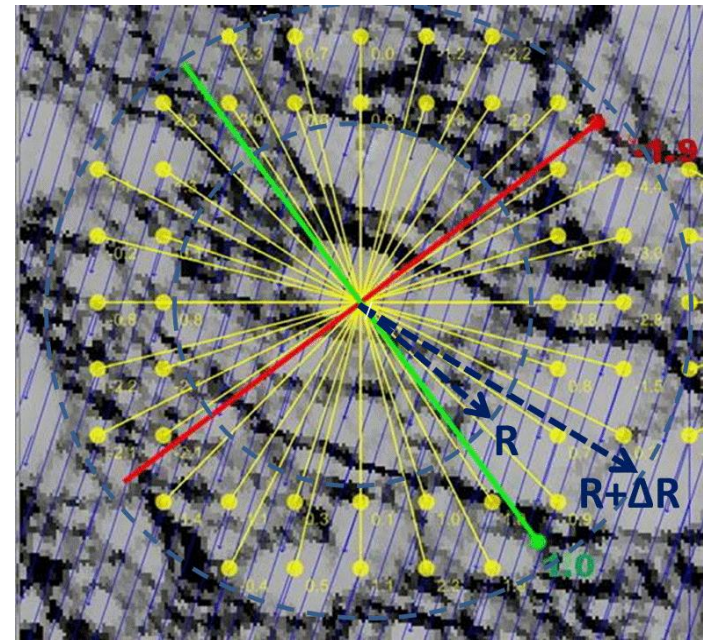
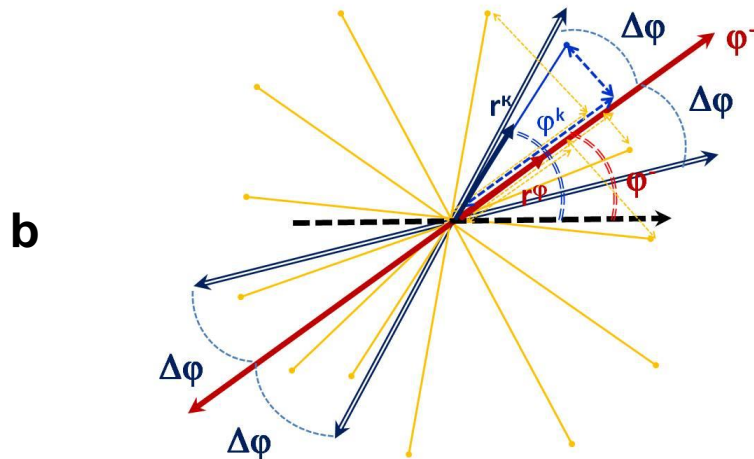
# Подход к расчету сжатия льда на основе скоростей дрейфа\*

А. И. Алексанин, М.Г. Алексанина, А.Ю. Карнацкий

Расчет сжатия ледяного покрова моря по спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 210–224



Локальный **показатель сжатия** и разрежения ледяного покрова моря рассматривается как **скорость изменения расстояния** между отдельными элементами ледяного покрова моря  $S_0$  и  $S_1$ .  
 Определяется **двумя параметрами** — **скалярной величиной** и **направлением** оси сжатия/разрежения.



- a) Расчет локального сжатия  $S_{ij}^k$ ;
- b) расчет сжатия на основе локальных оценок;
- c) «роза» локальных сжатий в окрестности точки расчета с радиусами  $R$  и  $R+\Delta R$ .

**Красная линия** – направление сжатия, **зеленая** – направление растяжения.





# Оцениваемые параметры сжатия ледового покрытия моря

## Локальное сжатие –

изменчивость вектора  $R^k$  со временем:

$$C_{ij}^k = (S_1 - S_0) / \Delta t, \quad (1)$$

$\Delta t$  – временной интервал между изображениями,

$S_0, S_1$  – длины  $R^k$ .

## Ориентация оси сжатия.

Угол направления  $\varphi$ :  $C^\varphi = \min 1/N \sum C^k \cdot (r^\varphi \cdot r^k),$

$\varphi$

## Скалярная величины сжатия:

$$C^- = 1/n * \sum C^k / \cos(\varphi^- - \varphi^k) \quad |\varphi^- - \varphi^k| < \Delta \varphi$$

## Относительная ошибка расчета сжатия:

$$\Delta C^- / C^- = \sigma_C^- * t_{f,0.95} / \sqrt{n} / C^- = \alpha, \quad t_{f,0.95} - \text{Student coefficient for } f=n-1$$

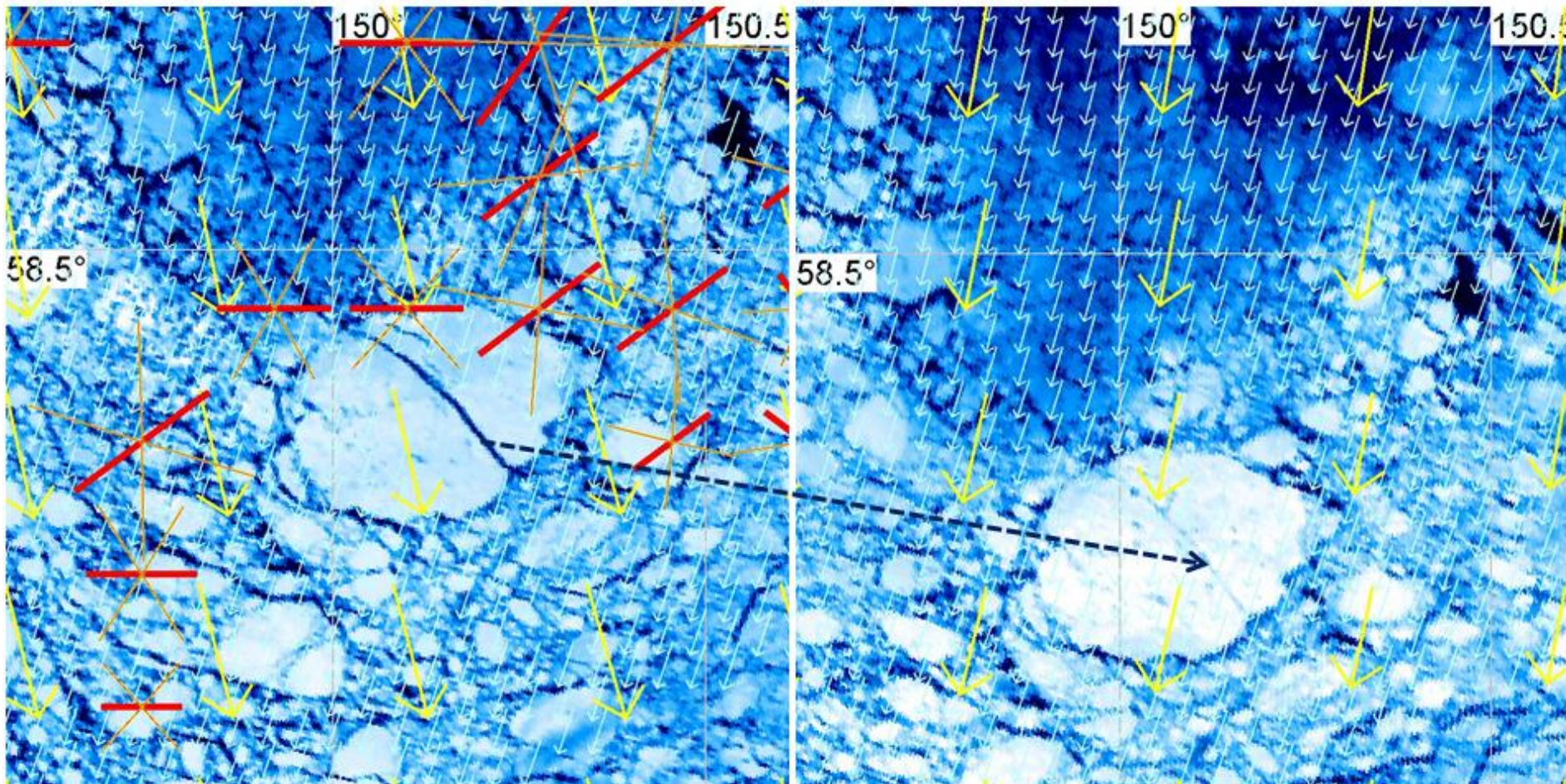
## Оценка ошибки расчета направления $\Delta \varphi^-$ :

$$C^- - C^- \cdot \cos \Delta \varphi^- = \alpha C^- \quad \Rightarrow \quad \Delta \varphi^- = \arccos(1 - \alpha)$$



# Пример визуально наблюдаемого сжатия

ледового покрова моря на фрагментах спутниковых изображений MODIS\AQUA:  
слева — за 5 апреля 2010, справа — за 6 апреля 2010 года.



**Красные отрезки** — статистически значимые оси сжатия

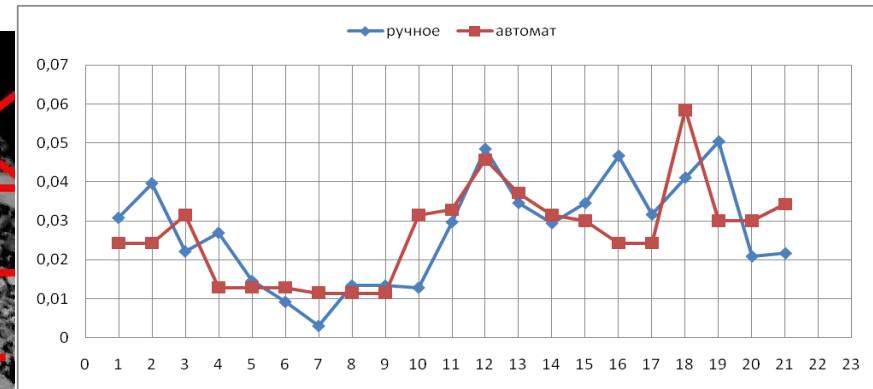
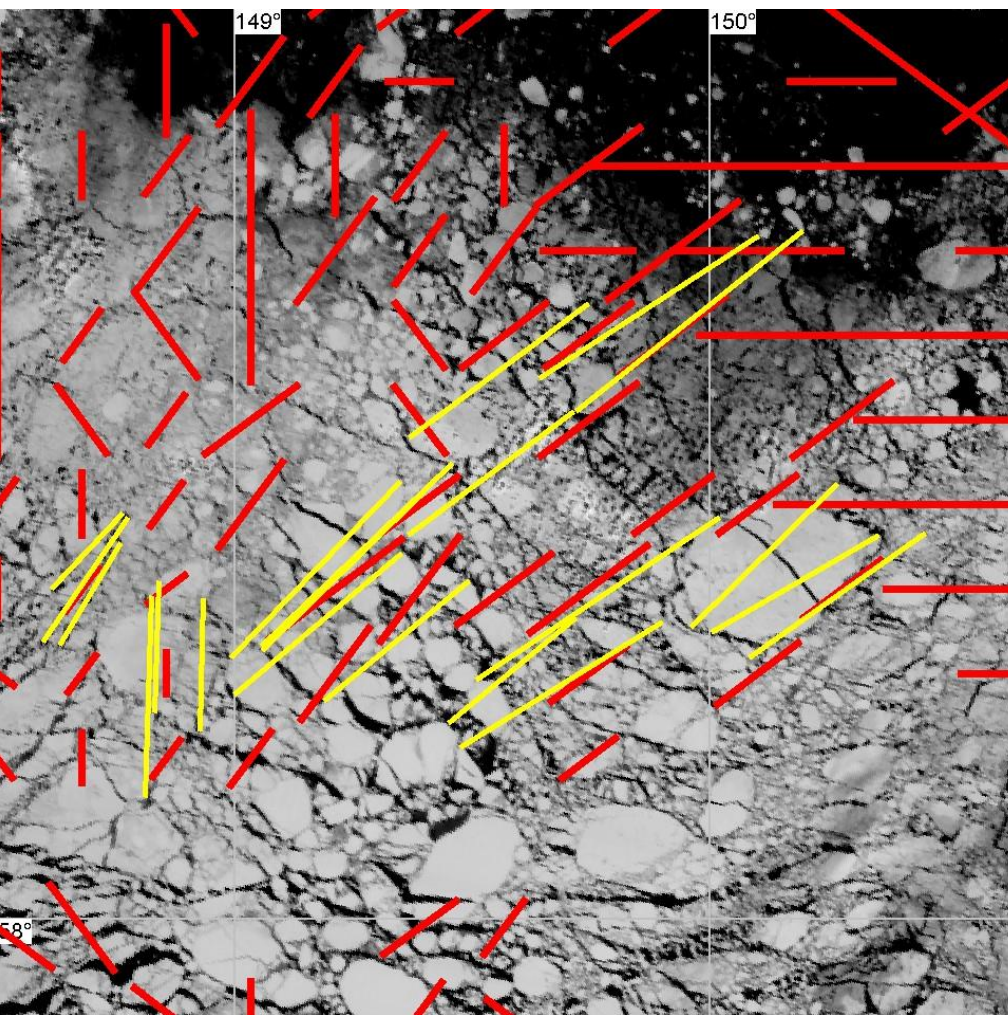
**Желтые вектора** — скорости ветра,

**голубые вектора** — автоматически рассчитанные скорости дрейфа.

**Тонкими желто-красными линиями** обозначен допустимый створ ориентации оси сжатия  $\Delta\varphi$ .



# Сопоставление визуального и автоматического подходов



Сравнение показателей относительного сжатия визуального-ручного подхода и автоматического. (Синим цветом – сжатие визуального –ручным подходом, красным цветом – сжатие автоматического подхода)

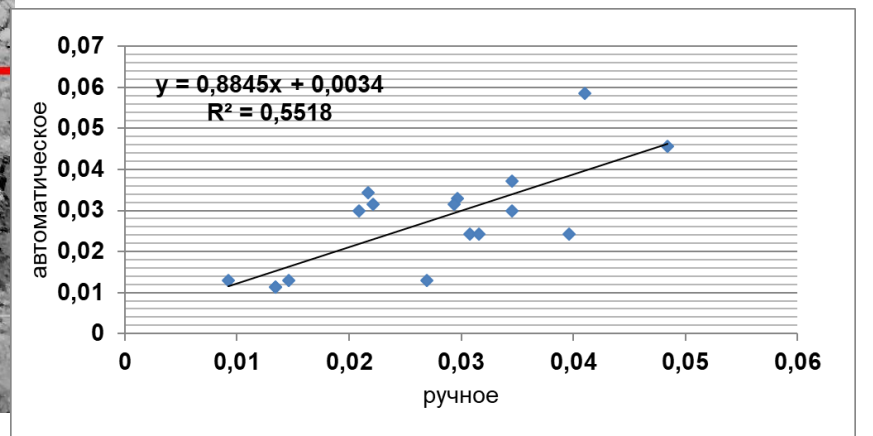
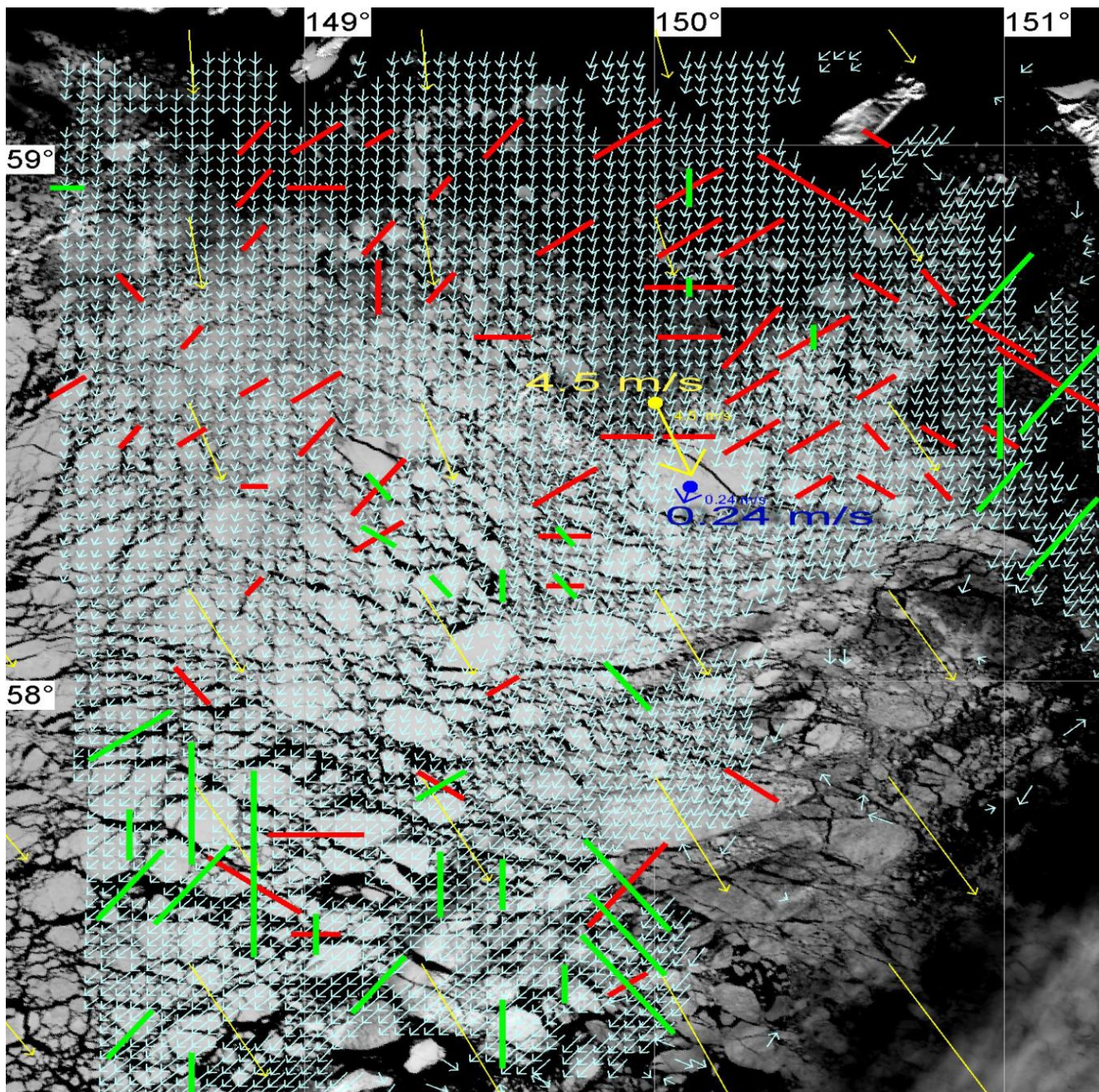


График соответствия сжатия, рассчитанного визуально-ручным методом и автоматическим методом, для сопоставимых по длине отрезков.

**Красным** цветом показатели сжатия льда, рассчитанные **автоматическим** методом, **желтым** цветом - расчет **визуально-ручным** методом. Длины отрезков между маркерами примерно равны.

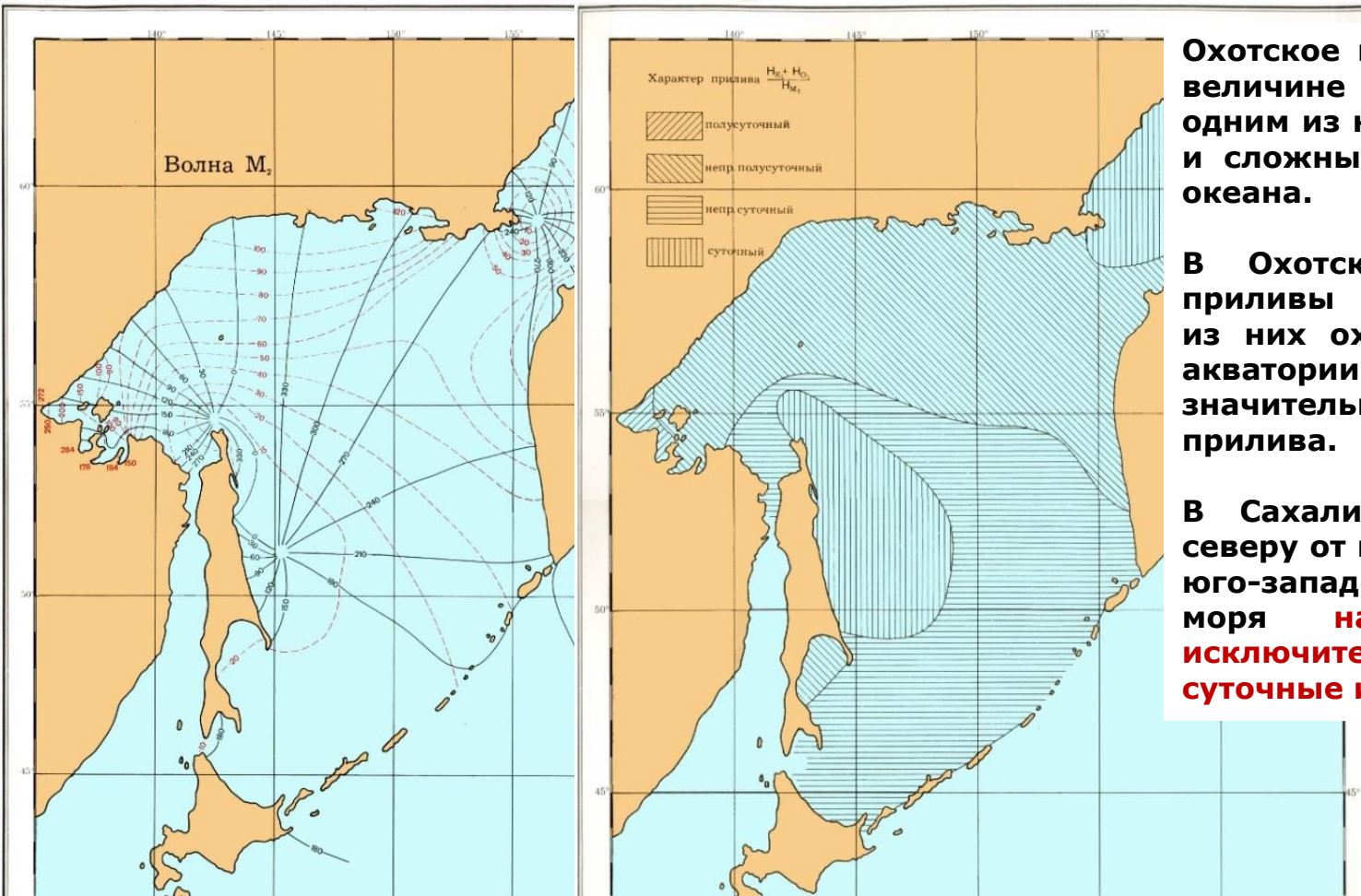


Результат автоматического выявления зон сжатий (красный цвет) и разрежений (зеленый цвет) по векторам дрейфа при допустимой относительной ошибке  $\alpha=0,5$  ( интервал времени 24 часа)



# Приливы в Охотском море

АТЛАС ПО ОКЕАНОГРАФИИ БЕРИНГОВА, ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО МОРЕЙ  
(ТОИ ДВО РАН) [http://pacificinfo.ru/data/cdrom/2/HTML/5\\_02\\_09.htm](http://pacificinfo.ru/data/cdrom/2/HTML/5_02_09.htm)



Охотское море по характеру и величине приливов является одним из наиболее интересных и сложных районов Мирового океана.

В Охотском море имеются приливы всех типов, каждый из них охватывает обширные акватории и характеризуется значительными величинами прилива.

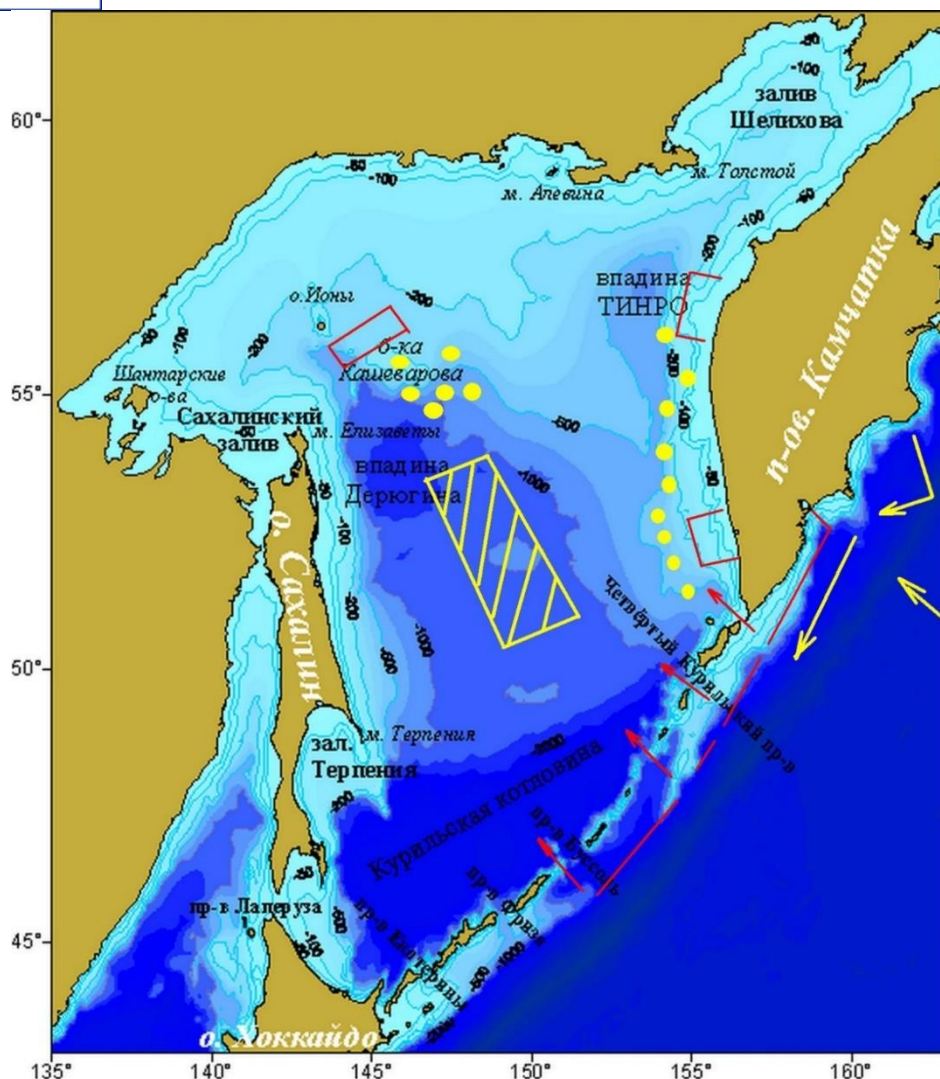
В Сахалинском заливе и к северу от него, а также во всей юго-западной части Охотского моря **наблюдаются почти исключительно неправильные суточные и суточные приливы.**

*\*Тихончук, Елена Александровна.  
Приливной и ветровой дрейф льда и деформации ледяного покрова на северо-восточном шельфе о. Сахалин : Дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29. - Южно-Сахалинск: РГБ, 2006.*

Особенности дрейфа льда в прибрежной зоне, связанные с влиянием приливов, и в еще большей степени обусловленные ими деформации ледяного покрова являются сравнительно малоизученными вопросами \*



# Банка Кашеварова в Охотском море



\*Тихончук, Елена Александровна.  
Приливной и ветровой дрейф льда и деформации ледяного покрова на северо-восточном шельфе о. Сахалин : Дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29. - Южно-Сахалинск: РГБ, 2006.

В центре Охотского моря, между Сахалином и Камчаткой, располагается вытянутое на 200 километров поднятие дна - банка Кашеварова.

**Высокие скорости дрейфа льда в рассматриваемом районе в значительной мере обусловлены влиянием суточных приливов**

Суточный ритм прилива проявляется значительно сильнее полусуточного. Скорость приливного течения в районе банки Кашеварова изменяется от 0,1 до 1,7 метров в секунду в зависимости от времени суток и склонения Луны.

**Выявлена значительная пространственная неоднородность приливного дрейфа льда.**

Максимальное разрежение происходит во время отлива, максимальное сжатие - во время прилива.

В большинстве случаев наличие процесса растяжения соответствует южному и юго-восточному направлениям скорости дрейфа, а процесса сжатия - северо-западному. \*

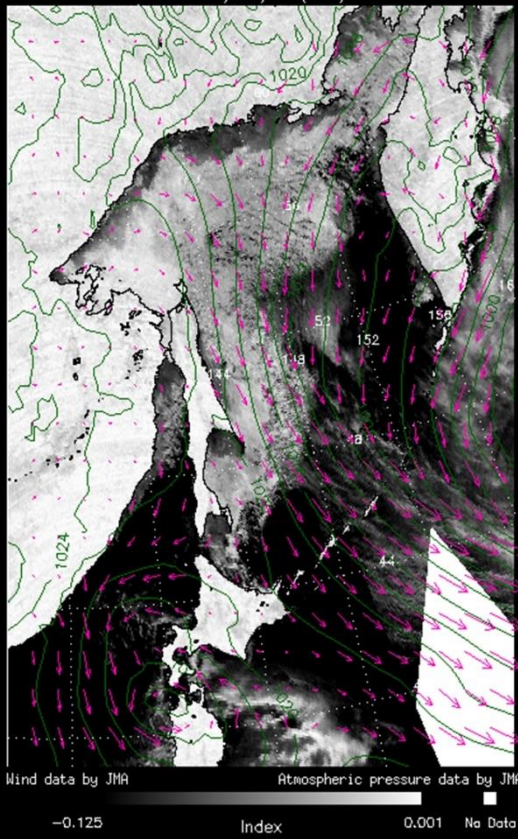


# Ветер у Банка Кашеварова 3-5 марта 2016

2016/03/03 GCOM-W/AMSR2 [Okhotsk]  
89GHz Polarization Ratio(PR89)

Atmospheric Data Overlay : Pres Wind

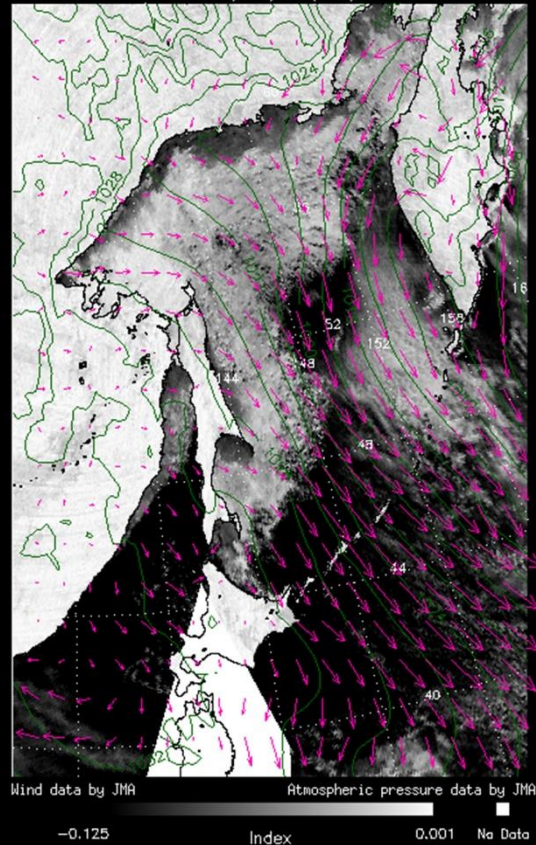
AMSR2/89GHz Polarization Ratio  
2016/03/03(JST)



2016/03/04 GCOM-W/AMSR2 [Okhotsk]  
89GHz Polarization Ratio(PR89)

Atmospheric Data Overlay : Pres Wind

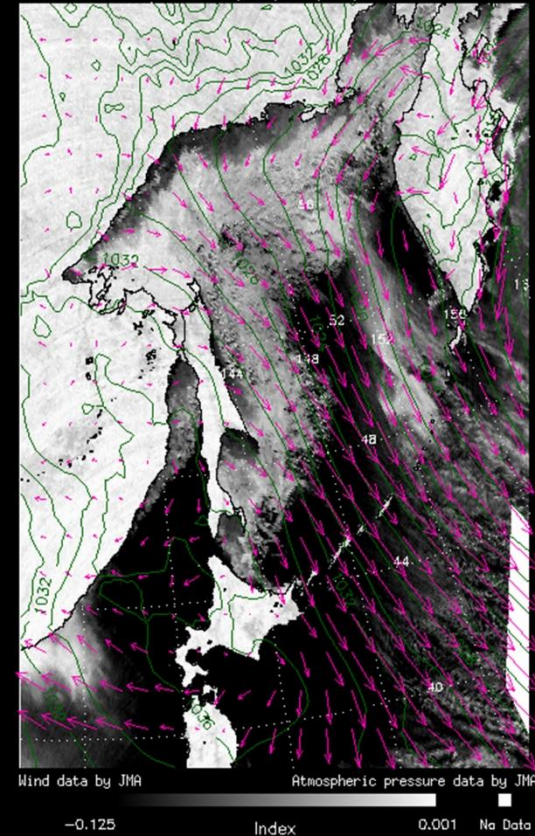
AMSR2/89GHz Polarization Ratio  
2016/03/04(JST)



2016/03/05 GCOM-W/AMSR2 [Okhotsk]  
89GHz Polarization Ratio(PR89)

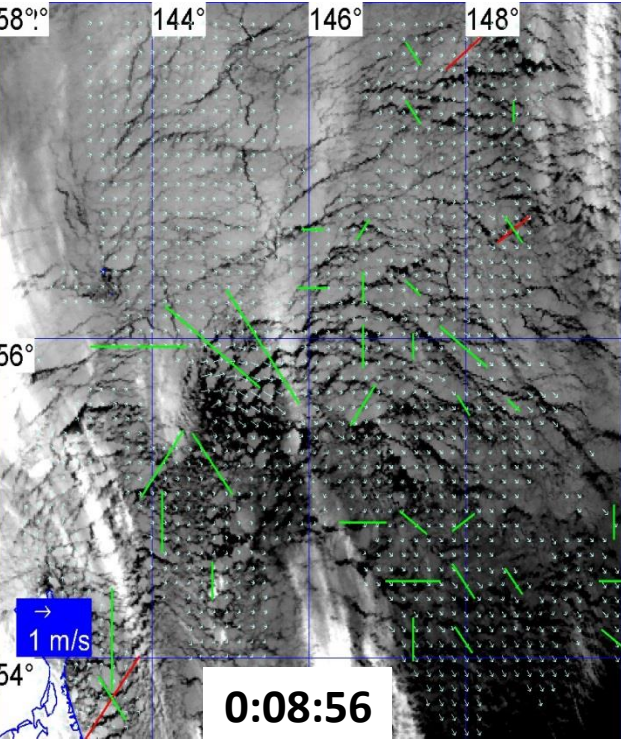
Atmospheric Data Overlay : Pres Wind

AMSR2/89GHz Polarization Ratio  
2016/03/05(JST)

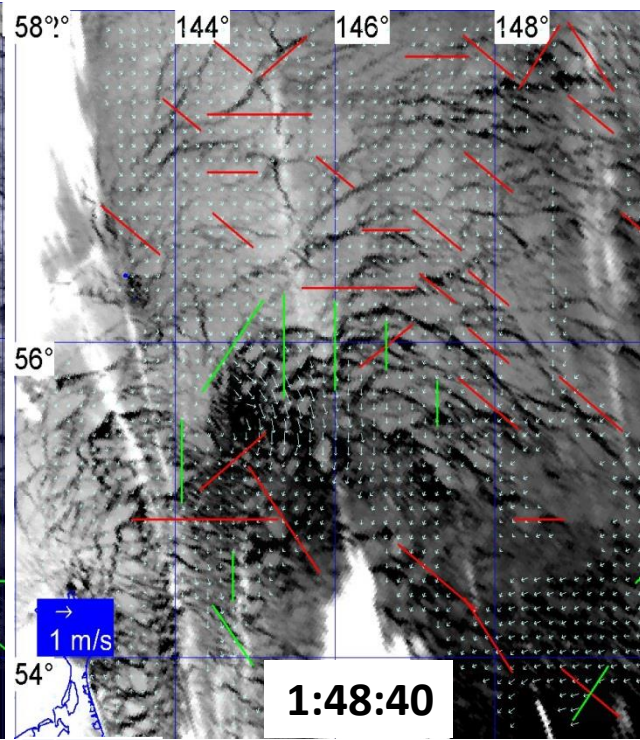




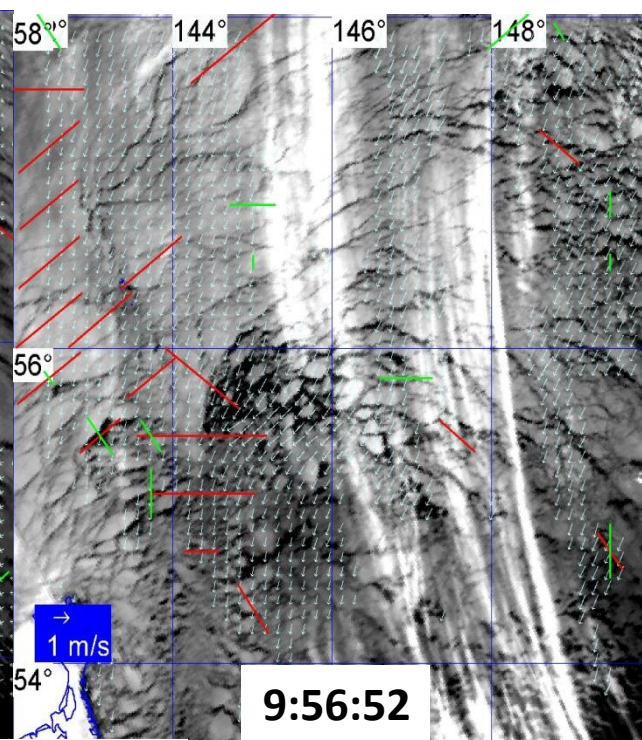
# Сжатия за 4 марта 2016 интервал времени $\Delta t < 2:00$



0:08:56



1:48:40



9:56:52

- 1 0:08:56
- 2 1:48:40

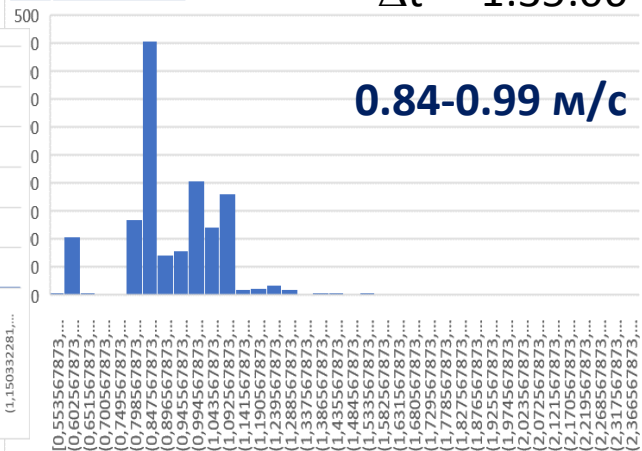
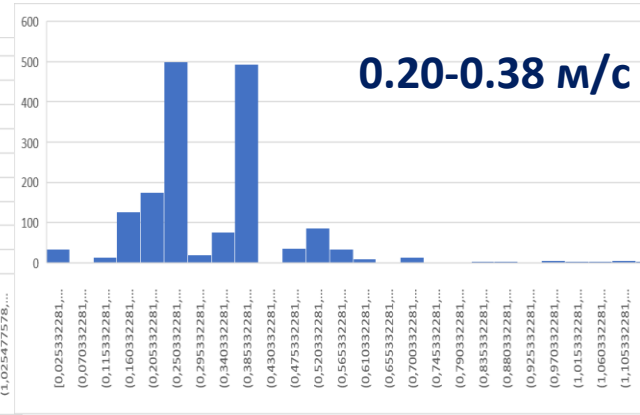
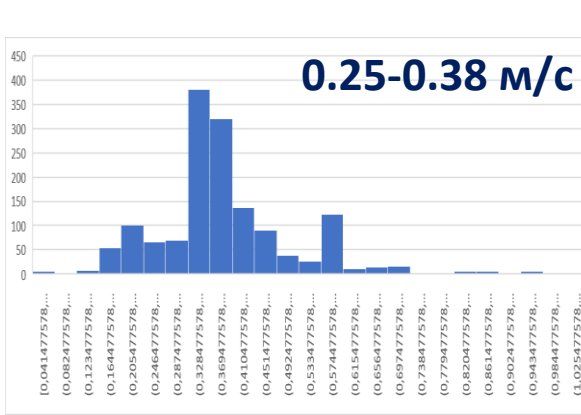
$\Delta t = 1:39:44$

- 2 1:48:40
- 3 3:41:20

$\Delta t = 1:52:40$

- 5 9:56:52
- 6 11:31:58

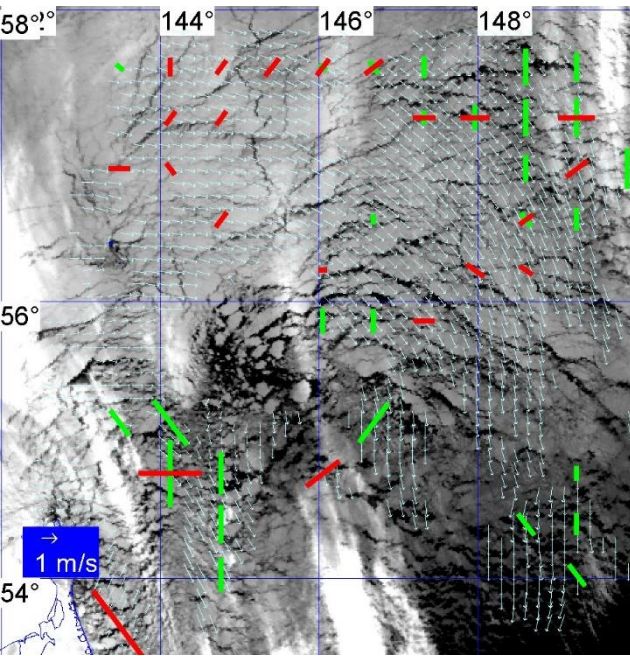
$\Delta t = 1:35:06$



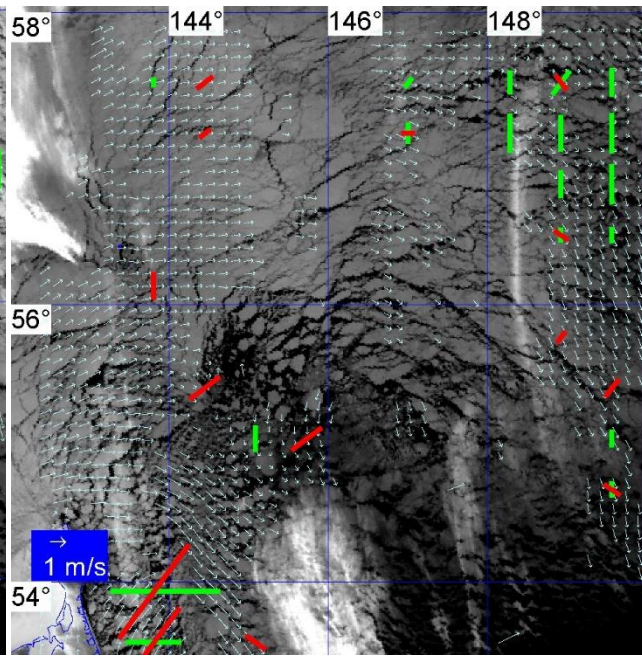




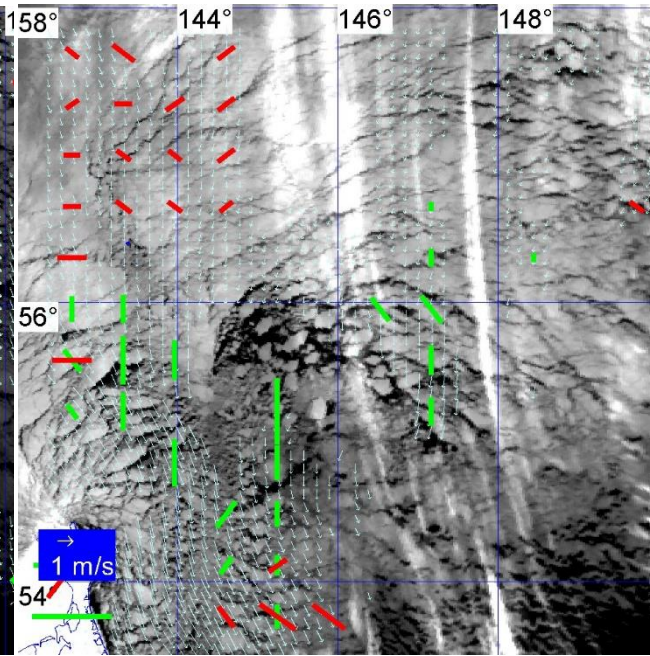
# Сжатия за 4 марта 2016 интервал времени $\Delta t < 7: 00$



0:08:56



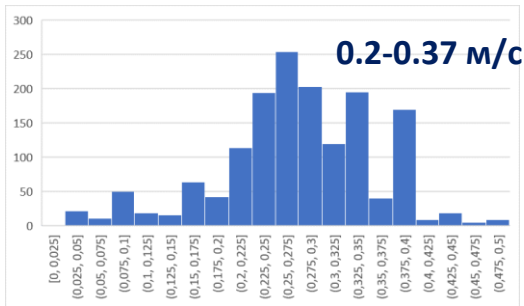
3:41:20



11:31:58

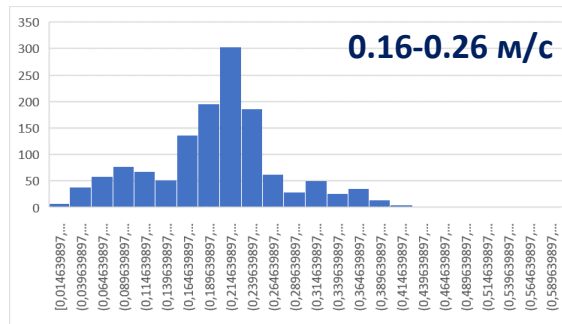
1	0:08:56
4	6:52:50

$\Delta t = 6:43:54$



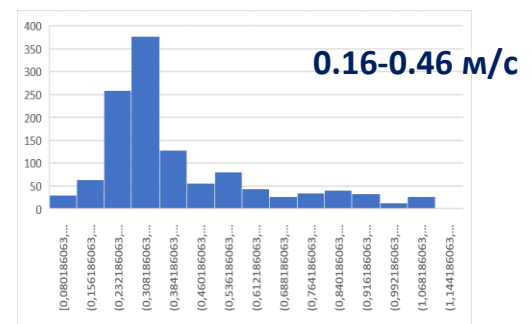
3	3:41:20
5	9:56:52

$\Delta t = 6:15:32$



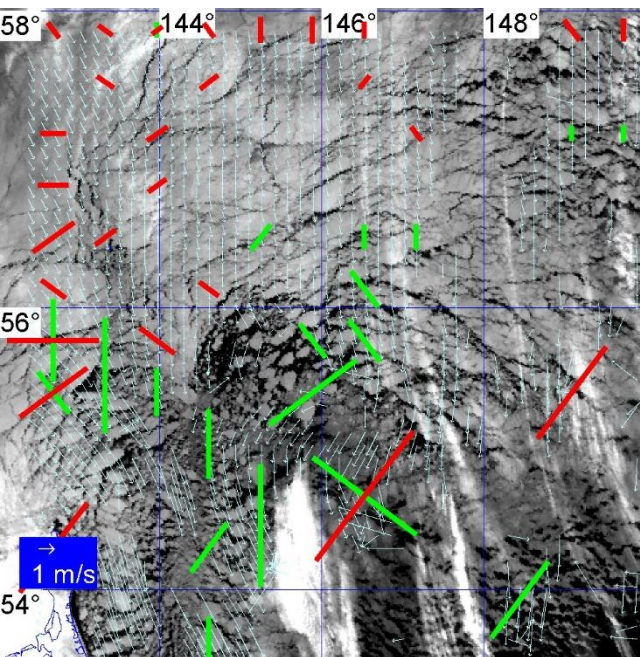
6	11:31:58
7	17:41:33

$\Delta t = 6:09:35$

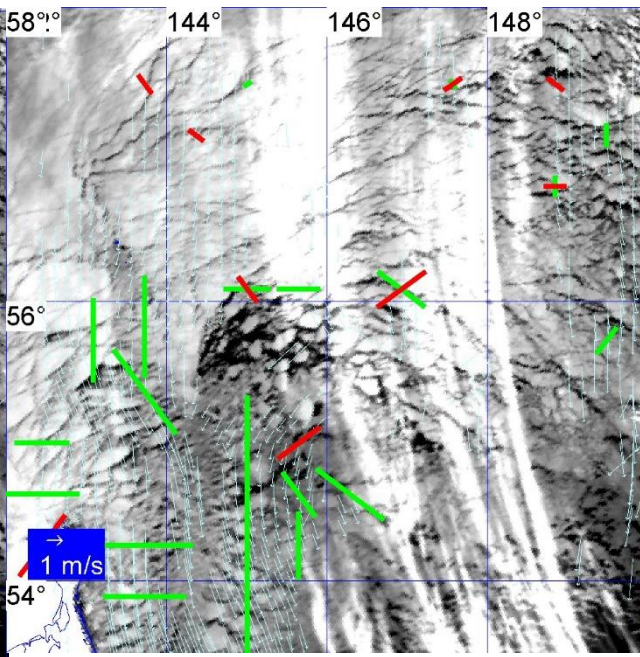




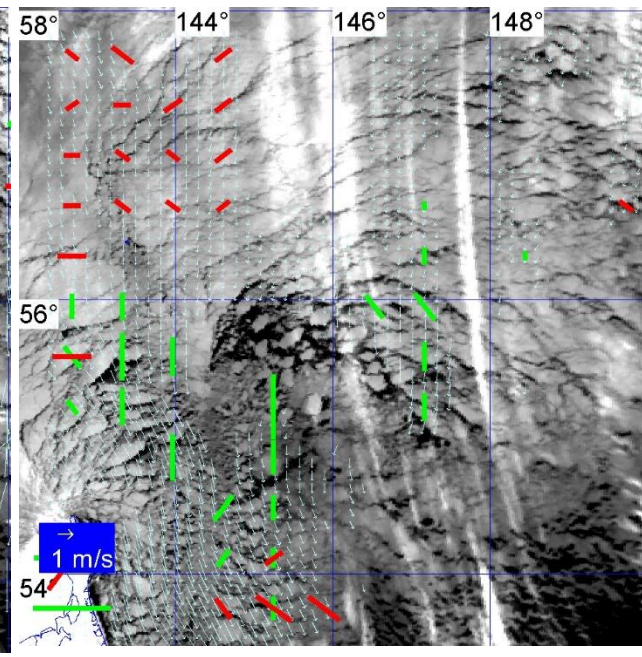
# Сжатия за 4 марта 2016 интервал времени $\Delta t < 14:00$



6:52:50



9:56:52

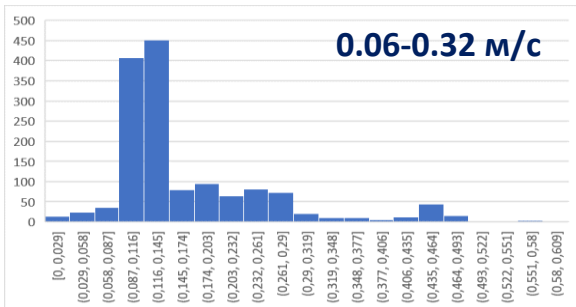


11:31:58

6:52:50  
20:52:40

$\Delta t = 13:59:50$

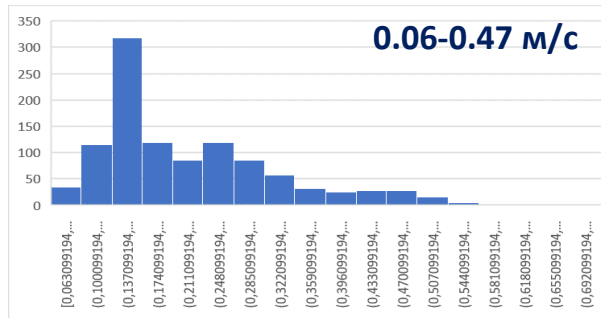
0.06-0.32 м/с



9:56:52  
23:48:40

$\Delta t = 13:51:48$

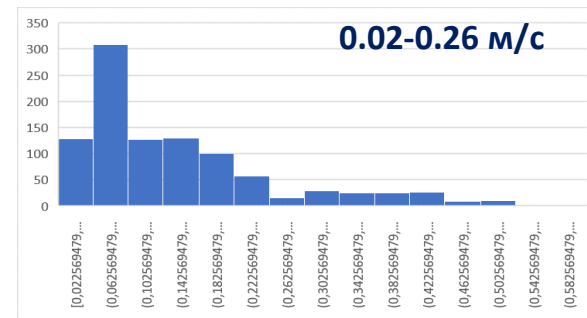
0.06-0.47 м/с



11:31:58  
23:48:40

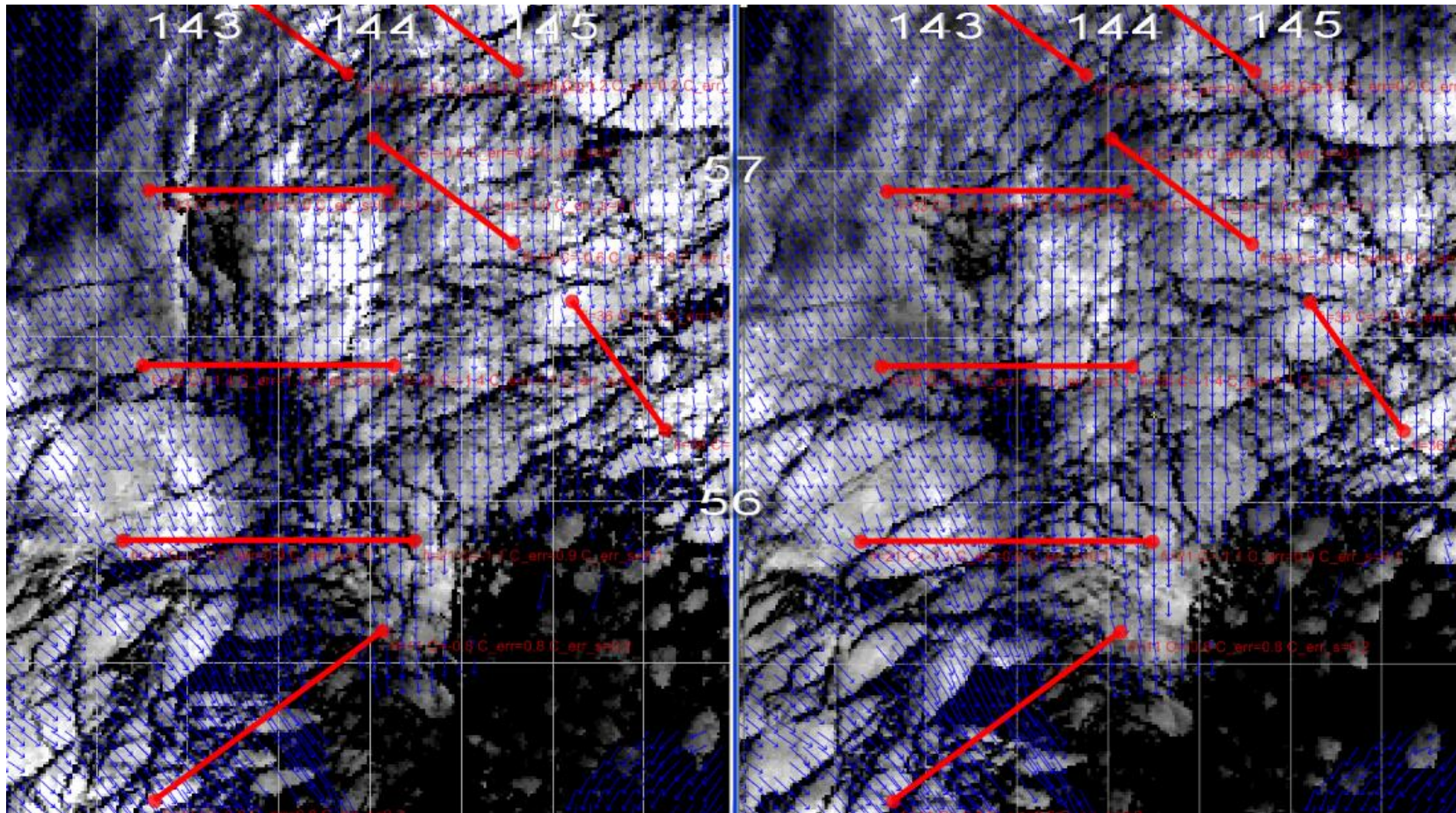
$\Delta t = 12:16:42$

0.02-0.26 м/с





# Фрагмент сжатия в марте 2016 около банки Кашеварова





## Заключение

- Наблюдается **хорошее количественное соответствие** визуальной картины и результатов автоматического расчета сжатия\разрежения льда.
- Картина сжатия \разрежения в течение некоторого времени демонстрирует **физичность сжатия\разрежения** льда, когда используются квазимгновенные сжатия, рассчитанные по двум изображениям с интервалом времен около 1.5 часов.
- Банка Кашеварова -сложный район, т.к. в одном месте разные типы приливов – от полусуточных до суточных, правильных и неправильных. Чтобы интерпретировать расчетные сжатия\разрежения льда на банке Кашеварова при других расчетных временных интервалах скорости дрейфа - необходимо **предварительно определить границы с разными приливными характеристиками.**



Спасибо за внимание !

