



Двадцать вторая международная конференция  
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

11-14 ноября 2024

Определение толщины приповерхностного слоя моря,  
в котором формируются субмезомасштабные вихревые  
структуры в спутниковых данных о цвете моря



Липинская Н.А., Салюк П.А.,  
Буланов А.В., Горбов М.И.,  
Гаревских Г.П., Шмыков Н.В.

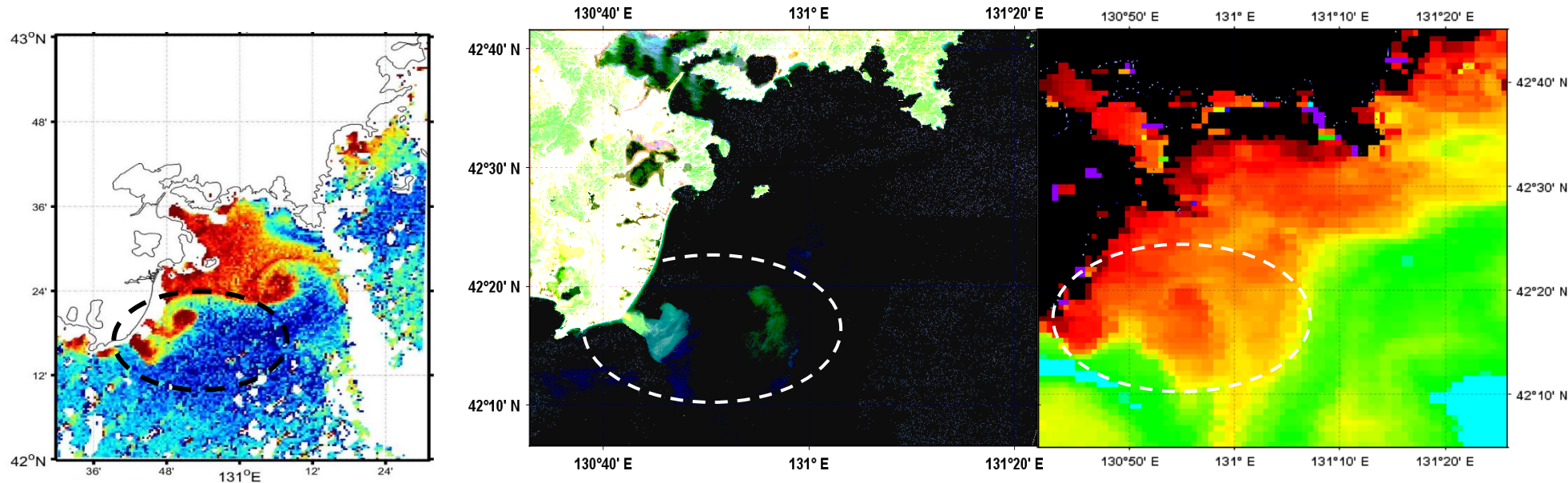
г. Москва

ТОИ ДВО РАН

**Цель исследования** заключается в разработке методов определения значимых контрастов в спутниковых данных о цвете океана, возникающих в условиях субмезомасштабных вихревых структур, а также в выявлении соответствующих глубин верхнего слоя моря, где эти контрасты формируются

**Проблема:**

Вихри малых масштабов достаточно сложны для исследования с помощью контактных измерений или с помощью спутниковых изображений низкого пространственного разрешения. В связи с чем, необходимо усовершенствовать уже имеющиеся алгоритмы и методы идентификации как самих вихрей так и определение их характерных особенностей и различных параметров.

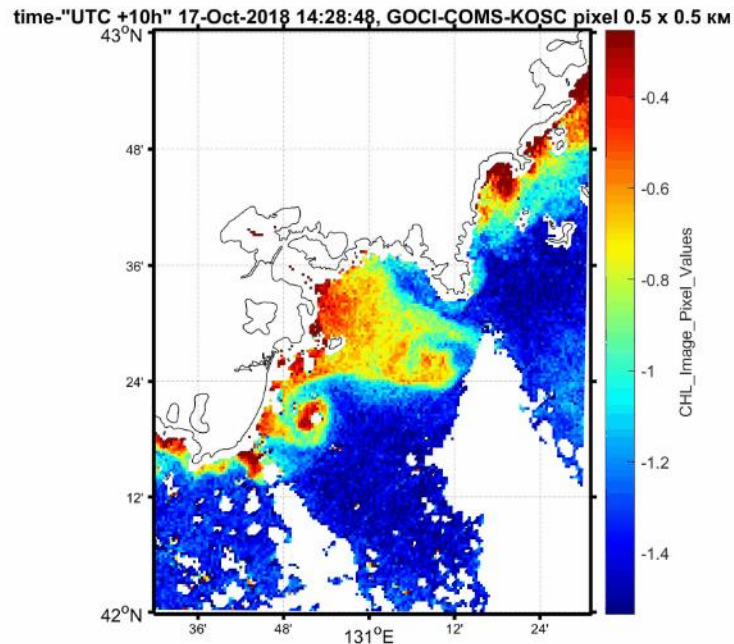


Высокое разрешение

Низкое разрешение

## Задачи:

- Выполнить анализ изменчивости биооптических характеристик приповерхностного слоя моря при воздействием вихря;
- Настроить и адаптировать набор численных моделей для расчета спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря;
- Рассчитать коэффициенты яркости восходящего излучения моря в вихре;
- Оценить максимальную глубину, на которой структура вихря проявляется в дистанционных спектральных данных наблюдений цвета моря.



Потенциальное практическое применение этих исследований охватывает несколько аспектов, которые имеют значение как для науки, так и для различных отраслей:

- **Исследования океанографических процессов;**
- **Моделирование и прогнозирование;**
- **Управление рыболовством;**
- **Навигация и морская безопасность;**
- **Экологический мониторинг.**

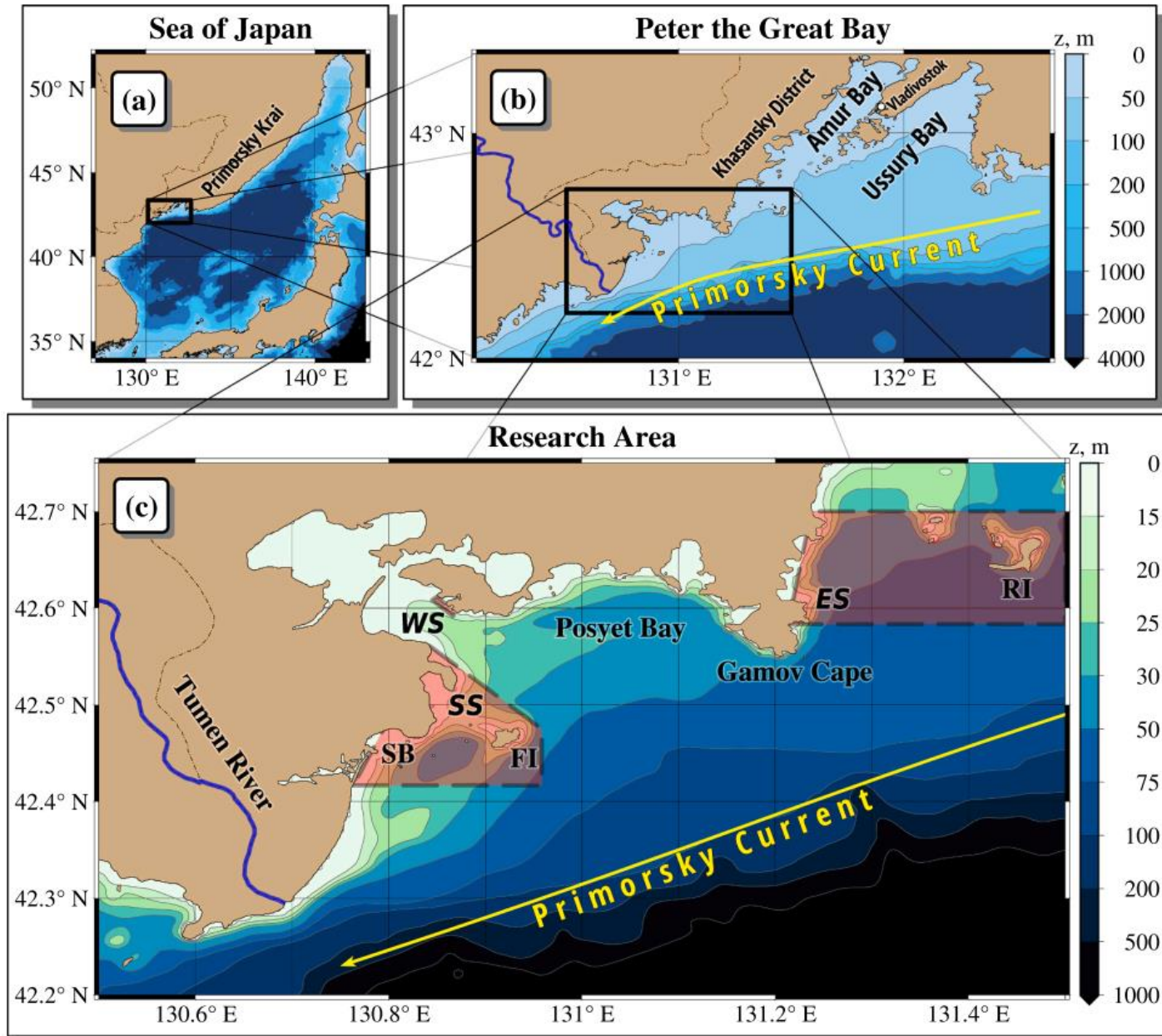


# Данные

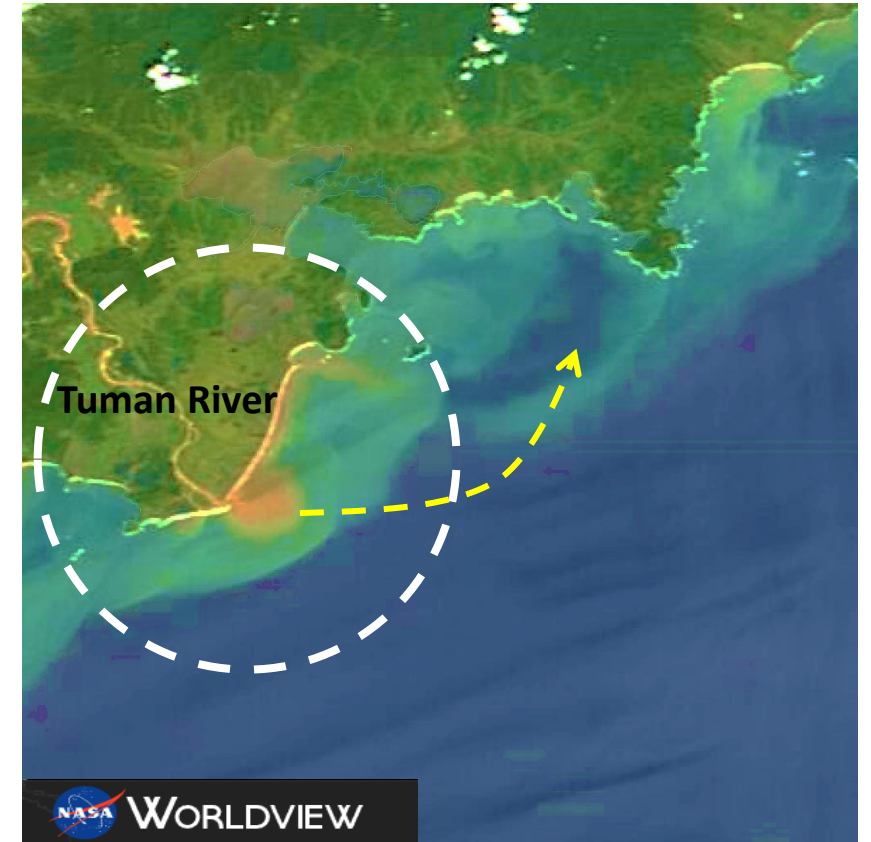
- *in situ* данные с погружного гидрологического CTD-зонда SeaBird SBE 19plus с флуоресцентными датчиками концентрации хлорофилла-а и ОРОВ;
- спутниковые данные 2 уровня среднего пространственного разрешения спектрорадиометров MODIS – Terra/Aqua в полях биооптических характеристик из видимого спектрального диапазона и температуры поверхности моря;
- Дистанционные измерения спектров коэффициентов яркости моря ( $R_{rs}$ ) с борта судна с помощью ручного гиперспектрального радиометра ASD FieldSpec Hand Held.



# Район исследования

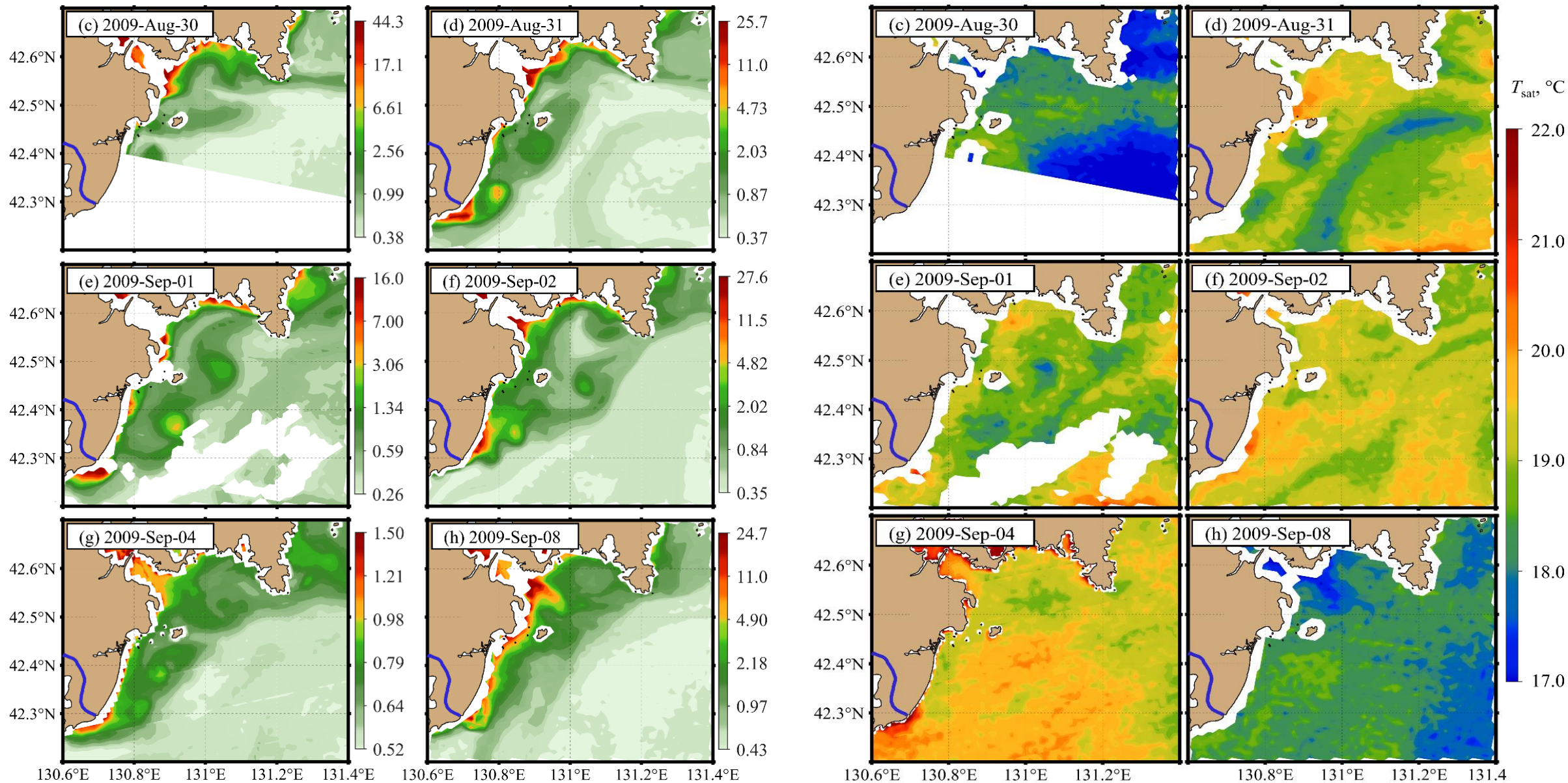


Сток р. Туманной на спутниковом изображении в сентябре



В водном стоке р. Туманной отмечаются различные загрязняющие вещества (Ткалин 1991, Вышкварцев 1997), которые вместе с вихрями могут достигать побережья полуострова Гамова.

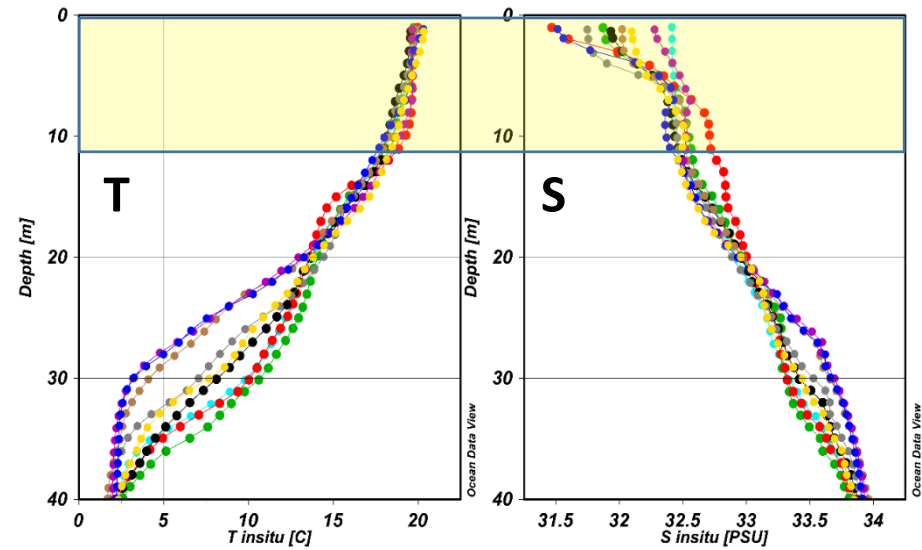
# Спутниковые данные



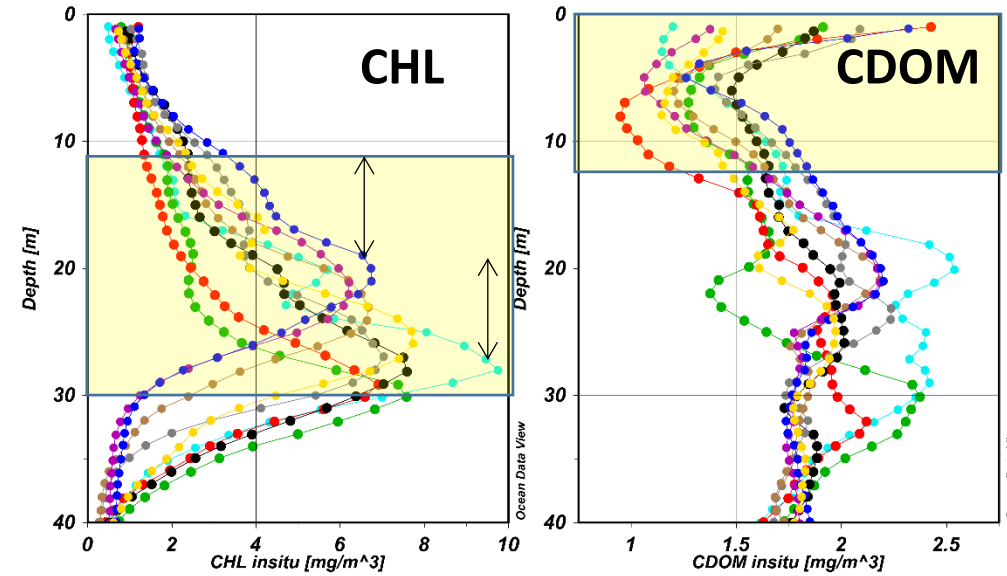
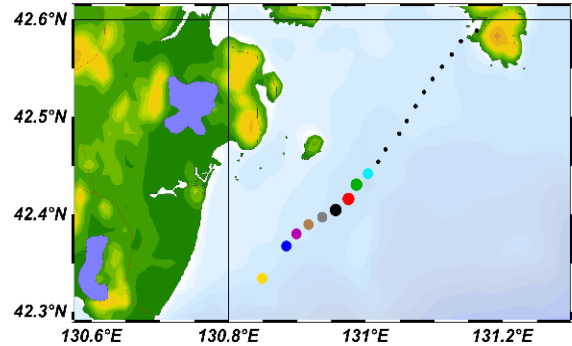
Серия спутниковых изображений в южной части ЗПВ с 30.08.2009 по 04.09.2009

в полях концентрации хл-а и sst.

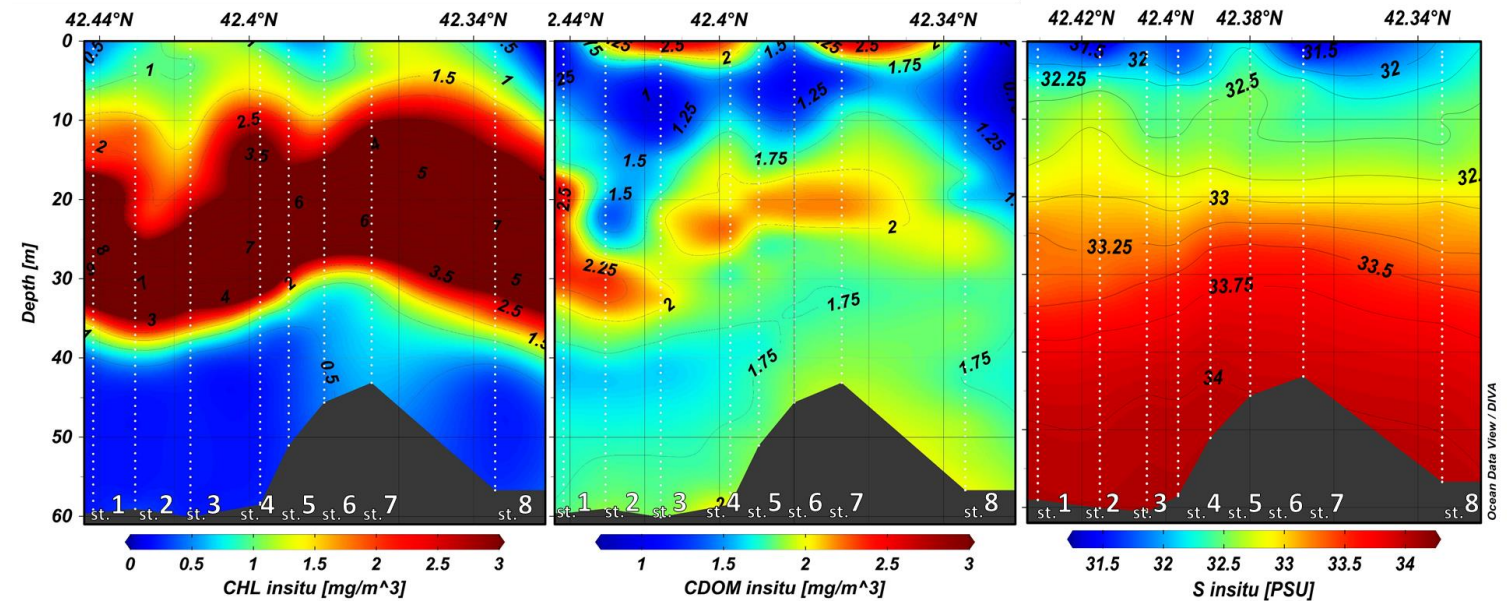
# Экспедиционные данные



Слабое проявление в температурных контрастах также подтверждается на экспедиционных данных.



Отсутствие или слабые проявления в температуре субмезомасштабных вихрей, может быть связано с выравниванием температуры поверхности моря в заливе в сентябре-октябре



Faiman et. al. 2023

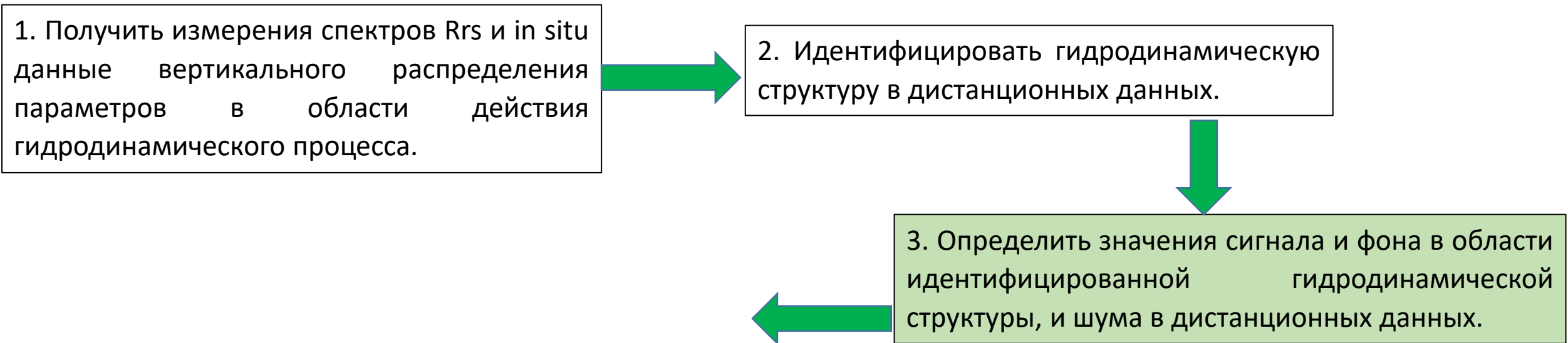


Липинская, Салюк 2021

# Максимальная глубина проявления гидродинамического процесса - $Z_{rsH}$

$Z_{rsH}$  — максимальная глубина, на которой гидродинамические процессы оказывают прямое значимое воздействие на хотя бы одну из дистанционно определяемых оптических характеристик, по которой остается возможность идентифицировать гидродинамическую структуру

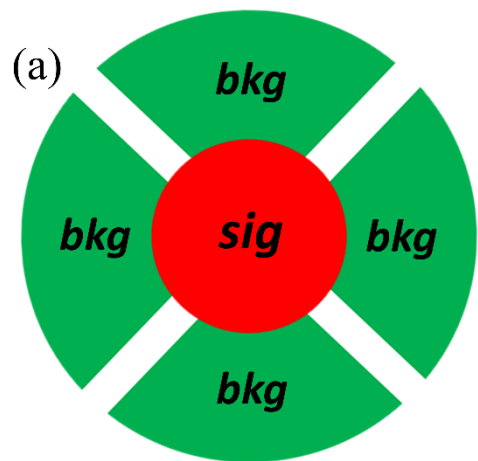
## Определение «максимальной глубины проявления гидродинамического процесса» - $Z_{rsH}$



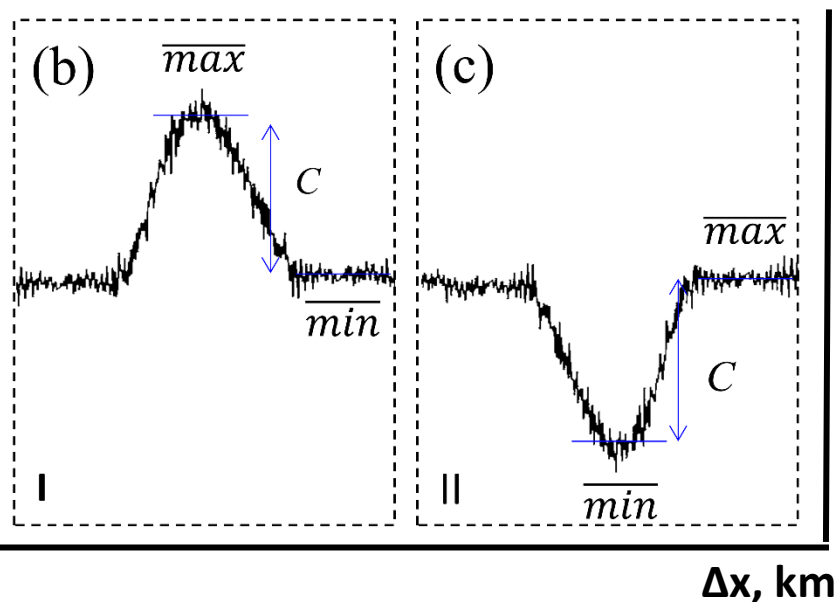
*\*Дополнительно для вихря проведена оценка наилучшего контрастного параметра для определения со спутниковых данных*



# Определение показателей сигнал (sig), фон (bkg)



Пример определения *sig* и *bkg* в районе действия вихря на спутниковых данных

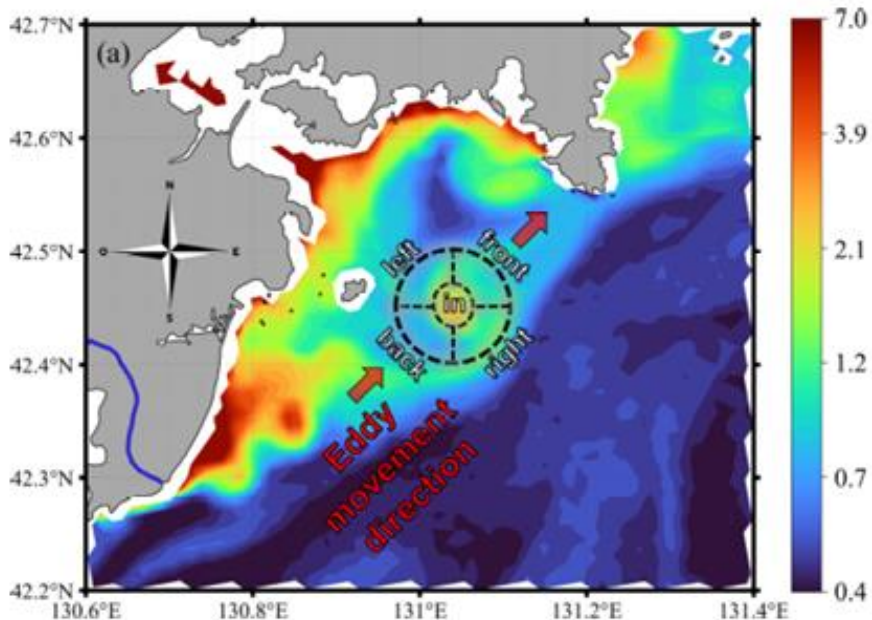


$$bkg = \overline{min}$$

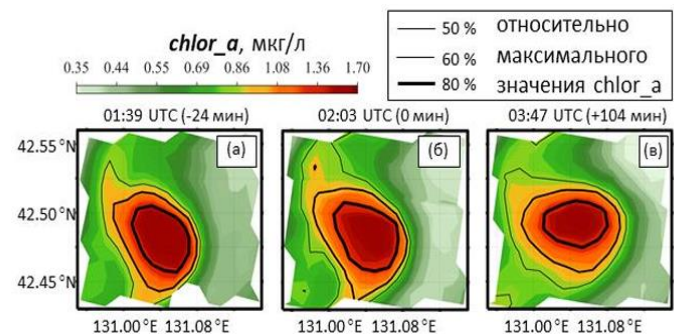
$$bkg = \overline{max}$$

$$sig = \overline{max}$$

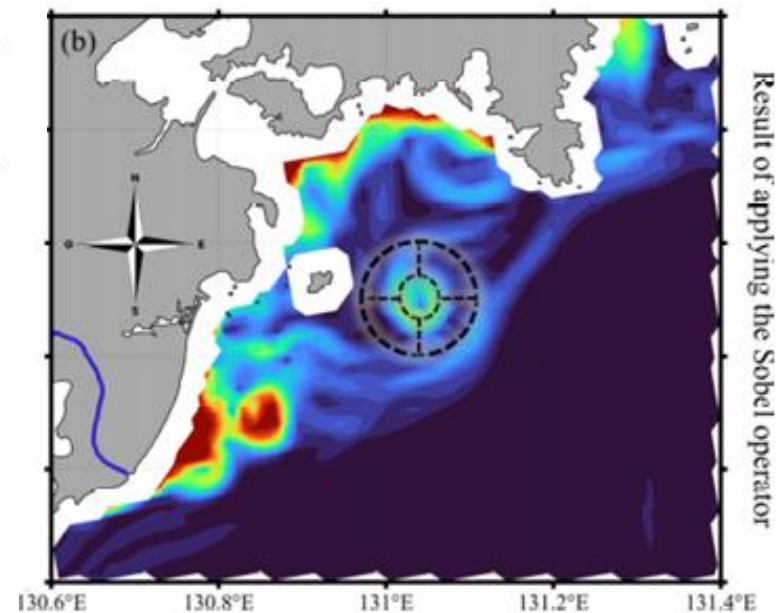
$$sig = \overline{min}$$



В качестве показателя *bkg* в работе применяются отфильтрованные (исключение больших градиентов анализируемой величины с использованием оператора Собеля) флуктуации локальных экстремумов в зонах, не подверженных явному воздействию динамических процессов.



Спутниковые снимки *chlor\_a*, полученные в течение 1 сентября 2009г. со сканеров: MERIS-Envisat (а), MODIS-Terra (б) MODIS-Aqua (в).



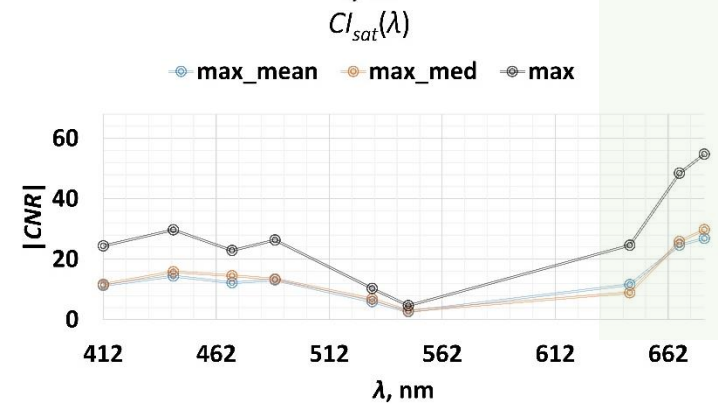
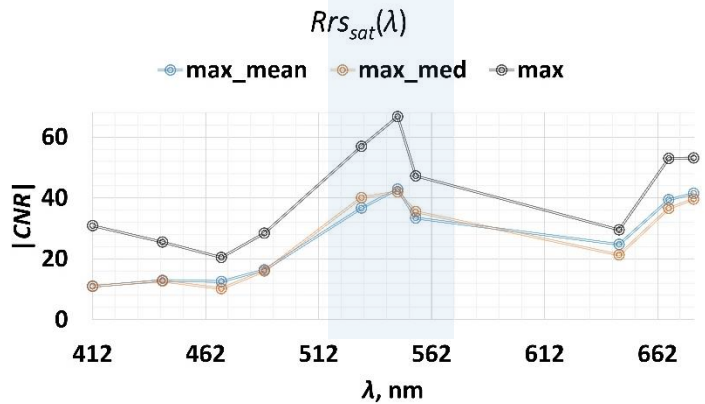
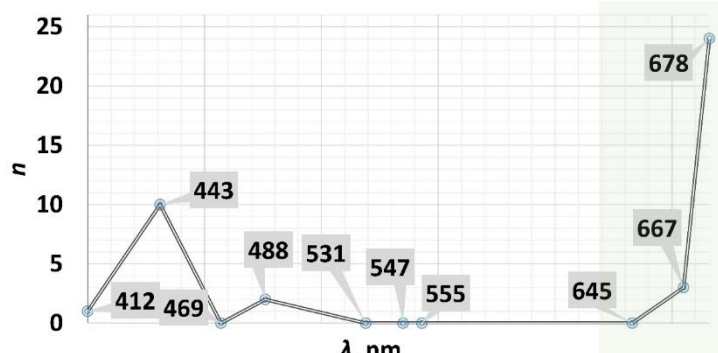
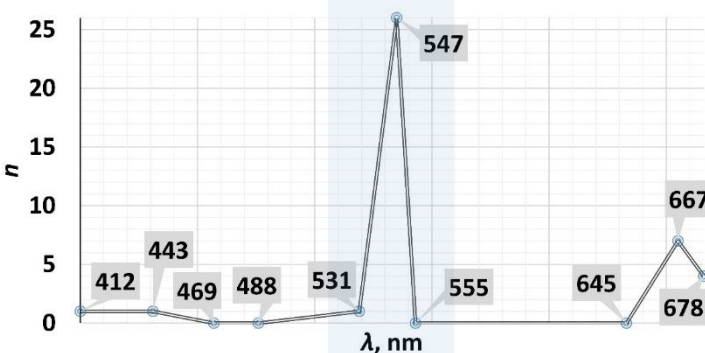
# Лучший контрастный диапазон

периодичность проявления  $CNR_{max}(\lambda)$  вихрей для показателей

$Rrs_{sat}(\lambda)$

$Rrs(\lambda_{satM})$  и  $CI(\lambda_{satM})$

$CI_{sat}(\lambda)$

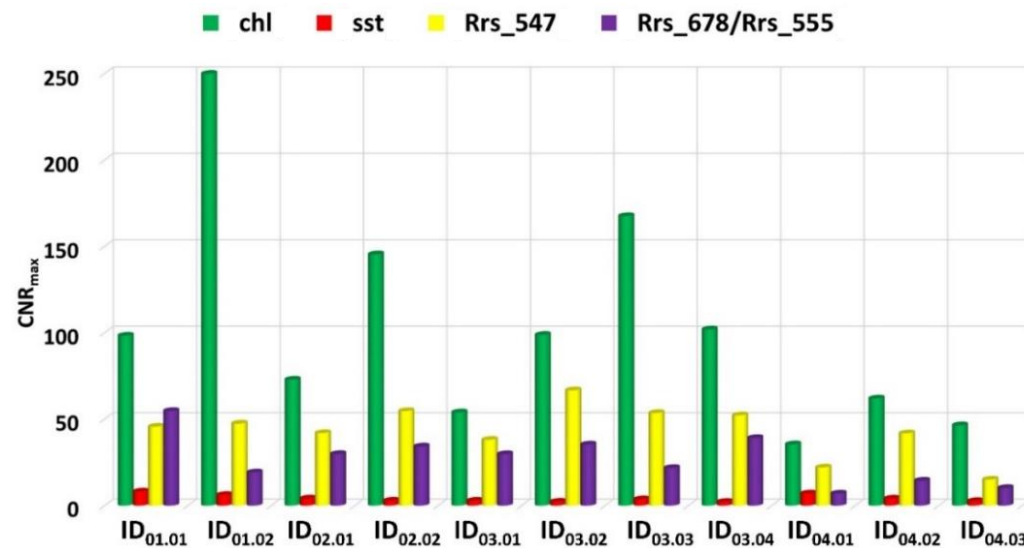


лучший контраст достигается на длине волны 547нм (около максимума окна прозрачности)

при нормировке спектров наилучший контраст появляется на 678нм (в области солнечно-индуцированной флуоресценции хл-а)

# Лучший контрастный параметр

Результаты сравнительного анализа величин  $CNR$  для  $sst$ ,  $chl_{or\_a}$ ,  $Rrs(547)$  и  $CI(678)$



наиболее контрастной характеристикой

для субмезомасштабных вихрей в исследуемом районе будет являться именно дистанционная оценка концентрации chl<sub>or\_a</sub> (рассчитанная по биооптическому алгоритму ОСЗ, оценка которой в данном случае также зависела от содержания ОРОВ)

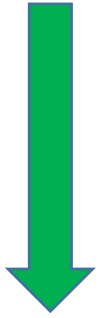


Lipinskaya, Saluyk 2023

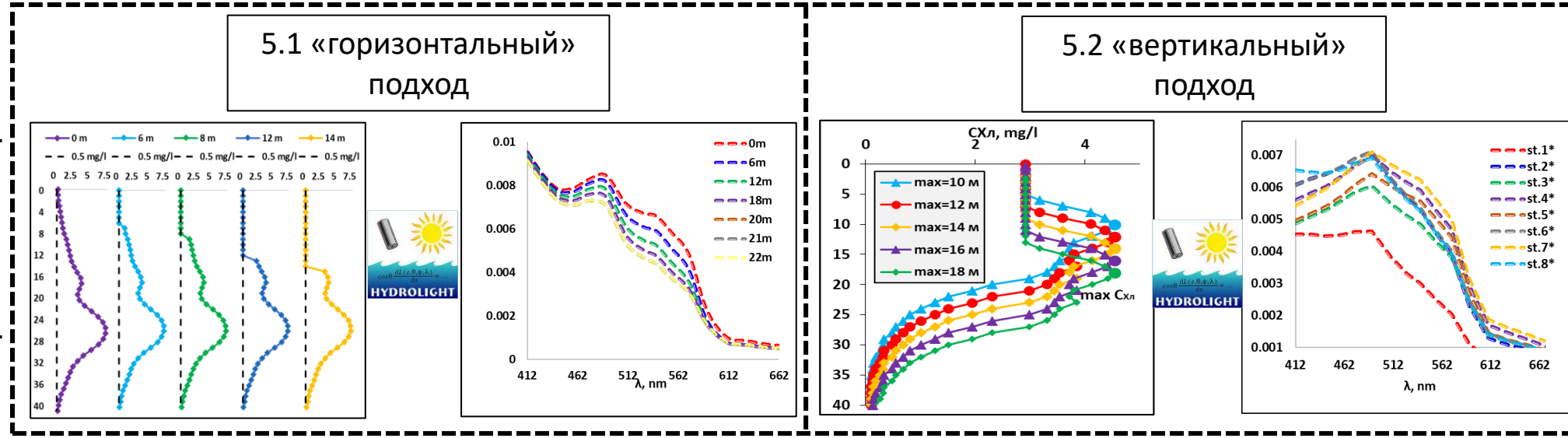
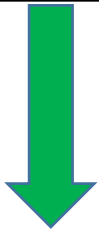


# Определение «максимальной глубины проявления гидродинамического процесса» - ZrsH

4. Настроить и валидировать модели для прямого численного моделирования спектров  $R_{rs}$  с учетом вертикальных профилей ОАК.



5. Промоделировать спектры  $R_{rs}$



6. Рассчитать спектральные характеристики  $R_{rs}$  и оценить содержание ОАК



7. Рассчитать показатель отношения контраст/шум ( $CNR$ )

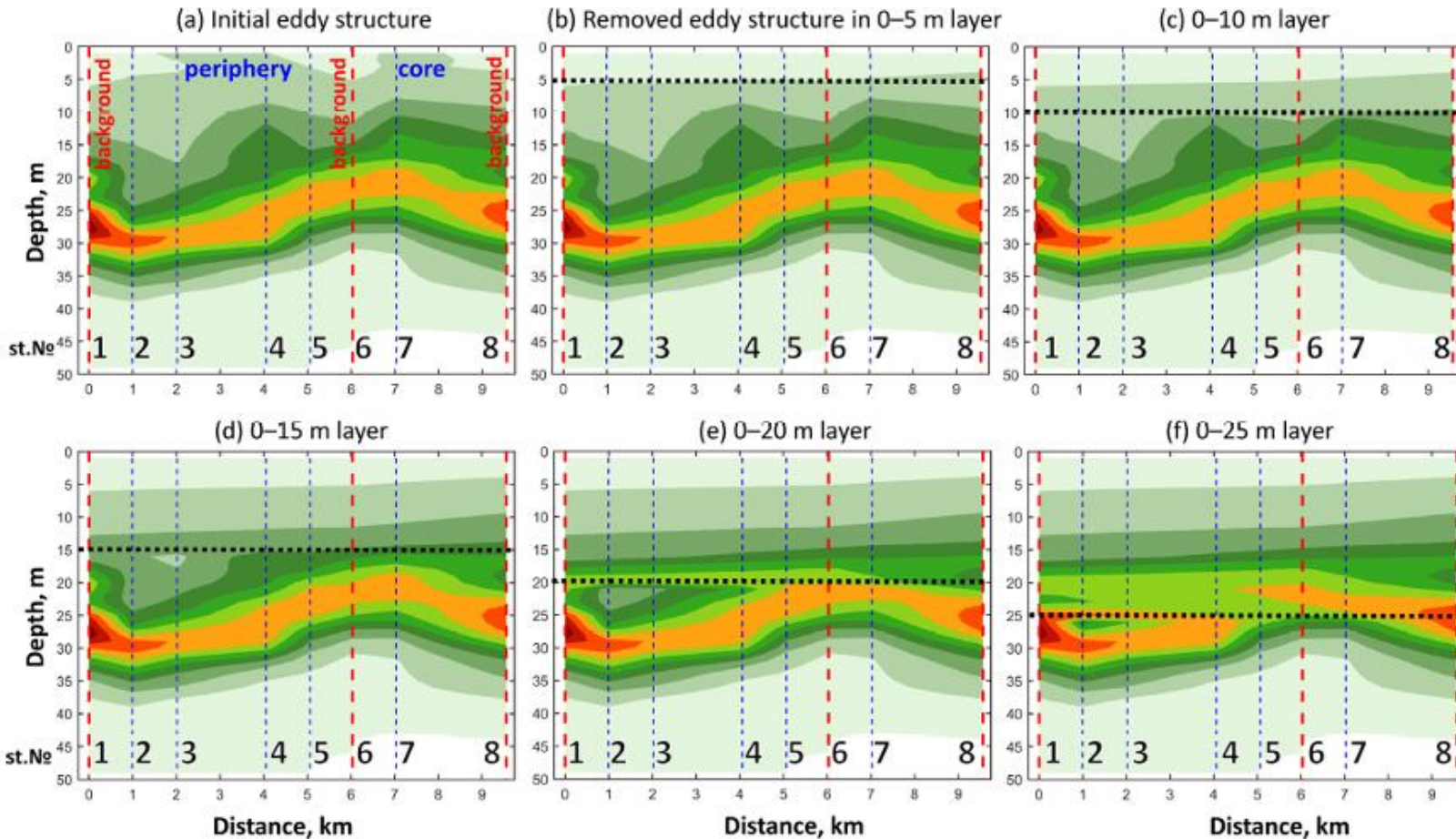


8. Сравнить максимальное значение  $CNR$  над граничным значением

# Моделирование спектров Rrs. «Горизонтальный» подход



Eddy ID<sub>04.02</sub>



Пример моделирования послойного удаления вихревой структуры в профиле концентрации  $Chl_{insitu}(z)$ .

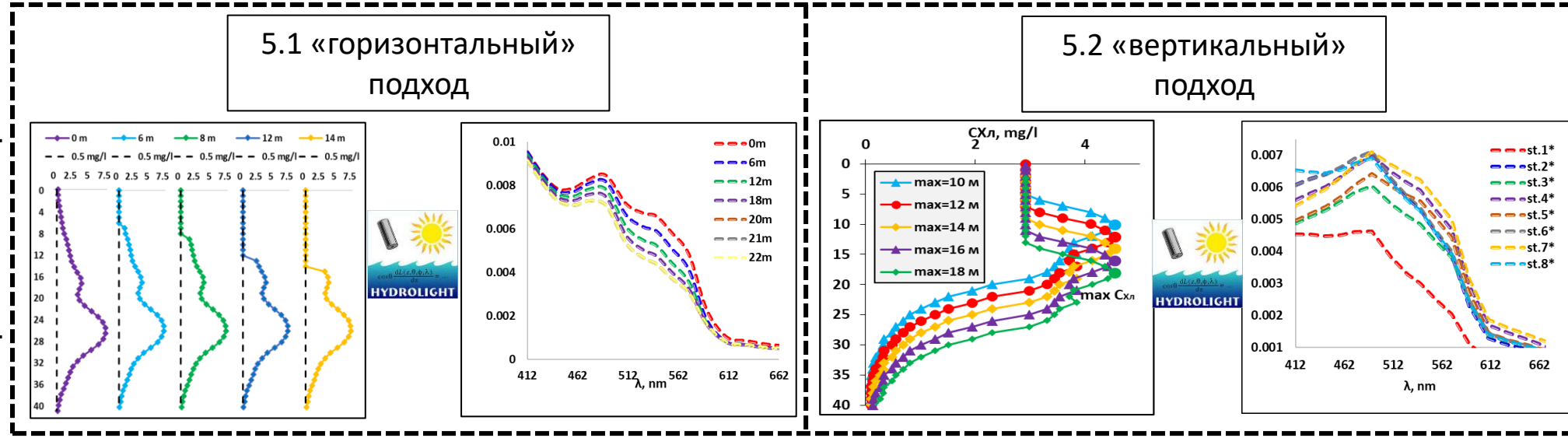
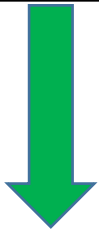
(a) иллюстрирует начальную структуру, (b–f) показывают структуры, где значения с «фоновых» станций (ст.1, ст.6, ст.8, красные пунктирные линии) в поверхностном слое моря распространяются на все «сигнальные» станции (ст.2–5, ст.7, синие пунктирные линии) для следующих диапазонов толщины слоя: (b) 0–5 м; (c) 0–10 м; (d) 0–15 м; (e) 0–20 м; (f) 0–25 м. Черные пунктирные линии — граница обработанного верхнего слоя.

# Определение «максимальной глубины проявления гидродинамического процесса» - ZrsH

4. Настроить и валидировать модели для прямого численного моделирования спектров  $R_{rs}$  с учетом вертикальных профилей ОАК.



5. Промоделировать спектры  $R_{rs}$



6. Рассчитать спектральные характеристики  $R_{rs}$  и оценить содержание ОАК



7. Рассчитать показатель отношения контраст/шум ( $CNR$ )



8. Сравнить максимальное значение  $CNR$  над граничным значением

# Расчет показателя отношения "контраст (C)" / "шум (N)" (CNR)

$$C = sig - bkg$$

$$N = \min(\sigma_{sig}, \sigma_{bkg})$$

Относительная ошибка ( $\delta$ )

$$CNR = \frac{C}{N}$$

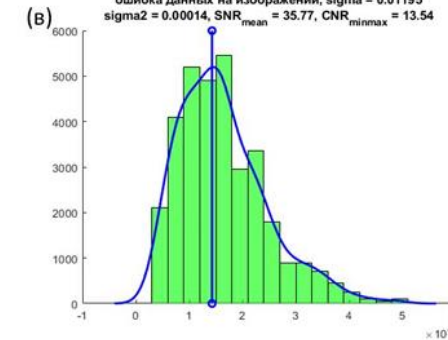
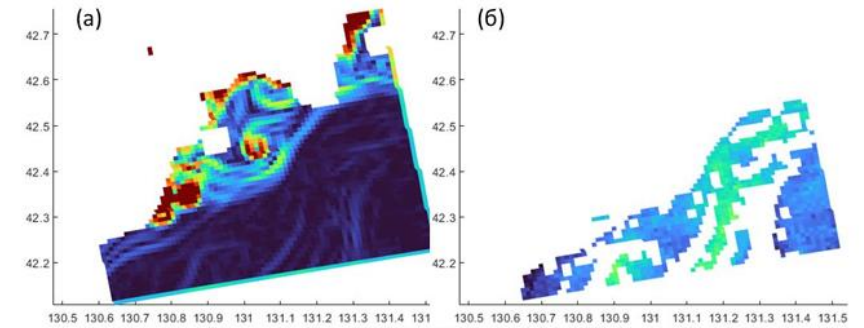
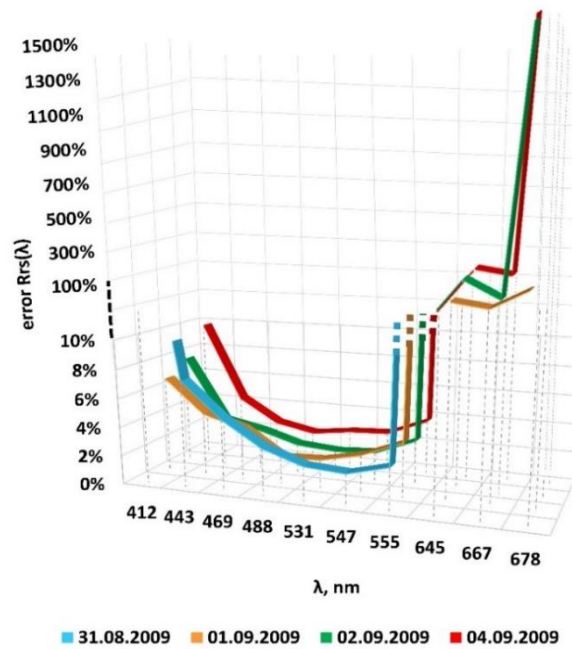
$$noise = 100\% \times \frac{N}{\min(bkg, sig)}$$

Шум спутникового снимка в данной работе определялся с помощью метода локальных однородных блоков.

Спутниковый снимок в исследуемой области

был разделен на множество небольших блоков размером 4x4, 6x6 и 8x8 пикселей. Блоки отфильтровывались, когда наблюдались большие значения градиента анализируемой характеристики.

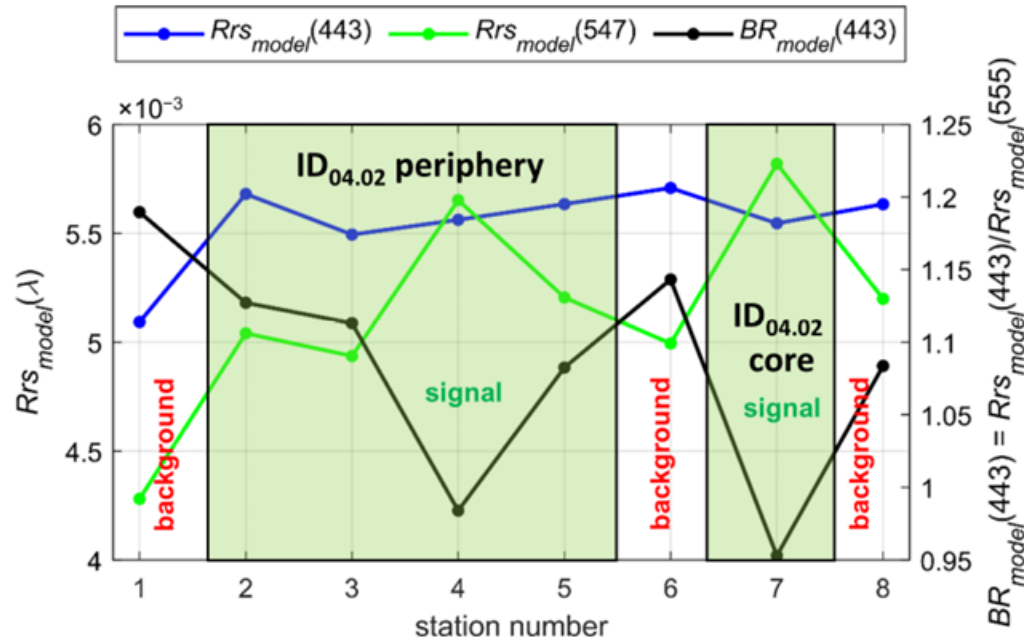
Пороговое значение градиента устанавливалось как удвоенное значение моды распределения всех значений градиента, полученных на изображении.



Определение шума (пример для блоков 4×4) (а) исходные спутниковые данные; (б) спутниковые данные, использованные для оценки ошибки; (в) гистограмма ошибок данных на изображении

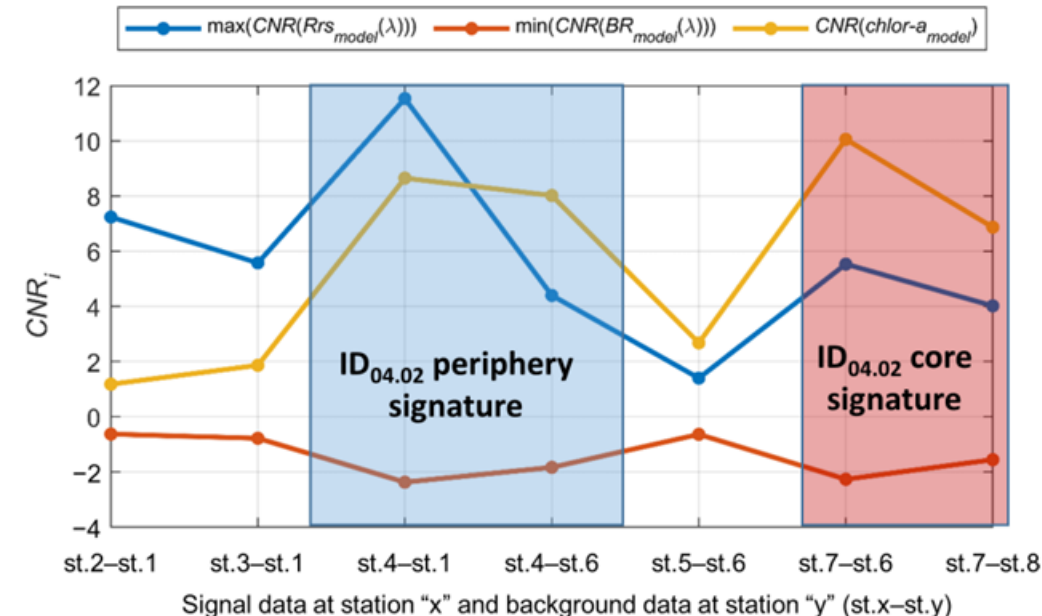
Пример относительных значений шума для рассчитанных проведения сравнительного анализа шумовых характеристик между различными спектральными каналами в видимом диапазоне, с учетом уровня анализируемых сигналов

# Определение максимальных контрастов структуры вихря



Анализ изменения дистанционно зондируемых оптических характеристик в области субмезомасштабного вихря, по полученным модельным данным  $Rrs_{model}(\lambda)$ , для определения самых больших контрастов, возникающие в структуре вихря на его пересечении.

Наличие значительных контрастов между данными на обеих парах станций st.4–st.1 и st.4–st.6 указывает на то, что периферию вихря можно обнаружить дистанционно. Аналогично, наличие одновременно значимых контрастов в парах st.7–st.6 и st.7–st.8 предполагает, что ядро вихря может быть обнаружено.

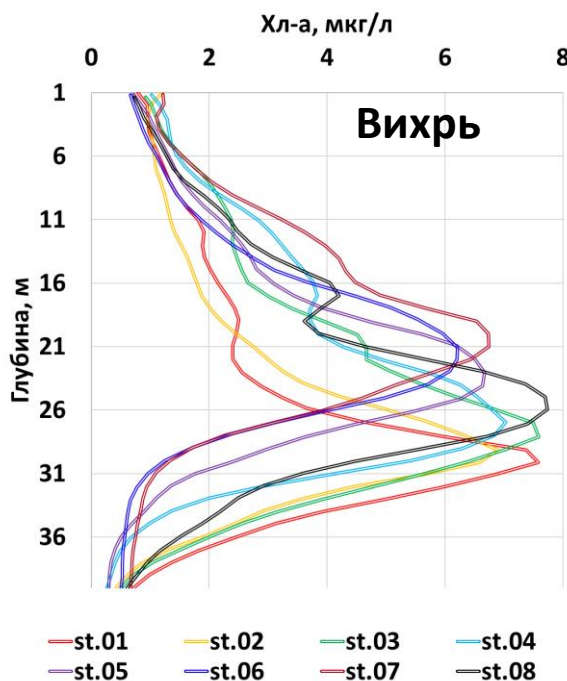
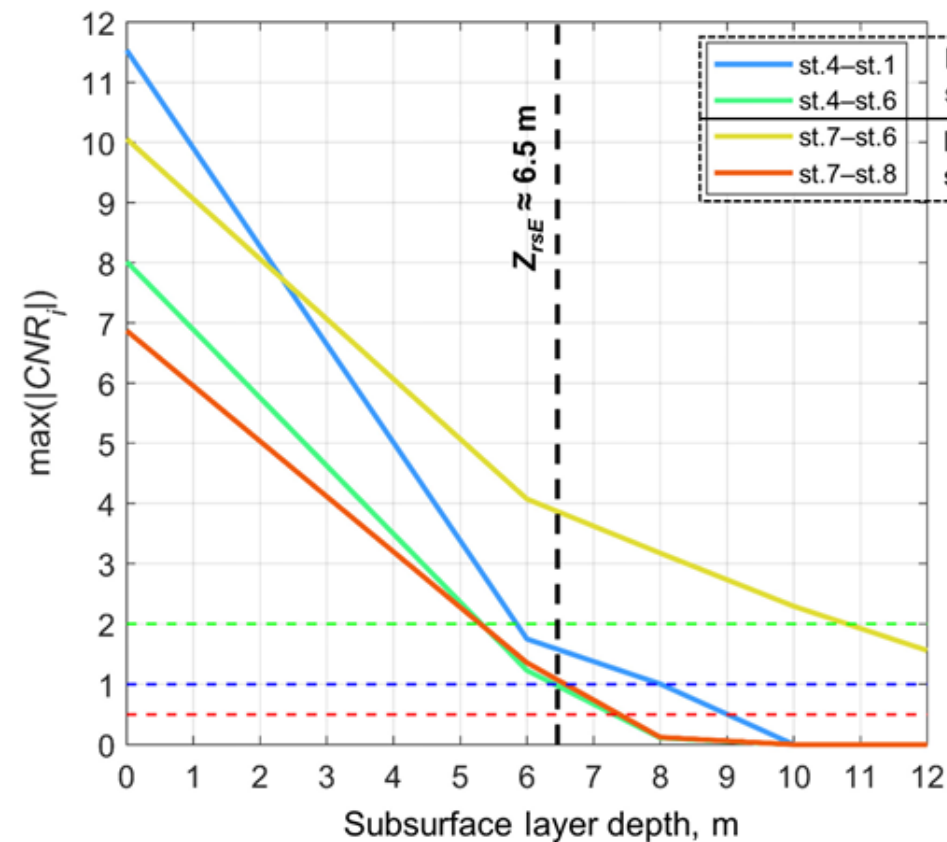


*\*Кроме того, для того, чтобы структура вихря была точно определена, все контрасты должны иметь один и тот же знак.*

**Синий** прямоугольник отмечает контрасты, характеризующие наличие периферии вихря.

**Красный** прямоугольник отмечает контрасты, указывающие на проявление ядра вихря.

# Определение «максимальной глубины проявления субмезомасштабного вихря»



CNR, рассчитанный по формуле, можно интерпретировать как максимальный контраст в спутниковых данных, вызванный наличием вихревой структуры, с учетом погрешностей измерений. Это значение необходимо для оценки возможности обнаружения вихря, а не размера соответствующей структуры. Грубая оценка для определения возможности визуального обнаружения вихря на спутниковом снимке может быть выражена следующим условием:

$$|CNR| \geq 2$$

обнаружить структуру с помощью численных методов:

$$|CNR| \geq 1$$

Для вихря  $Z_{rsH}$  – это последнее значение глубины, где наилучший из всех анализируемых значений  $CNR > 1$ .

*\*Однако следует отметить, пороговые условия не являются абсолютными правилами, поскольку возможность обнаружения также будет зависеть от количества соседних пикселей, соответствующих представленным условиям.*



# Заключение

Полученные методы и экспериментальные данные позволили рассчитать максимальную глубину проявления, видимой из космоса гидродинамической структуры субмезомасштабного вихря (для периферии вихря и для ядра вихря) в наилучших контрастных характеристиках видимого диапазона, что может обеспечить дополнительную информацию для идентификации вихрей на спутниковых изображениях цвета моря.

*\*При интерпретации результатов следует учитывать следующие факторы:*

*1. Если имеется множество соседних пикселей, где выполняется условие  $1 |CNR| \geq 2$ , то можно визуально воспринять такую структуру в случае соответствующей цветовой шкалы.*

*Выбор оптимальной цветовой шкалы может улучшить видимость структуры и помочь в ее идентификации.*

*2. То же самое применимо и для условия  $2 |CNR| \geq 1$ , если таких пикселей много, и они расположены рядом друг с другом, то такую структуру можно обнаружить современными методами распознавания изображений.*

*3. И наоборот для сценариев (1) и (2): если имеется только один пиксель, соответствующий условиям 1 или даже 2, было бы трудно классифицировать такую структуру как вихрь.*



# Спасибо за внимание



Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения  
Российской академии наук  
г. Владивосток

*Работа выполнена в рамках  
госбюджетных тем НИР ТОИ ДВО РАН  
№124042300003-5 и №124022100080-0.*

***м.н.с. Лаб. 9/4, н.с. Лаб. 9/3 ТОИ ДВО РАН,  
к.ф.-м.н. Липинская Надежда Александровна  
\*lipinskaya.na@poi.dvo.ru***

*Вид на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», Приморский край,  
фото с борта судна НИС «Академик Опарин», июль 2024*