

# Диагностика цветения *Nodularia Spumigena* в Каспийском море по дефициту обратно рассеянной солнечной радиации на примере данных спутниковых сканеров цвета океана

Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00412

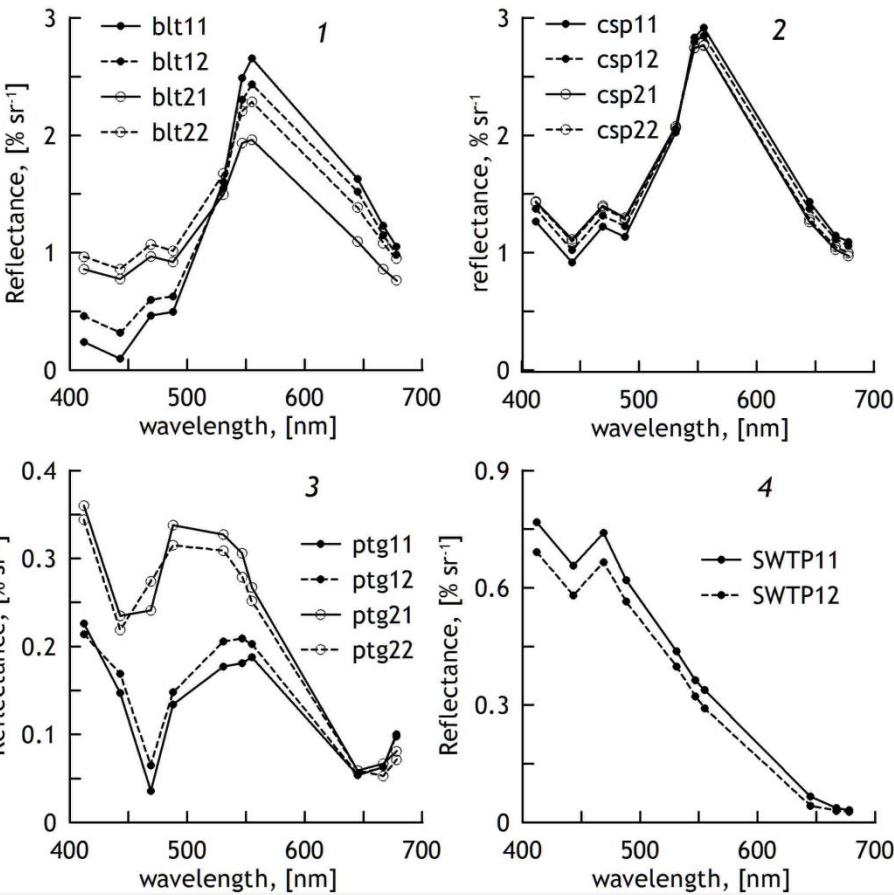


## Пример цветения цианобактерий на Балтике

Цианобактерии *Nodularia spumigena* испускают в воду токсин нодуларин, поражающий печень. Нодуларин убивает диких животных и скот, опасен для человека. Цветения цианобактерий отрицательно влияют на рекреационный потенциал морей.

## 2 ИНДЕКСЫ ДЕФИЦИТА КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ $Rrs(\lambda)$

Среди примесей морской воды только пигменты фитопланктона (ПФ) поглощают свет в малых интервалах длин волн  $\lambda$ , порождая минимумы  $Rrs(\lambda)$  (дефицит яркости) на  $\lambda_{max}$  полосы поглощения пигментов. Поэтому дефицит  $Rrs(\lambda)$  на  $\lambda_{max}$  пигментов  $\sim$  содержанию пигментов в толще ДЗ. Показано: пигментный дефицит  $Rrs$  регистрируется мультиспектральными сенсорами в периоды "цветений" фитопланктона (<http://dx.doi.org/10.1016/j.oceano.2016.05.001>). Наш доклад посвящен возможности мультиспектральной оценки хлорофилла по индексу **D1 =  $Rrs(469) - Rrs(443)$**  (сенсоры MODIS и MERIS) и изменчивости индекса доп. пигментов **D2 =  $Rrs(488) - Rrs(469)$**  (MODIS) на примере цветения цианобактерий на юге Каспия.



Примеры мультиспектров с D1 и D2 максимальной амплитуды

- 1 – MODIS A, Балтика, 10.07.2005  
от 18 °E, 55 °N до 21°E, 58 °N
- 2 – MODIS A, Каспий, 01.09.2005  
от 49.5 °E, 37.5 °N до 52 °E, 3.75 °N
- 3 – MODIS A, Патагонский шельф, 18.05.2012  
от 63 °W, 44.5 °S до 58 °W, 41.5 °S
- 4 – MODIS T, ЮЗ Пацифика, 10.12.2007  
от 168 °E, 20 °S до 169 °E, 19 °S

(здесь **D1 =  $Rrs(443) - Rrs(469)$** )

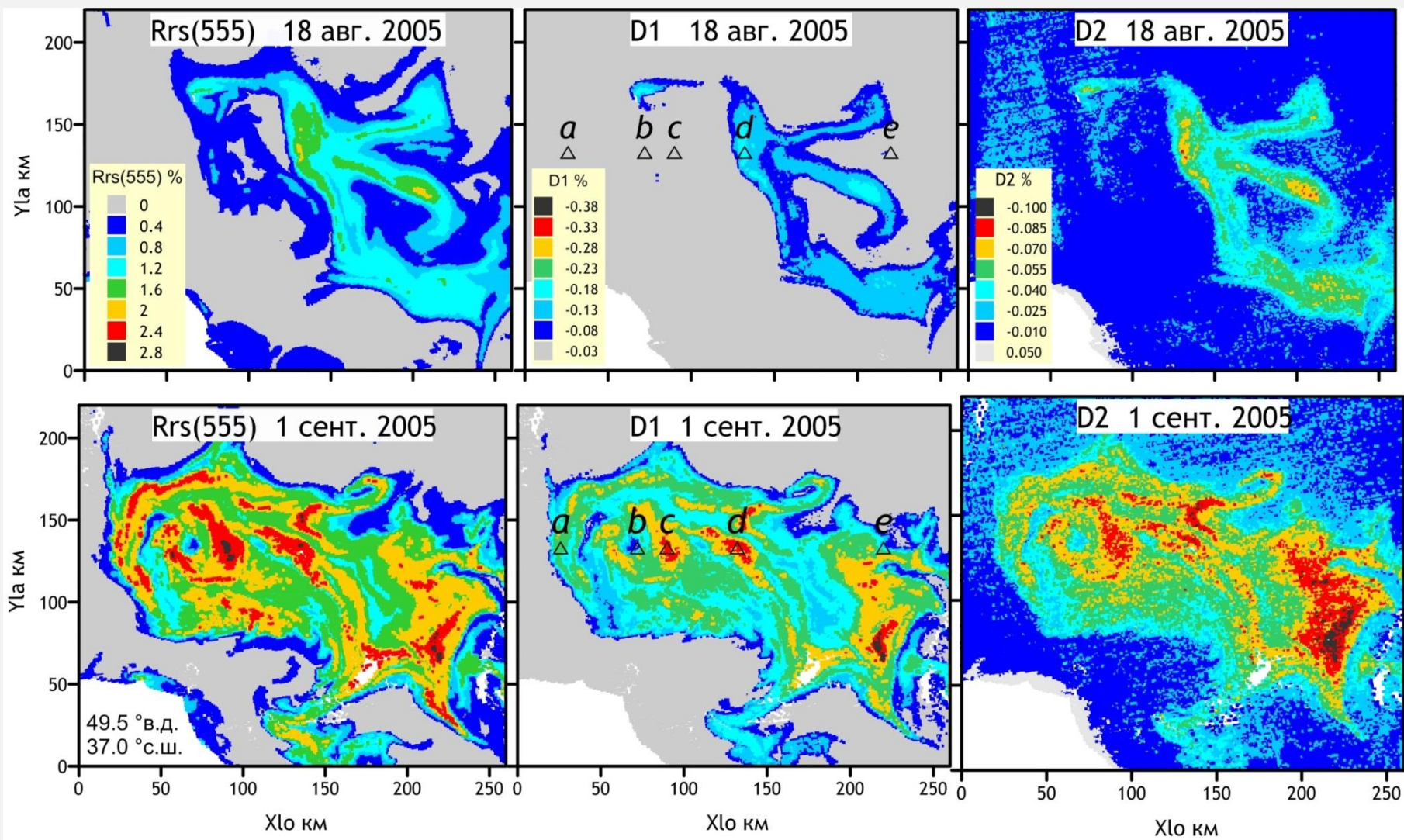
**D1 < 0** при наличии минимума на  $\lambda = 443$  нм (максимум поглощения хлорофилла),  
**D2 < 0** при наличии минимума на  $\lambda = 488$  нм (максимум поглощения доп. пигментов),  
 как и положено быть дефициту.

**Анализ спутниковых данных о ранее описанных цветениях – основа нашего подхода.**



### 3 ЭВОЛЮЦИЯ ЦВЕТЕНИЯ 2005 г. ПО ОЦЕНКАМ КОЭФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ Rrs(555) И ИНДЕКСОВ D1 И D2 ПО ДАННЫМ MODIS'А В ГРАДАЦИЯХ, ОДИНАКОВЫХ ДЛЯ 18 АВГУСТА И 1 СЕНТЯБРЯ 2005 г.

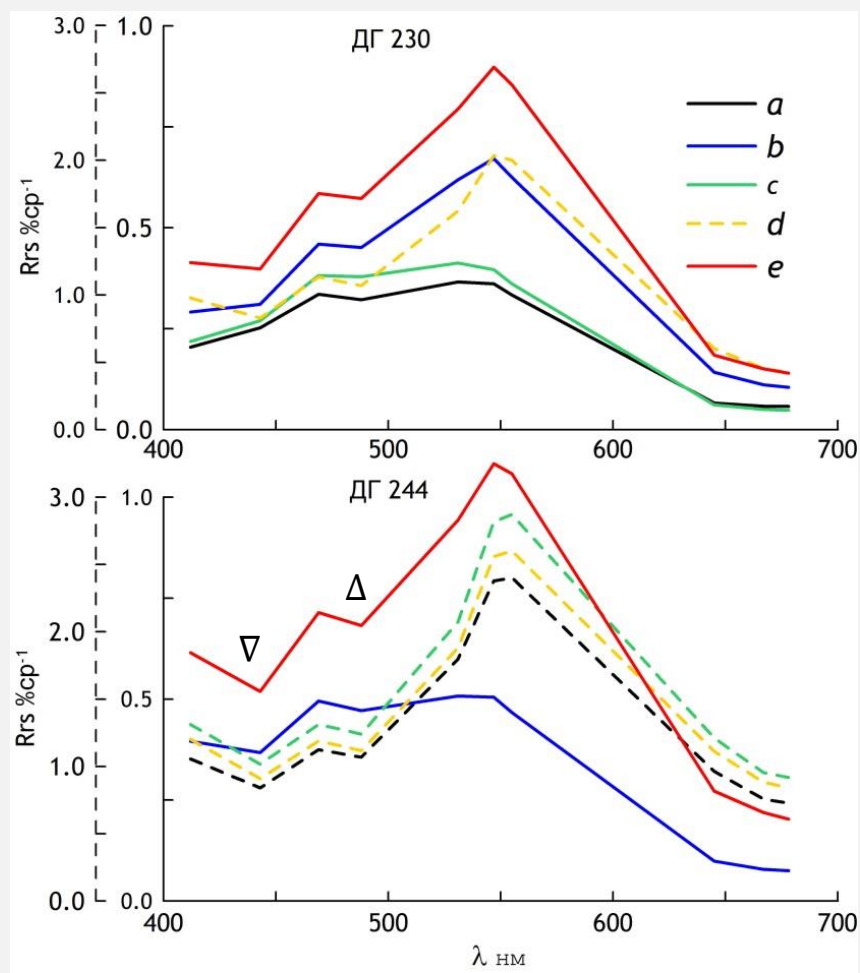
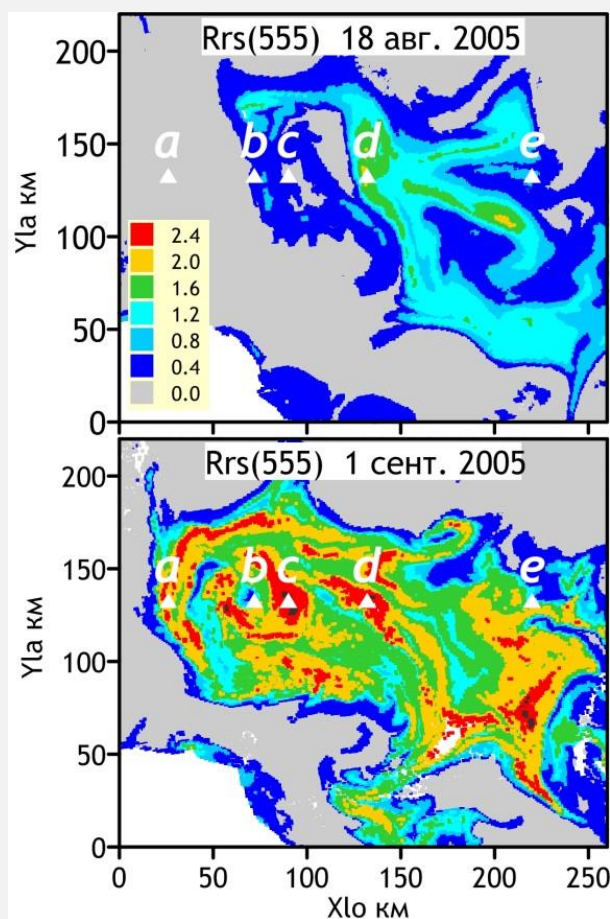
Кодировка цветом: Rrs растет, а D1 и D2 убывают от серого-синего к красному-черному. На 18.08.05 поле D1 отставало в развитии от полей Rrs и D2, но их структуры оказались подобны друг другу  
01.09.05 : амплитуды оценок Rrs, D1 и D2 меняются сходным образом на зональном разрезе через "глаз" вихря (треугольник *b*, карты D1). D1 явно отстает в развитии от Rrs(555) и D2 18.09.2005.



## ФОРМА СПЕКТРОВ $Rrs(\lambda)$ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЦВЕТЕНИЯ

по данным MODIS-A от 18.08.05 (ДГ 230) и 01.09.05 (ДГ244) в точках *a-e* зонального профиля через центр вихря в точке *b* ( $X_{lo} = 72$  км,  $Y_{la} = 134$  км, карты). Сплошная и пунктир кодируют принадлежность спектров к шкалам 0-1 и 0-3 Rrs %, принадлежность спектров точкам *a-e* обозначена цветом.  $\nabla$  = дефицит Rrs на 443 нм (D1),  $\Delta$  = то же на 488 нм (D2).

*a, c, d, e* – рост Rrs(555) и дефицитов  $\nabla$  и  $\Delta$ , *b* – падение Rrs(555) и рост дефицита  $\nabla$  с переходом от ДГ230 к ДГ244 в центре вихря. Последнее явно связано с подъемом вод в центре вихря и указывает на неоднозначность связи между оценками Rrs и индексов D1, D2.



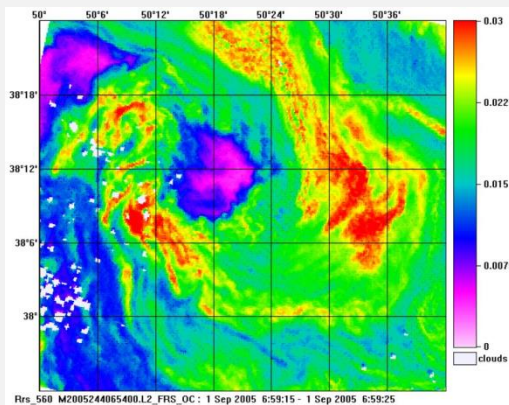
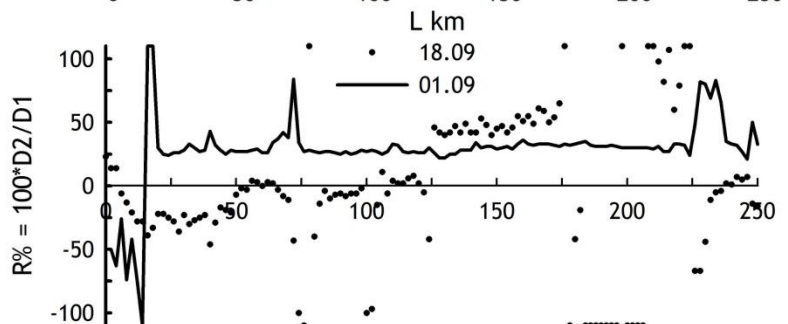
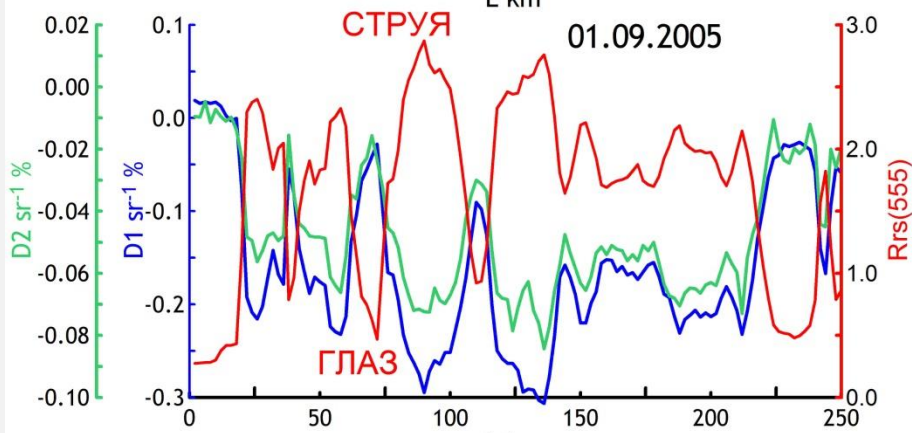
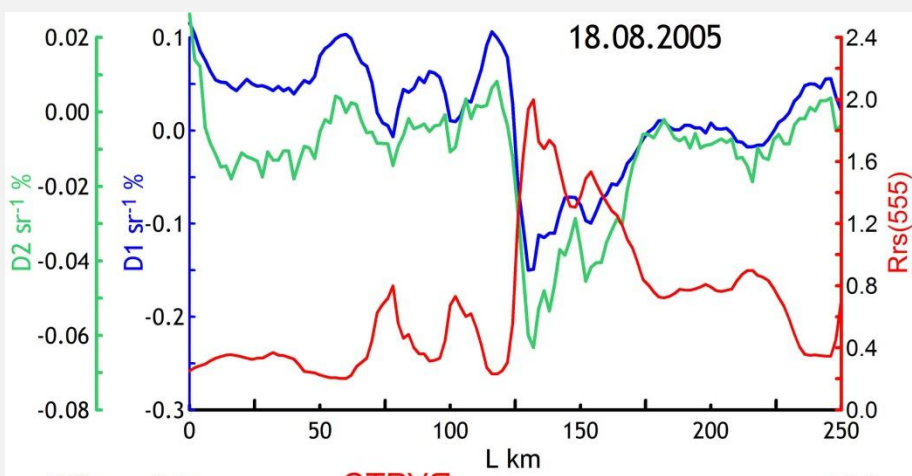


# 5 ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ D1, D2 и Rrs(555) НА ЗОНАЛЬНОЙ ТРАССЕ ЧЕРЕЗ ЦЕНТР ЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ.

MODIS A, GSD = 2 км, профили от 18.08 и 01.09.2005. Кодировки: **красный = Rrs(555)**;  
**синий = D1**; **зеленый = D2**

## ВЫВОДЫ:

- 1) D1, D2 и Rrs(555) и соотношения между ними менялись вместе с эволюцией вихря;
- 2) Размах и перемежаемость оценок D1, D2 и Rrs(555) оказались максимальными 01.09.2005 вдоль зональной трассы на 38°12' с.ш.
- 3) Эта ситуация благоприятна для определения зависимости индекса D1 от концентрации хлорофилла в воде.



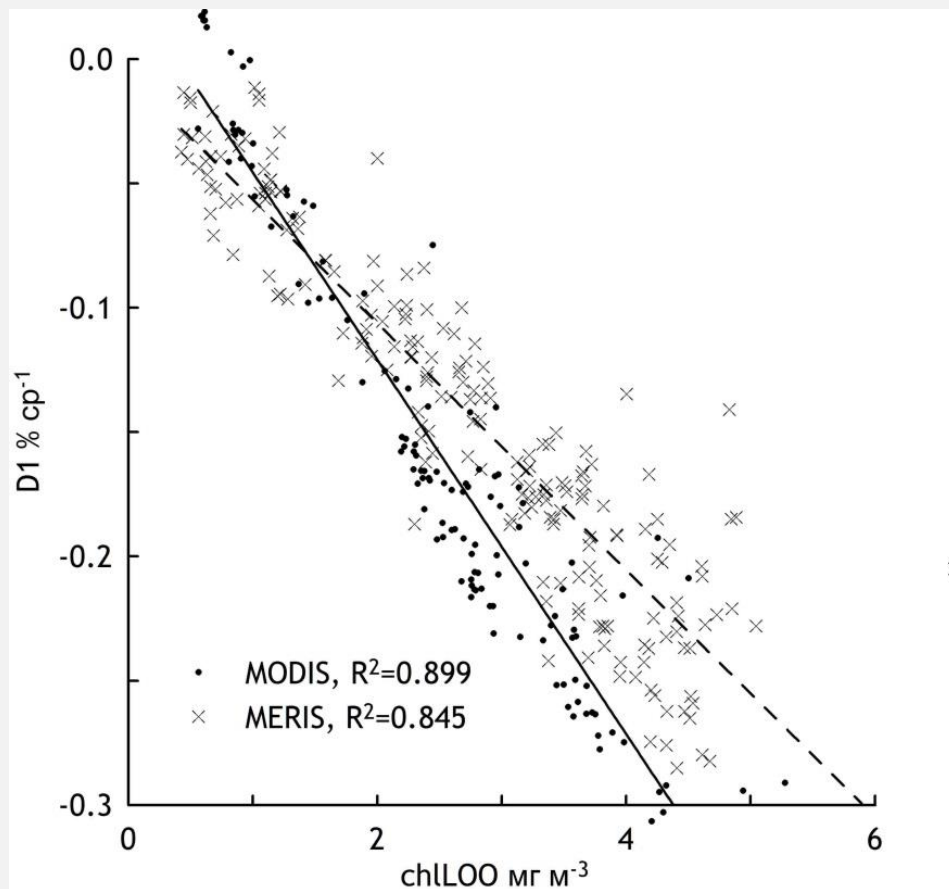
"Глаз" вихря при  
 GSD = 300 м.  
 MERIS 01.09.2005  
 $0 < Rrs(560) < 3\%$   
 Система концентрических струй?

Отношения  $R\% = 100 \times D1/D2$  вдоль трассы по данным 18.08 и 01.09.2005

Естественный способ – найти зависимость D1 от chl\_a, т.е. по стандартным MODIS-оценкам пигмента на той же трассе. Такие chl\_a оказались неправдоподобно завышенными, что типично для внутренних морей. Поэтому мы воспользовались локальным алгоритмом Лаборатории оптики океана ИО РАН (Kopelevich et al., 2013, <http://optics.ocean.ru>) для открытого Каспийского моря, разработанного по данным подспутниковых наблюдений:

$$\text{chlLOO} = 0.573 \times (\text{Rrs}(\lambda_1) / \text{Rrs}(\lambda_2))^{-2.39}$$

где  $\lambda_1 = 488$  нм,  $\lambda_2 = 555$  для MODIS'а и  $\lambda_1 = 490$  нм,  $\lambda_2 = 560$  для MERIS'а. Эти оценки в точках зональной трассы (GSD=2 км) использовались для построения регрессий D1 на chlLOO.



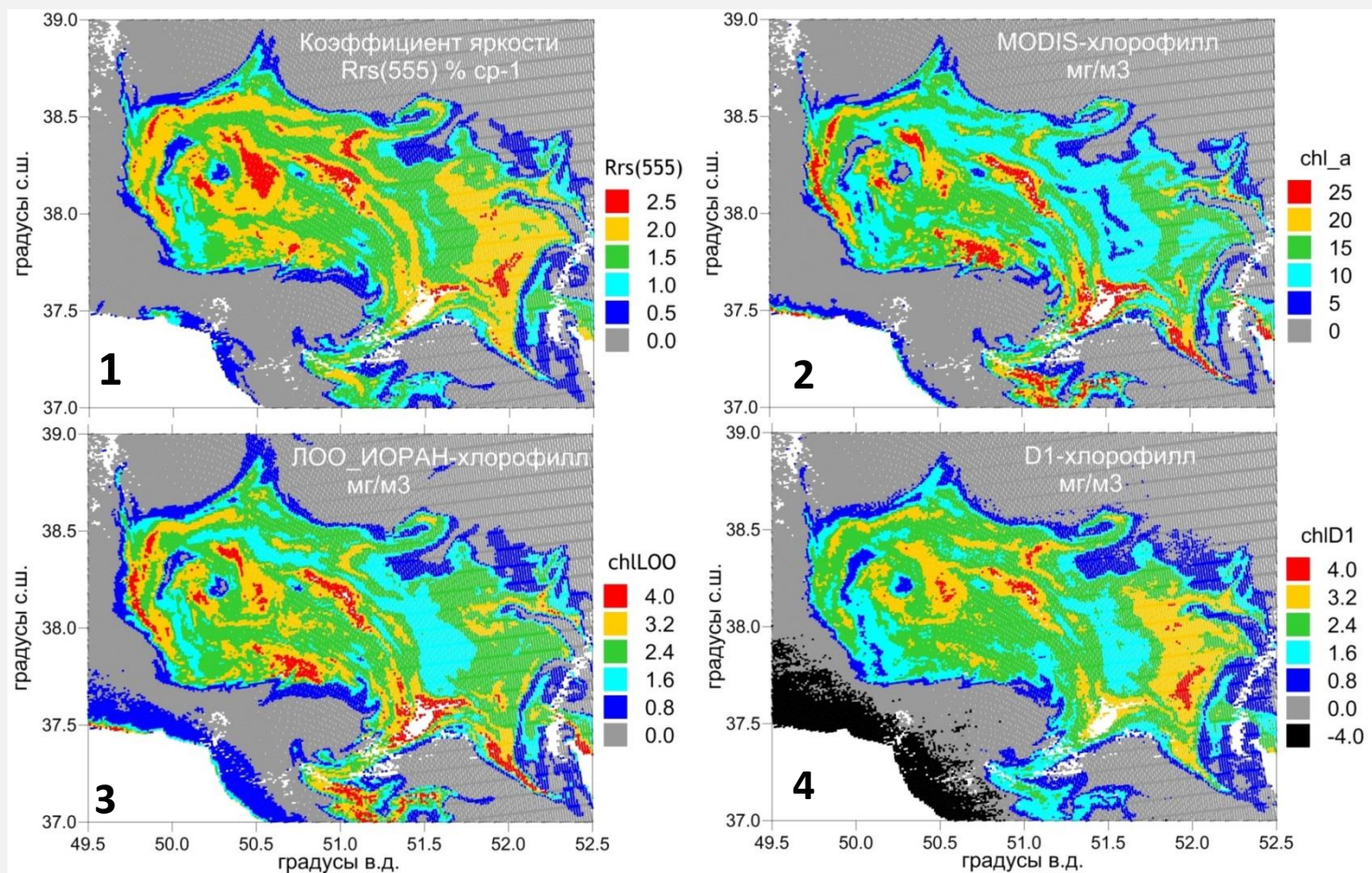
Они оказались строго линейными в интервале  $0.5 - 5 \text{ mg m}^{-3}$  chlLOO, но несколько отличались наклонами и рассеянием точек относительно линий регрессии (график). Большая крутизна и меньшее рассеяние регрессии по MODIS'у делает ее предпочтительной для обратного пересчета D1 в оценки содержания хлорофилла **chlD1** по дефициту коэффициента яркости на длине волны максимума полосы поглощения хлорофилла.

Обратный пересчет был применен ко всем пикселям изображения моря от 01.09.2005, что позволило сравнить пространственную структуру распределений Rrs(555), chl\_a, chlLOO и chlD1.

(2) и (3) найдены посредством Band-Ratio алгоритмов (BR, отношения спектральных Rrs). По аналогии, алгоритм расчета (4) можно назвать Band-Difference алгоритмом (BD, разностный алгоритмом).

1. chl\_a >> chlLOO повсеместно, но вне вихря (37.5° N, 51.0-51.5 E) оба BR-алгоритма "видят" хлорофилл в своих старших градациях подобно Rrs(555), тогда как оценки chlD1 по BD-алгоритму там же далеки от максимальных, свойственных зоне вихря.

2. Во вдольбереговой полосе оба BR-алгоритма "видят" хлорофилл в младших градациях цветения. Согласно BD-алгоритму, та же полоса была занята физически нелепыми chlD1 < 0. Они соответствуют содержанию хлорофилла ниже 0.5 мг м<sup>-3</sup> (ниже порога чувствительности BD-алгоритма согласно исходной регрессии).





Мы показали:

- 1) Индекс D1 градуируется для дистанционной оценки обилия хлорофилла в воде по определениям этого пигмента с помощью локального спутникового алгоритма, основанного на отношении мультиспектральных Rrs;
- 2) Индекс D1 отличается повышенной избирательностью к хлорофиллу по сравнению с его определениями по отношениям Rrs, что важно для прибрежий океана и внутренних морей.
- 3) Изменчивость индекса D2 лишь частично подобна изменчивости D1 в соответствии с особенностями состава и функций доп. пигментов по сравнению хлорофиллом. Определению дополнительных пигментов по индексу D2 препятствует ряд причин, в частности:
  - а) Спутниковые определения этих пигментов по отношениям мультиспектральных Rrs не реализованы;
  - б) Дополнительные пигменты гораздо разнообразнее по своим спектральным свойствам по сравнению с хлорофиллами, в силу чего индекс D2 применим лишь в условиях явного преобладания единственного дополнительного пигмента с максимумом на  $\lambda > 488$  нм.

Подобные исследования заслуживают продолжения до тех пор, пока гиперспектральные спутниковые данные не окажутся столь же массовыми, как современные мультиспектральные определения характеристик морской среды.