



Развитие технологий контроля экологического состояния моря по данным радиометров MODIS

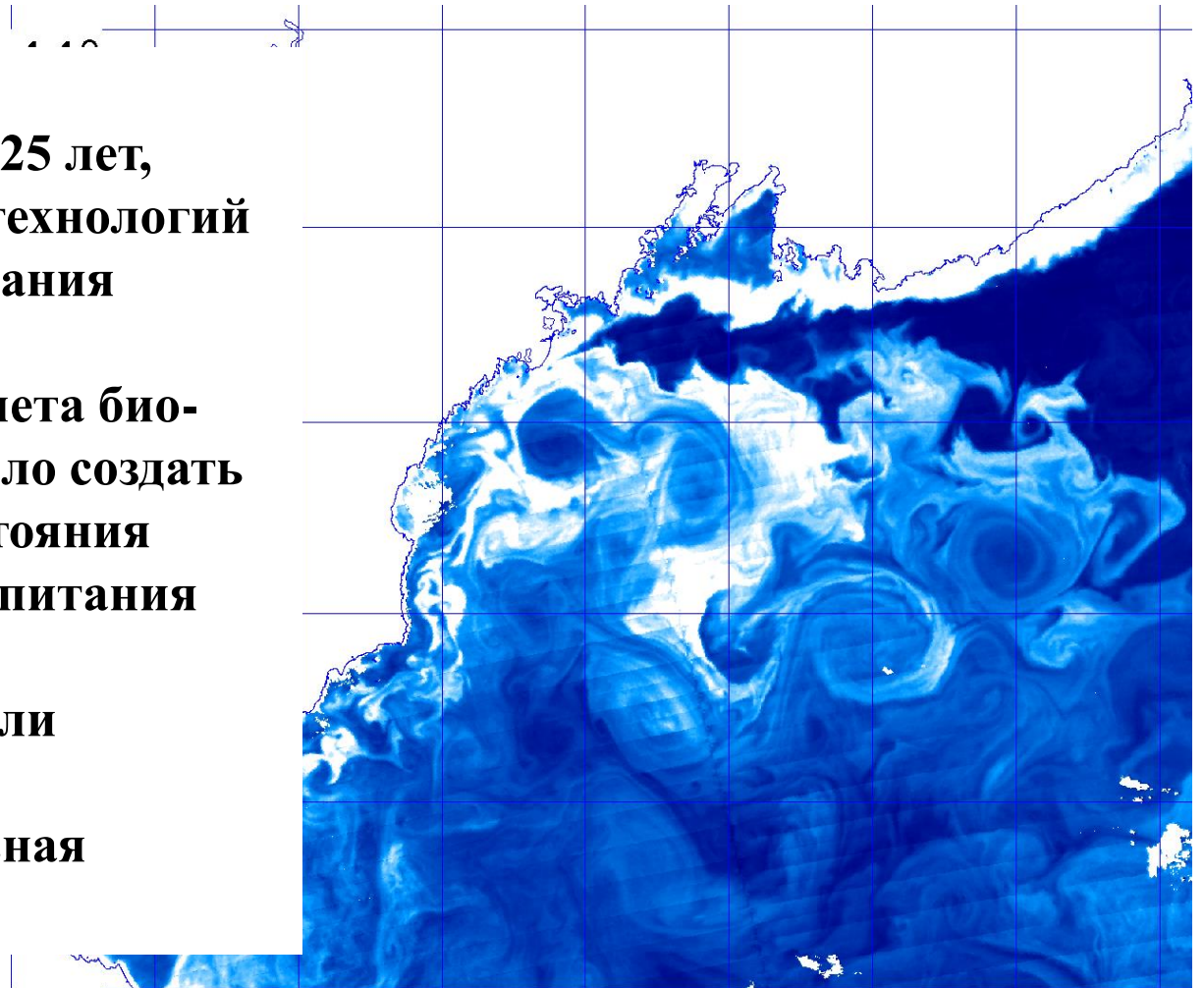
Алексанин А.И.

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Радиометры MODIS, функционирующие более 25 лет, обеспечили бурный рост технологий дистанционного зондирования океана.

Создание технологий расчета биопараметров моря позволило создать методы для контроля состояния фитопланктона – основы питания гидробионтов в океане.

Мониторинг массовое и/или вредоносного цветения фитопланктона – актуальная проблема



MODIS/AQUA. Карта концентрации хлорофилла-а, Японское море

“Красные приливы”



У нас



Красный прилив в Южной Корее и «борьба» с ним
У них

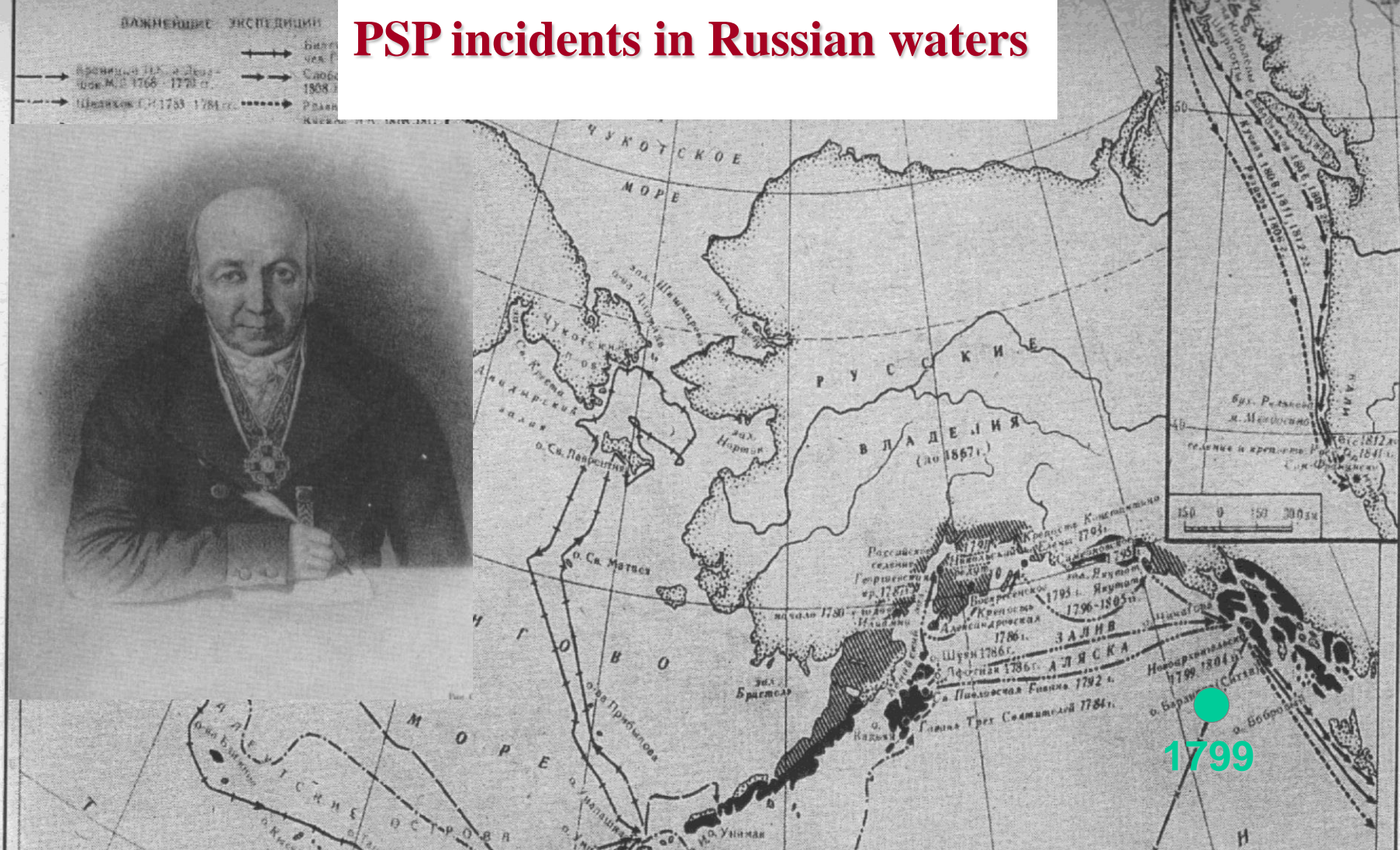
Вредоносное цветение микроводорослей (ВЦВ)

(только 30 % «красных приливов» вредоносны)

ТОКСИНЫ	Микроводоросли
PSP - paralytic shellfish poisoning	Dinoflagellates Cyanobacteria
DSP -diarrhetic shellfish poisoning	Dinoflagellates
NSP -neurotoxic shellfish poisoning	Dinoflagellates
ASP -amnesic shellfish poisoning	
-AZP - azaspiracid shellfish poisoning	Diatoms
CFP - ciguatera fish poisoning	Dinoflagellates
PEAS - possible estuary-associated syndrome	Dinoflagellates Dinoflagellates



PSP incidents in Russian waters



ALASKA

Крупный случай отравления алеутов с многочисленными смертельными исходами был задокументирован Александром Барановым (Российско-американской компанией по торговле пушниной). Этот случай произошёл на юге Аляски 8 июля 1799 года. 135 охотников-алеутов погибли, съев заражённые мидии, добытые в районе Ситки. Симптомы, подробно описанные Александром Барановым, несомненно характерны для PSP.

Программа ООН по охране окружающей среды UNEP



NOWPAP CEARAC

Special Monitoring & Coastal Environmental
Assessment Regional Activity Centre

В северо-западной части Тихого океана создан центр CEARAC и Программа NOWPAP в рамках проекта UNEP четырьмя странами: Китай, Южная Корея, Россия и Япония.

В рамках UNEP были выделены группы (WG4) экологического мониторинга моря на основе спутникового зондирования.

The Special Monitoring & Coastal Environmental Assessment Regional Activity Centre (CEARAC) is one of the four Regional Activity Centres (RACs) to carry out individual activities of the Action Plan for the Protection, Management and Development of the Marine and Coastal Environment of the Northwest Pacific Region (NOWPAP). NOWPAP is part of the Regional Seas Programme of the United Nations Environment Programme (UNEP) and was adopted at the First NOWPAP Intergovernmental Meeting (IGM) (Seoul, Korea, September 1994). Four countries -People's Republic of China, Japan, Republic of Korea and Russian Federation - are members of NOWPAP.

Пример статистических данных по «красным приливам»

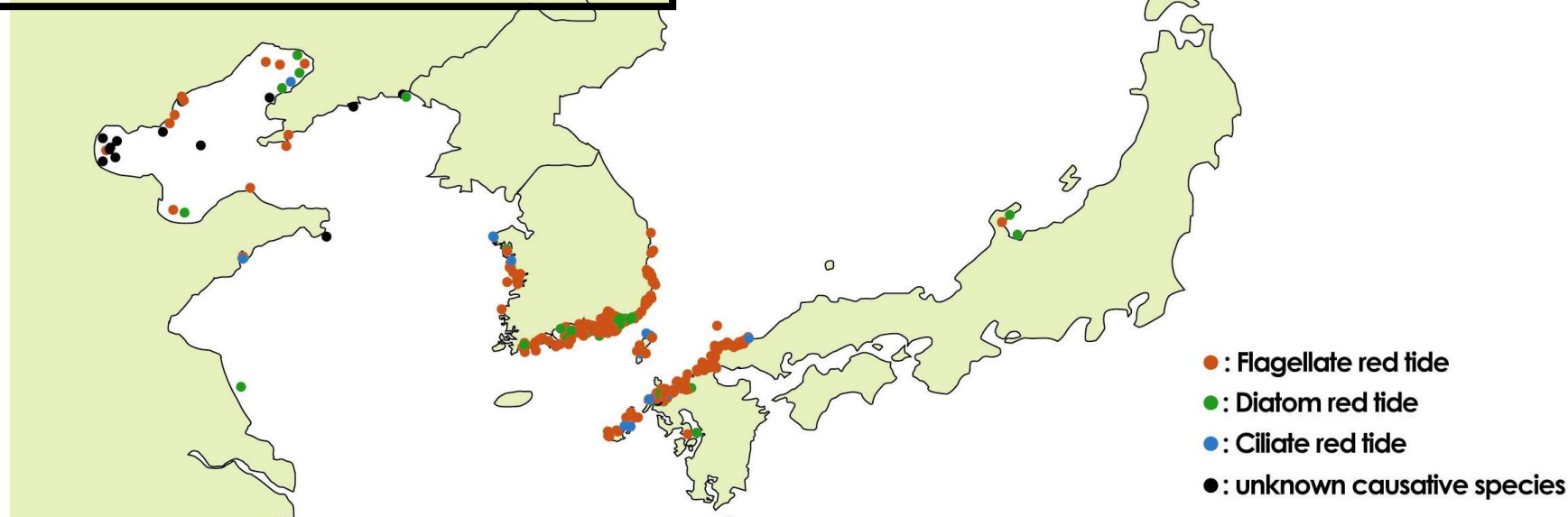
The number of red tides

China 38

Japan 148

Korea 259

Russia 12



Source: *Integrated Report on HABs for the NOWPAP Region*
CEARAC Report, 2005



Комплексные программы мониторинга ВЦВ (были в ДВО РАН)

Цель - оценка состояния фитопланктона моря дистанционными методами.

Ключевая проблема – мониторинг вредоносного цветения водорослей с идентификацией видов водорослей.

Решаемые задачи:

- дистанционное зондирование атмосферы для оценки вертикального распределения коэффициентов ослабления и рассеяния солнечного излучения и решения задачи атмосферной коррекции;
- подспутниковые измерения излучения на поверхности моря для оценки коэффициентов отражения и верификация спутниковых оценок коэффициентов;
- измерение биооптических характеристик в приповерхностном слое на основе флуориметрических методик;
- выращивание водорослей и измерение их спектральных оптических характеристик в лабораторных условиях;
- разработка автоматических средств мониторинга морских акваторий и распознавание вредоносного цветения по спутниковой информации.

Представленные задачи являлись ключевыми для трех центров коллективного пользования:

ЦКП Спутникового мониторинга ДВО РАН;

ЦКП Лазерных методов исследования вещества;

ЦКП Мониторинга вредоносного цветения водорослей и биотоксичности акваторий

ЦКП «ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ»

ИАПУ ДВО РАН, отдел Оптических методов исследования газов и конденсированных сред

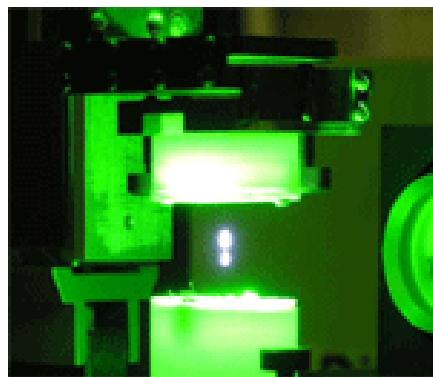
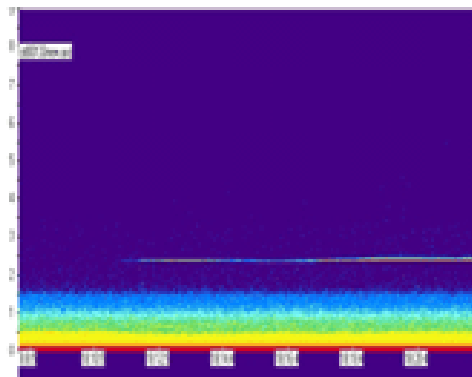
Оборудование: трехволновой лидар для зондирования атмосферного аэрозоля; солнечный фотометр SP-01; CO₂/H₂O газоанализатор Licor Li-840; спекрофлуориметр Varian Cary Eclipse; проточный флуориметр; подводный профилометр SeaBird CTD SBE-19plus с флуоресцентными сенсорами WetLabs и сенсором Licor PAR; термосолинограв SeaBird SBE-45.

ТОИ ДВО РАН, Лаборатория лазерной оптики и спектроскопии

Оборудование: атмосферные лидары корабельного базирования (одно и трех-волновые); проточный флуориметр; лазерный спектрометр.

Морской государственный университет им. Невельского

Оборудование : Nd:YAG laser Brilliant, Quantel



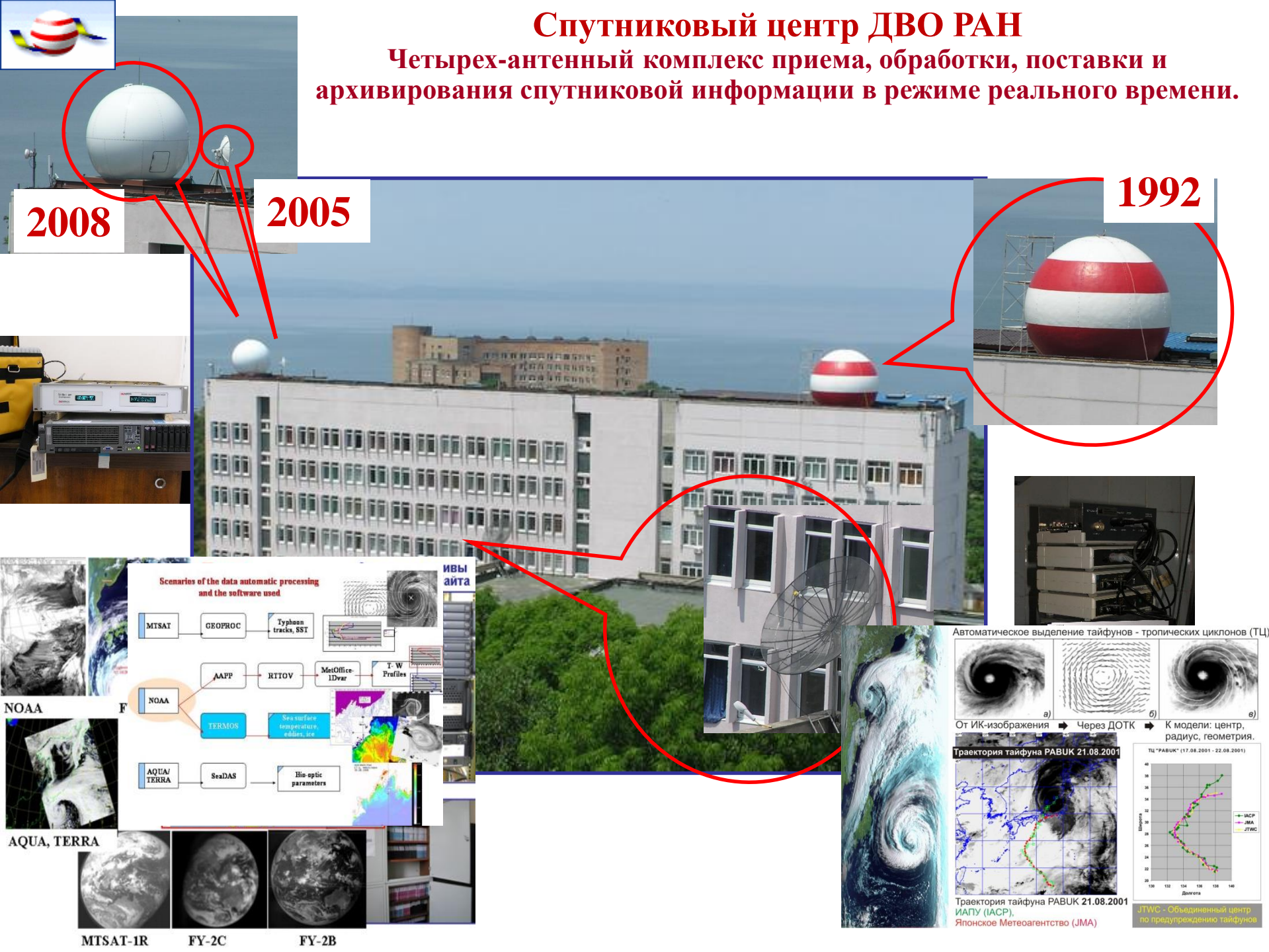
Спутниковый центр ДВО РАН

Четырех-антенный комплекс приема, обработки, поставки и архивирования спутниковой информации в режиме реального времени.

2008

2005

1992



ЦКП Мониторинга вредоносного цветения водорослей и биотоксичности Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского

Работы:

Распознавание микроводорослей и расчет их биомассы в пробах.

Выращивание и определение спектральных характеристик водорослей на разных стадиях жизни.

Веление архивов видового состава в пробах

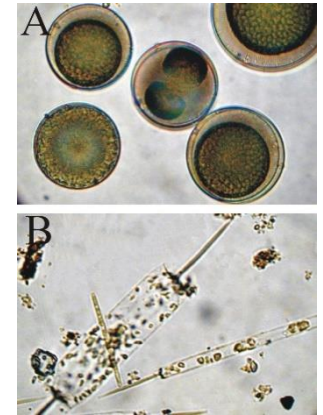


Лаборатория экологии шельфовых сообществ

Водоросли под микроскопом

А – *Coscinodiscus oculus-iridis* ;

В - *Ditylum brightwellii*



Плотность и биомасса фитопланктона Амурского залива 30.08.2006 г						
Ста	Темпер	Время	Плотность N, кл/Л	Биомасса В, мг/м3	Доминирующий вид	% от биом
1	21°C	10 00	125357,14	2842,96	Coscinodiscus oculi	55
					Ditylum brightwellii	40
2	21°C	10 15	231200,00	2455,12	Coscinodiscus oculi	35
					Ditylum brightwellii	48
3	21°C	10 30	131142,86	733,82	Ditylum brightwellii	75
4	21°C	10 45	173828,57	3482,62	Ditylum brightwellii	80
5	21°C	11 00	24857,14	991,15	Coscinodiscus oculi	41
					Ditylum brightwellii	37
6	21°C	10 25	98971,43	1426,08	Ditylum brightwellii	61
7	22°C	12 00	24100,00	1003,18	Coscinodiscus oculi	38
					Ditylum brightwellii	40
8	22°C	12 30	11228,57	646,72	Coscinodiscus oculi	37
					Ditylum brightwellii	30
9	21°C	12 55	8571,43	405,78	Coscinodiscus oculi	60
10	22°C	13 15	12942,86	391,52	Ditylum brightwellii	56
11	22°C	13 35	12000,00	617,92	Coscinodiscus oculi	76
12	21°C	16 30	33942,86	284,84	Coscinodiscus oculi	38
13	22°C	17 00	12900,00	285,90	Coscinodiscus oculi	66
14	22°C	17 30	6857,14	299,11	Coscinodiscus oculi	54

Доминирующие водоросли в пробах залива Петра Великого за 30.08.2006



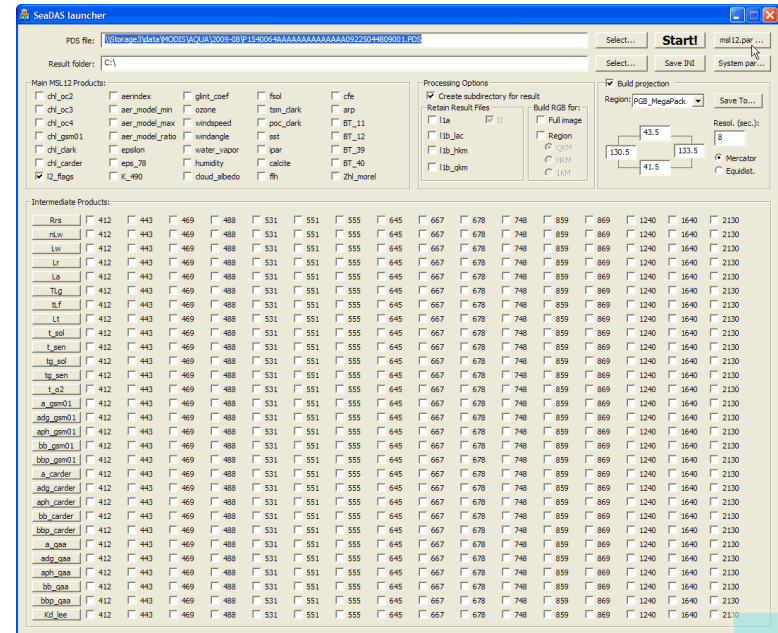
Обработка спутниковых данных

$$L_t = L_A + L_R + L_{RA} + L_g + t_0 t_v (L_W + L_{WC})$$

где L_t - ТОА (излучение, принимаемое радиометром), L_{wc} - поправка на «пенные барашки», L_g - на солнечный зайчик, L_r - Релеевское рассеяние, L_a - аэрозольное рассеяние, L_w – восходящее из воды излучение.

Основа расчетов биопараметров - R_{rs}

$R_{rs}(\lambda) = nL_w(\lambda)/E_s(\lambda)$, где $nL_w(\lambda)$ – нормализованное восходящее из воды излучение в единице телесного угла, $E_s(\lambda)$ – освещенность поверхности океана, λ – центральная длина волны спектрального канала.



Продукты, которые можно заказать при обработке данных радиометра MODIS – около 500 при заданном типе атмосферной коррекции

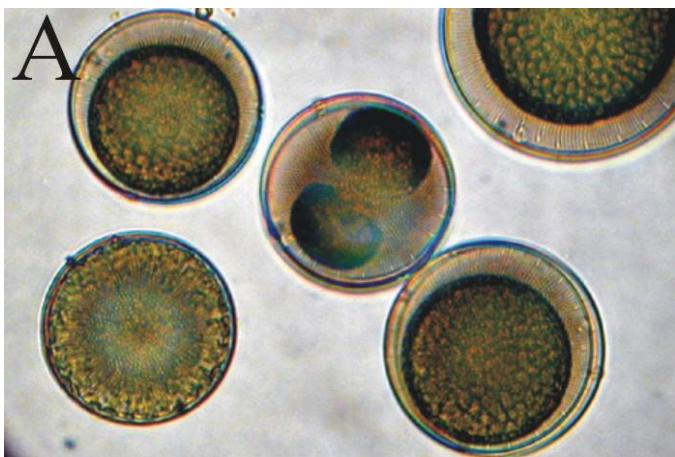


Водоросли и их биомасса, экспедиция 2006 года

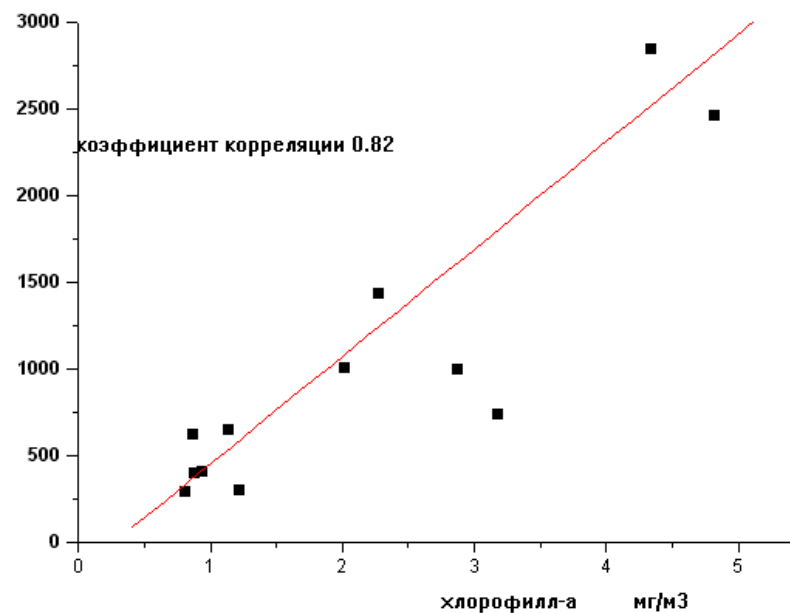
Фото водорослей и их свойства

A – *Coscinodiscus oculus-iridis* ;

B - *Ditylum brightwellii*



биомасса мг/м³

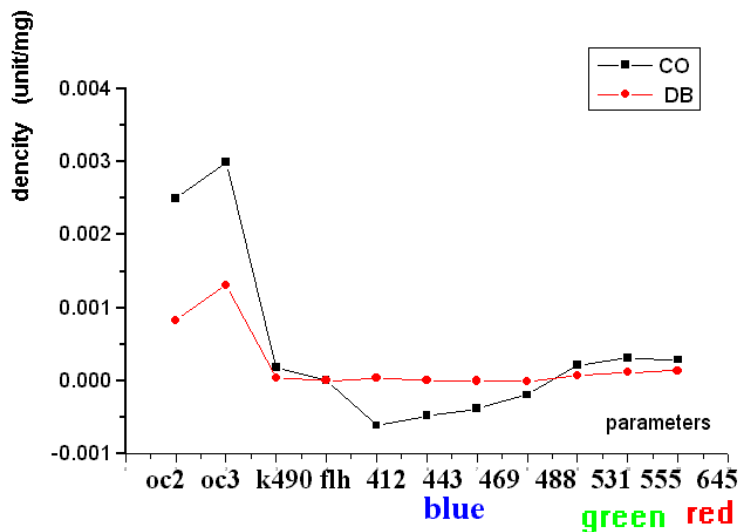


Зависимость между биомассой и
спутниковыми оценками
концентрации хлорофилла-а



Решение задачи идентификации вида водоросли

Экспедиция 2006 года



Изменчивость излучения L канала k:

$$L_k - L_w = \sum C_i \cdot L_{i,k}, \text{ где}$$

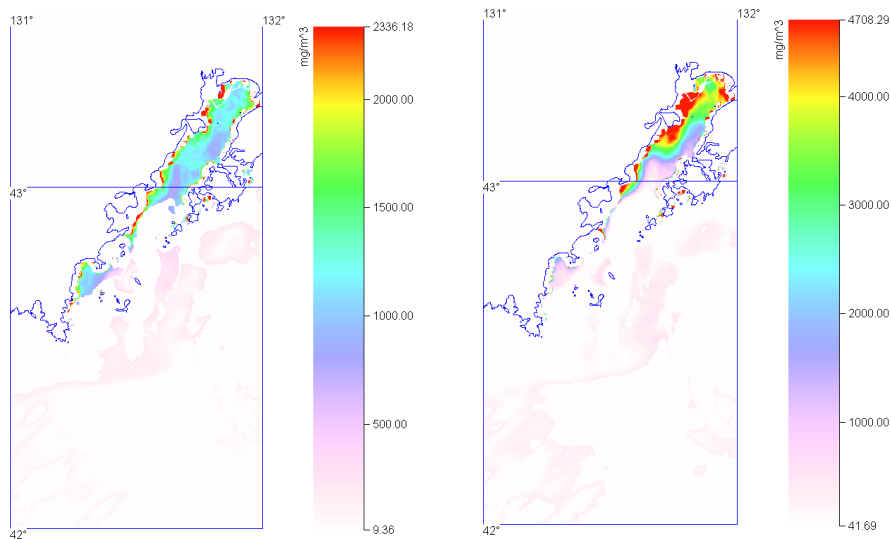
L_w - излучение чистой воды; C_i - концентрация водоросли i ; $L_{i,k}$ - характеристика-предиктор водоросли i в канале k .

Оценки концентраций
CO и DB

Спектральные характеристики
водорослей

CO - *Coscinodiscus oculus-iridis* ;

DB - *Ditylum brightwellii*

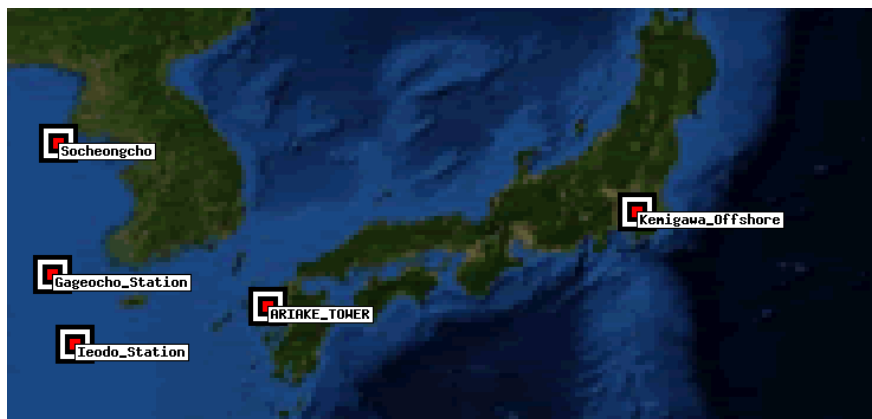




Трудности

При использовании атмосферной коррекции NIR ошибки расчета концентрации хлорофилла-а рекомендуемым методом расчета ОСЗ могут достигать сотни процентов. При MUMM-коррекции таких ошибок нет.

Верификация точности атмосферной коррекции NIR и MUMM данных радиометра MODIS/AQUA в ДВ регионе



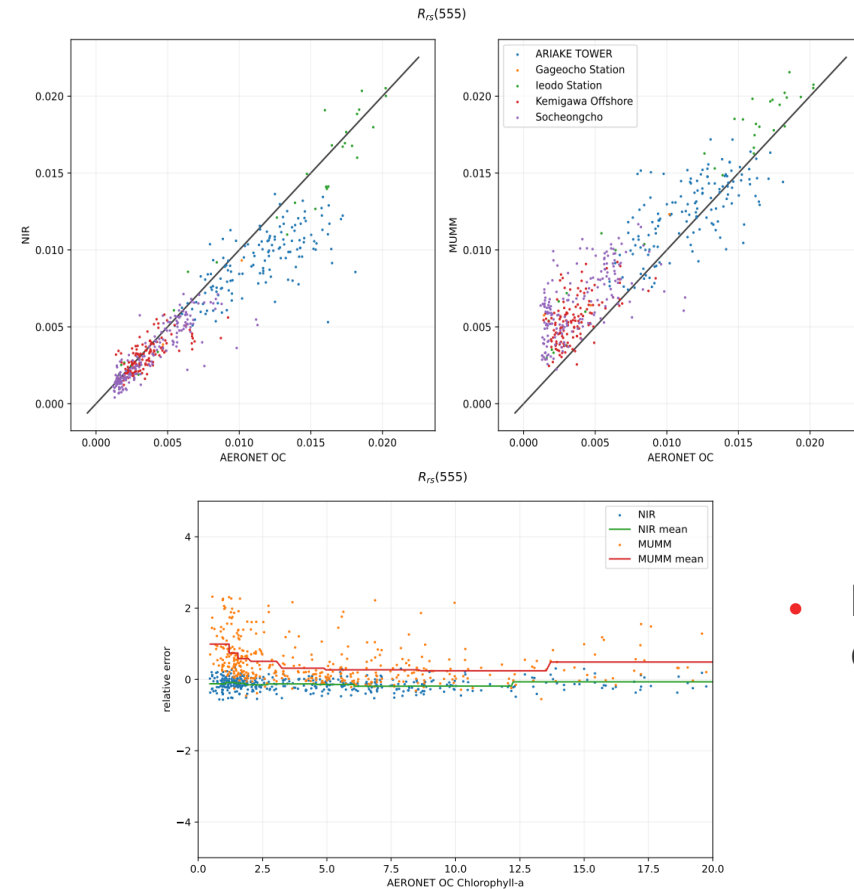
AERONET OC станции

Station name	Latitude	Longitude
Gageocho Station	33.942N	124.593E
Ieodo Station	32.123N	125.182E
Socheongcho	37.423N	124.738E
ARIAKE TOWER	33.104N	130.272E
Kemigawa Offshore	35.611N	140.023E

Использовались все безоблачные наблюдения с 2011 по май 2022 г. – всего 480 согласованных по времени и месту наблюдений.



Ошибки R_{rs}

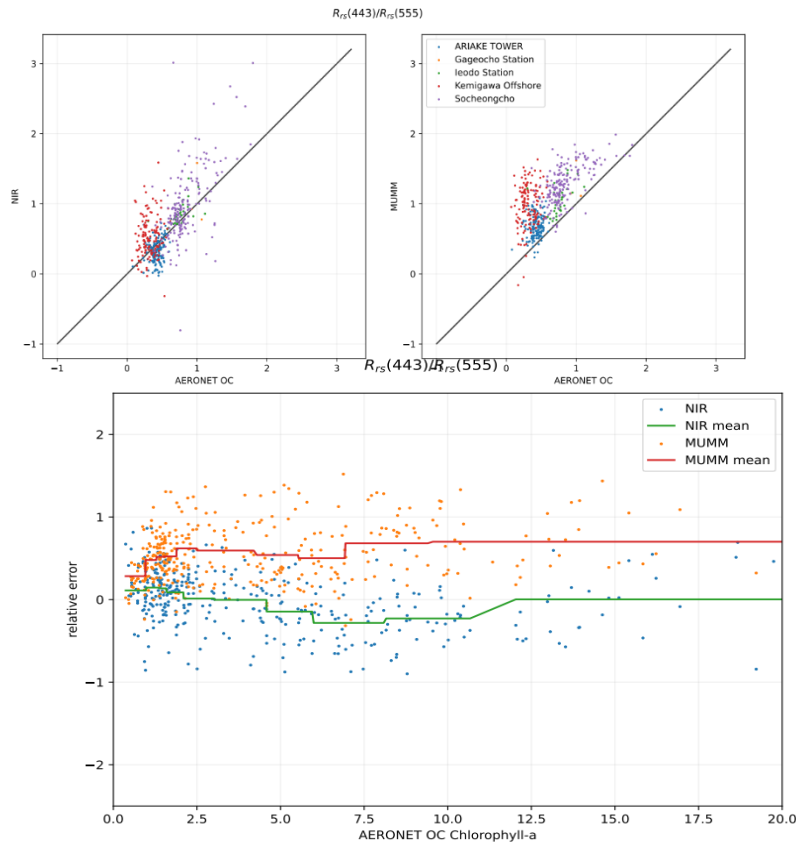


	NIR	MUMM
$R_{rs}(412)$	$\bar{x} = -0.30474 \pm 0.0265$ $\sigma = 0.5058758$	$\bar{x} = 1.4209295 \pm 0.0635$ $\sigma = 1.2112465$
$R_{rs}(443)$	$\bar{x} = -0.17739 \pm 0.0189$ $\sigma = 0.3687709$	$\bar{x} = 1.2642695 \pm 0.0524$ $\sigma = 1.019203$
$R_{rs}(488)$	$\bar{x} = -0.09308 \pm 0.0112$ $\sigma = 0.2446858$	$\bar{x} = 0.983093 \pm 0.0397$ $\sigma = 0.8690223$
$R_{rs}(531)$	$\bar{x} = -0.01751 \pm 0.0134$ $\sigma = 0.1985728$	$\bar{x} = 1.0298453 \pm 0.0603$ $\sigma = 0.8941532$
$R_{rs}(555)$	$\bar{x} = -0.13027 \pm 0.0076$ $\sigma = 0.1708757$	$\bar{x} = 0.5003483 \pm 0.0255$ $\sigma = 0.5685637$
$R_{rs}(667)$	$\bar{x} = -0.06993 \pm 0.0169$ $\sigma = 0.303255$	$\bar{x} = 0.7646932 \pm 0.0367$ $\sigma = 0.6572101$

- NIR даёт меньшую систематическую и случайную ошибки



Ошибки индексов



	NIR	MUMM
$R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$	$\bar{x} = -0.01633 \pm 0.0179$ $\sigma = 0.3485577$	$\bar{x} = 0.5508407 \pm 0.0177$ $\sigma = 0.345098$
$R_{rs}(412)/R_{rs}(488)$	$\bar{x} = -0.22436 \pm 0.024$ $\sigma = 0.4579577$	$\bar{x} = 0.3636559 \pm 0.0169$ $\sigma = 0.3227465$
$R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$	$\bar{x} = -0.16796 \pm 0.0287$ $\sigma = 0.5483379$	$\bar{x} = 0.6606372 \pm 0.026$ $\sigma = 0.4963472$

- У MUMM-коррекции присутствует существенная систематическая ошибка, однако случайная ошибка при этом меньше, чем у NIR-коррекции.
- У NIR-коррекции систематическая ошибка (занижение) увеличивается вместе с концентрацией хлорофилла «а».



Коррекция индексов цветности

- Региональный алгоритм на основе MUMM-коррекции

$$R_{rs}(n/m)' = R_{rs}(n)/R_{rs}(m) * K_{n,m}$$

Расчет концентрации хлорофилла-а алгоритмом ОСЗ:

Ошибка для АК NIR была 2,5 мг/м³, а для АК MUMM – 2,6 мг/м³.

Около 10% величин $R_{rs}(412)$ являются отрицательными при NIR- коррекции

Данные расчетов совпадают с данными Центра космических полетов имени Годдарда (NASA) . При MUMM коррекции встретилось всего одно такое значение.

Более того, почти все эти точки соответствовали случаям высоких концентраций хлорофилла-а – не менее 10 мг/м³. Концентрация была завышена в среднем в 1,8 раза при АК NIR. При АК MUMM на тех же данных концентрация была завышена только в 1,2 раза.

	K
$R_{rs}(412)/R_{rs}(443)$	0.9244662
$R_{rs}(412)/R_{rs}(488)$	0.712104
$R_{rs}(443)/R_{rs}(488)$	0.77598
$R_{rs}(412)/R_{rs}(531)$	0.678366
$R_{rs}(443)/R_{rs}(531)$	0.728895
$R_{rs}(488)/R_{rs}(531)$	0.9358627
$R_{rs}(412)/R_{rs}(555)$	0.5680959
$R_{rs}(443)/R_{rs}(555)$	0.6172711
$R_{rs}(488)/R_{rs}(555)$	0.7462649
$R_{rs}(531)/R_{rs}(555)$	0.9025631
$R_{rs}(412)/R_{rs}(667)$	0.7591281
$R_{rs}(443)/R_{rs}(667)$	0.8307093
$R_{rs}(488)/R_{rs}(667)$	0.9911452
$R_{rs}(531)/R_{rs}(667)$	1.2395829
$R_{rs}(555)/R_{rs}(667)$	1.3448466



Методика распознавание рода микроводоросли по данным спутникового дистанционного зондирования

Ключевая проблема – мониторинг вредоносного цветения водорослей с идентификацией видов водорослей.

Физические основы.

Яркость моря :

$$Rrs(\lambda) = f(\lambda) \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$$

где $f(\lambda)$ – некоторая известная функция от длины волны λ , $a(\lambda)$ – коэффициент поглощения света компонентами морской воды в приповерхностном слое, $b_b(\lambda)$ – коэффициент рассеивания назад.

$$a(\lambda) = a_0(\lambda) + \sum C_i a_i^*(\lambda)$$
$$b_b(\lambda) = b_{b0}(\lambda) + \sum C_i b_{bi}^*(\lambda)$$

где C_i – концентрация биомассы водоросли i в воде, $a_i^*(\lambda)$ и $b_{bi}^*(\lambda)$ – спектральные параметры единицы биомассы водоросли i , $a_0(\lambda)$ и $b_{b0}(\lambda)$ – параметры других компонент воды

Оптический паспорт водоросли - $a_i^*(\lambda)$ и $b_{bi}^*(\lambda)$ – спектральные параметры единицы биомассы

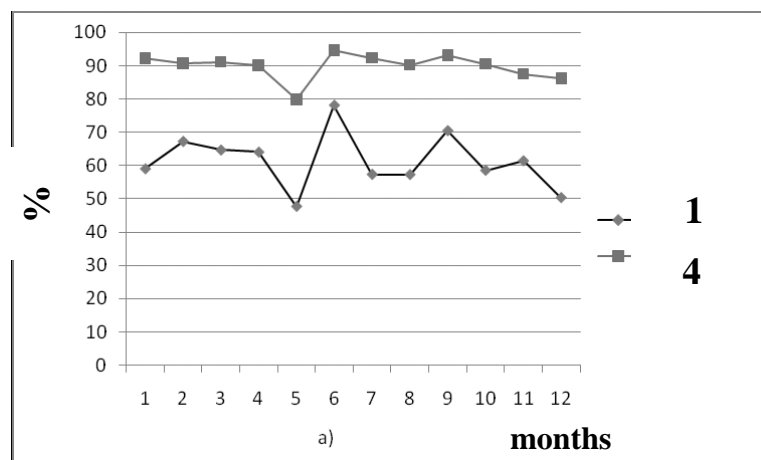
Проблемы:

- видов водорослей много (тысячи)
- «пестрый» состав проб воды

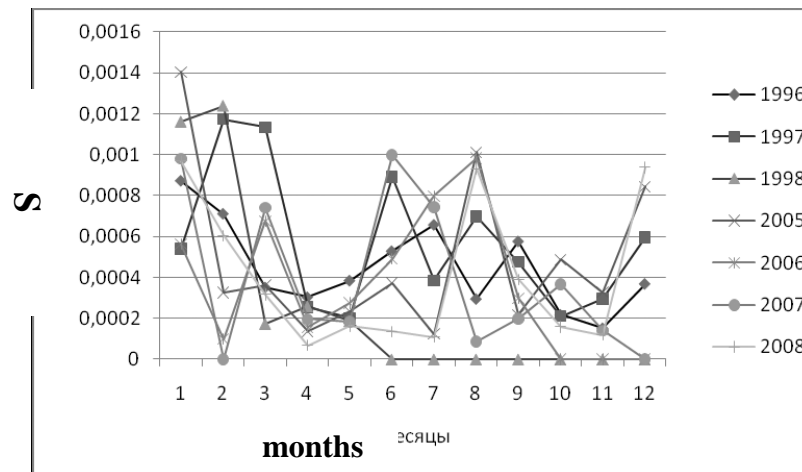


Биоразнообразие фитопланктона

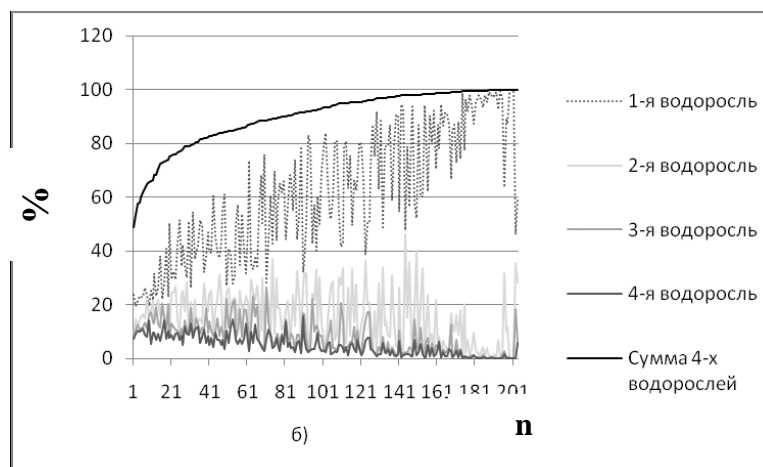
(По результатам анализа архивов ННЦМБ ДВО РАН)



Средний процент биомассы одной и 4-х Доминирующих водорослей.



Изменчивость среднего сечения клеток в пробах.



Изменчивость процентного состава 4-х доминирующих водорослей.



Помесячная вероятность доминирования водорослей.

Распределение родов водорослей по доле биомассы в пробах

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Thal.	Thal.	Thal.	Chaet.	Chaet.	Cosc.	Noct.	Gym.	Dit.	P.nitz	Thlm.	Thal.
Cosc.	Cosc.	Pyx.	Pleur.	Prot.	Rhiz.	Eutr.	Pror.	Thal.	Rhiz.	P.nitz	P.nitz
Chaet.	Chaet.	Nav.	Dinob.	Rhiz.	Thlm.	Thlm.	Skel.	Rhiz.	Thal.	Rhiz.	Chaet.
Rhiz.	Prot.	Prot.	Thal.	Thlm.	Noct.	Skel.	Chaet.	Noct.	Skel.	Dact.	Lept.
Pleur.	Mel.	Rhiz.	Nav.	Dinob.	Dinop.	Pror.	Cosc.	Chaet.	Thlm.	Dipl.	Cosc.
Lept.	Rhiz.	Gyrd.	Prot.	Nav.	Chaet.	Scrip.	Prot.	P.nitz	Noct.	Thal.	Rhiz.
Eutr.	Lept.	Chaet.	P.nitz	Cosc.	P.nitz	Dipl.	Dit.	Cer.	Dict.	Lept.	Prot.
Mel.	Eutr.	Lept.	Gyrd.	Dinop.	Prot.	Chaet.	Dipl.	Gyrd.	Dact.	Chaet.	Dact.
Prot.	Nav.	Dict.	Thlm.	Dipl.	Thal.	Prot.	Scrip.	Cosc.	Cosc.	Cosc.	Skel.
S.fl.	Pleur.	Plag.	Nitz.	Dact.	Dit.	Cosc.	Thal.	Skel.	Chaet.	Poly.	Pleur.

Роды в столбцах расположены в порядке убывания доли в пробе и разделены горизонтальными линиями на интервалы: выше первой линии доля рода в пробах превышает 10%; между второй линией и первой доля водоросли лежит в диапазоне 1-10%, а ниже второй линии – меньше 1%.

Средний процент биомассы 10-ти доминирующих водорослей для трех наборов данных

dataset	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XI
1	99,43	99,30	95,36	88,53	94,43	95,56	90,74	92,51	80,4	90,95	96,15	99,18
2	99,96	99,97	99,4	99,51	99,82	94,56	91,44	93,9	89,9	79,43	97,48	99,51
3		99,84		95,2	95,84	95,36	86,41	79,52	90,59	85,02	91,43	



Трудности

Недостатки квазианалитического алгоритма Ли

Table 1. A contrast between QAA_v4 and QAA_v5

	$r_{rs}(\lambda) = R_{rs}(\lambda)/(0.52 + 1.7 R_{rs}(\lambda))$	
$u = b_p/(a+b_p)$	$r_{rs}(\lambda) = (g_0 + g_1 u(\lambda))u(\lambda)$	
	$u(\lambda) = \frac{-g_0 + \sqrt{(g_0)^2 + 4 g_1 * r_{rs}(\lambda)}}{2 g_1}$; $g_0=0.089, g_1=0.125$	
	QAA_v5	QAA_v4
$\lambda_0 = 550; 555; 560$	$\chi = \log \left(\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(\lambda_0) + 5 \frac{r_{rs}(667)}{r_{rs}(490)} r_{rs}(667)} \right)$	$\chi = \log \left(\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(\lambda_0) + 2 \frac{r_{rs}(640)}{r_{rs}(490)} r_{rs}(640)} \right)$
	$a(\lambda_0) = a_w(\lambda_0) + 10^{-1.146 - 1.366 \chi - 0.469 \chi^2}$	$a(\lambda_0) = a_w(\lambda_0) + 10^{0.0 + 0.1 \chi + 0.2 \chi^2}$
Exponent of $b_{wp}(\lambda)$	$\eta = 2.0 \left(1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(\lambda_0)} \right) \right)$	$\eta = 2.2 \left(1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)} \right) \right)$
$\zeta: a_{ph}411/a_{ph}443$	$\zeta = 0.74 + \frac{0.2}{0.8 + r_{rs}(443)/r_{rs}(\lambda_0)}$	$\zeta = 0.71 + \frac{0.06}{0.8 + r_{rs}(443)/r_{rs}(555)}$
$\xi: a_{de}411/a_{de}443$	$\xi = e^{S(443-411)}$ $S = 0.015 + \frac{0.002}{0.6 + r_{rs}(443)/r_{rs}(\lambda_0)}$	$\xi = e^{S(443-411)}$ $S = 0.015$
Upper limit for $R_{rs}(667)$	$R_{rs}(667) = 20.0(R_{rs}(\lambda_0))^{1.5}$	$R_{rs}(640) = 0.01 R_{rs}(555) +$ $1.4 R_{rs}(667) - 0.0005 \frac{R_{rs}(667)}{R_{rs}(490)}$
Lower limit for $R_{rs}(667)$	$R_{rs}(667) = 0.9(R_{rs}(\lambda_0))^{1.7}$	
If no $R_{rs}(667)$ measurements or measured $R_{rs}(667)$ out of the limits	$R_{rs}(667) = 1.27(R_{rs}(\lambda_0))^{1.47} +$ $0.00018 \left(\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(\lambda_0)} \right)^{3.19}$	

Спектры поглощения разных родов часто близки, но спектры рассеяния должны отличаться существенно

Предположение об устойчивых зависимостях для Rrs в ближней инфракрасной зоне приводят к огромным ошибкам при расчета показателя рассеяния η , что не позволяет классифицировать водоросли по размеру. Прямые измерения η позволяют.

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^\eta,$$

$$\eta = 2.0 \left(1 - 1.2 \exp \left(-0.9 \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(555)} \right) \right)$$

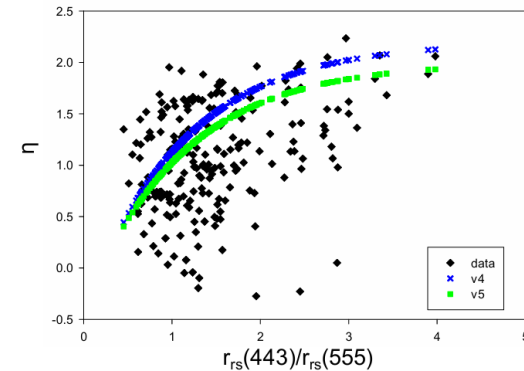


Figure 2. Relationship between η (Y-axis) and $r_{rs}(443)/r_{rs}(555)$ (X-axis). Symbol square for data.

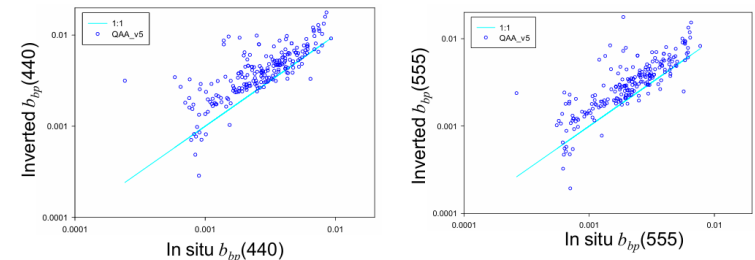


Figure 4. Performance of QAA-v5 with NOMAD data set.



Экологическая катастрофа в акватории Камчатки

пример спутникового мониторинга

Цель.

Распознавание вредоносной водоросли, ее мониторинг, фазы цветения и механизм сбора вредоносных веществ у берега.

Условия, необходимые для наступления экологической катастрофы

Серьезные экологические последствия цветения микроводорослей могут наступать при

- смене вида доминирующей по биомассе водоросли, сопровождающейся генерацией цист (семян) и массы отмершей органики,
- при недостатке питательных веществ у фитопланктона, сопровождающимся увеличенным выделением метаболитов (иногда в виде токсинов, вредных для животных и человека).
- Также требуется механизм концентрации продуктов жизнедеятельности фитопланктона в прибрежной зоне.



Результаты катастрофы, подводный мир: А – до, В – после.

Масштаб – прибрежная область длиной около 500 км.

Зона цветения – прибрежная зона с характерным поперечным размером около 100 км.



Используемые спутниковые данные

Основные используемые данные – радиометр MODIS спутника AQUA (пространственное разрешение 1 км) и RGB-изображения спутников SkySat-C (Planet Labs Inc., пространственное разрешение 3м). Анализ ветровой обстановки проводился по данным спутника WindSat.

Используемые продукты и их предназначения

(использовалась не стандартная коррекция атмосферы MUMM; стандартная коррекция NIR при низких углах солнца дает ошибки в сотни процентов):

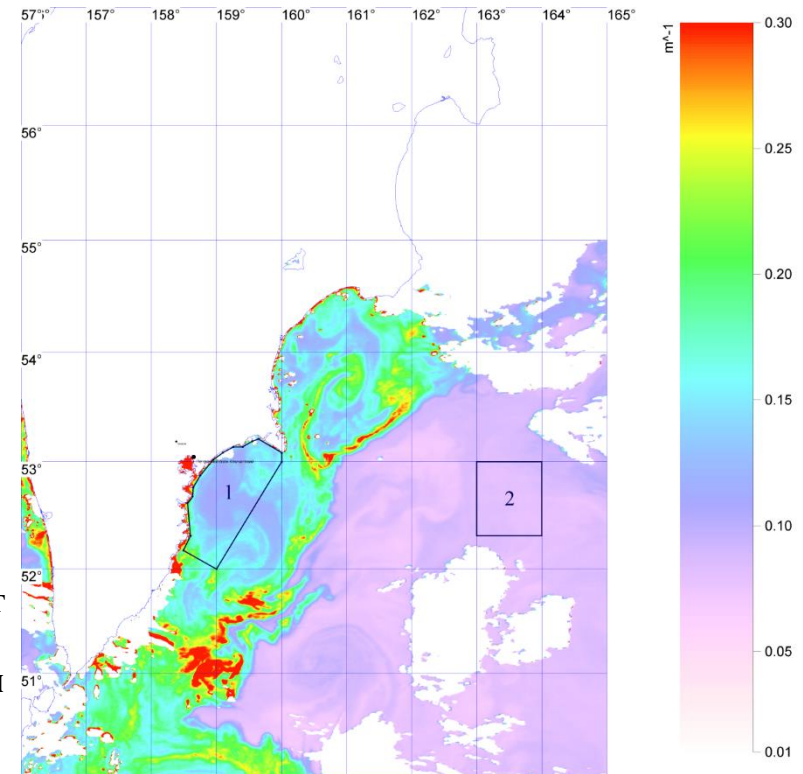
1. Концентрация хлорофилла-а . Требуется для оценки масштабов цветения и состояния фитопланктона.
2. Ёмкость фотосинтеза – отношение флуоресценции flh (680нм) к концентрации хлорофилла chl-a . Требуется для оценки скорости размножения фитопланктона. Чем больше уровень флуоресценции, тем меньше фотонов идет на фотосинтез. Большие величины ёмкости говорят о недостатке питательных веществ, малые – об интенсивном росте фитопланктона.

3. Мутность в форме параметра ослабления света K_d490 на длине волны 490нм. Уменьшение концентрации chl-a при постоянной мутности говорит о стадии отмирания клеток.

4. Прогиб спектра яркости моря, необходимый для идентификации видов водорослей :

$$F_\lambda = (Rrs(\lambda_2) * (\lambda - \lambda_1) + Rrs(\lambda_1) * (\lambda_2 - \lambda)) / (\lambda_2 - \lambda_1) / Rrs(\lambda),$$
 где $Rrs(\lambda_i)$ – яркость моря на длине волны λ_i . Поскольку предполагалось цветение водорослей рода *karenia*, то для нее $\lambda = 488$ нм, $\lambda_1 = 412$ нм, $\lambda_2 = 555$ нм.

4. Температура поверхности океана.

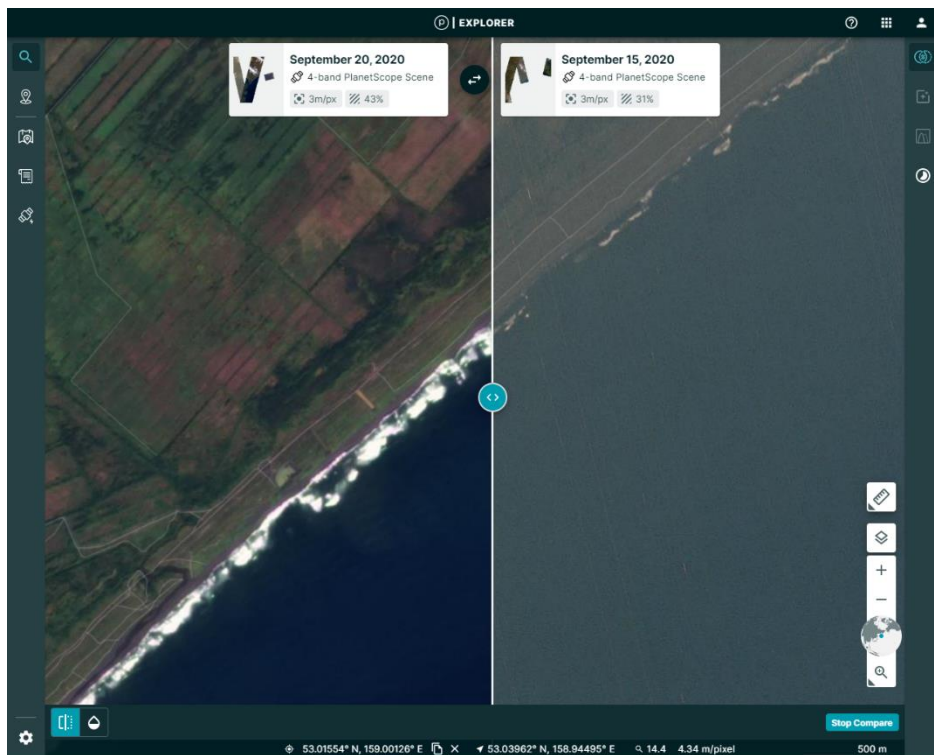


Характеристика мутности воды – коэффициент ослабления на длине волны 488 нм (K_d490).

Радиометр MODIS / AQUA, 09.09.20. Контура – зоны для оценки средних величин биопараметров: 1 – прибрежная зона Авачинского залива, 2 – воды открытого океана.



Пена водоросли Карения («пивной прилив»)

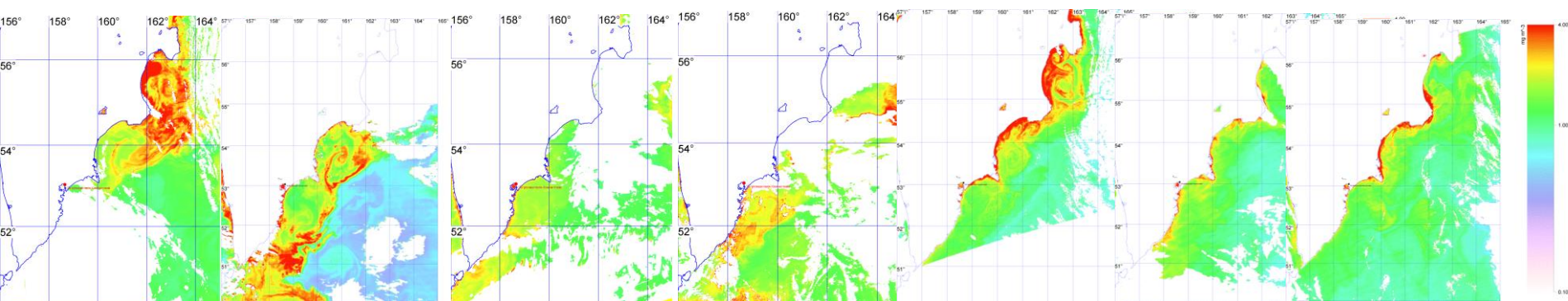


**Светлая полоса шириной
около 100 м.**

Полоса пены за 20 сентября в сравнении с произвольно выбранным изображением до катастрофы при примерно той же силе ветра. Два изображения совмещены по произвольно выбранной вертикальной линии сечения. Изображения показывают масштаб пены в сравнении с масштабом зон прибоя.



Мониторинг цветения. Концентрация хлорофилла-а



Концентрация хлорофилла-а за следующие числа: 5.09, 9.09, 21.09, 25.09, 3.10, 9.10, 12.10.
Концентрации довольно высокие (до 2-7мг/м3), существенно больше прошлых лет.

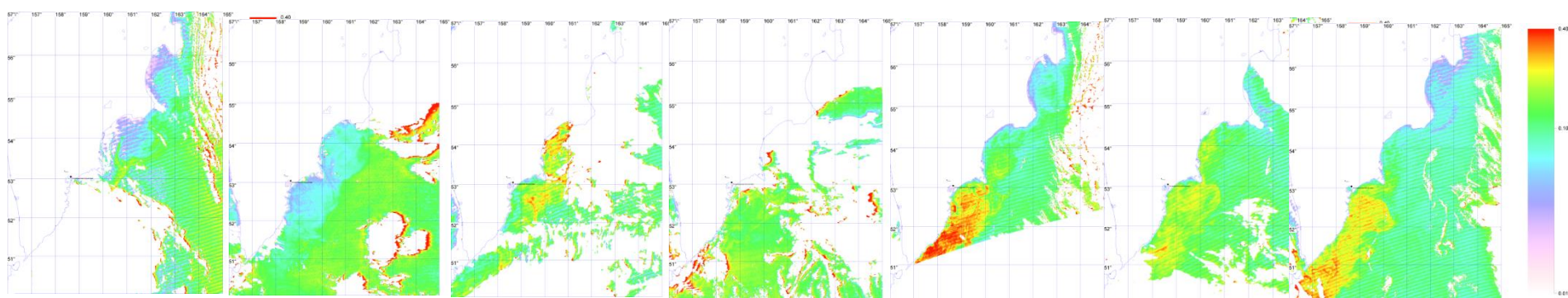
Средние показатели концентрации хлорофилла-а и мутности в Авачинском заливе. 21 сентября наблюдается резкое снижение концентрации хлорофилла-а при неизменной мутности. Это указывает на процесс отмирания клеток, сопровождающийся, по-видимому, образованием цист.

	9 сентября	21 сентября	25 сентября	3 октября
Chl-a в мг/м³				
Прибрежные воды	1,68	1,15	1,7	1,6
Kd490 в м⁻¹				
Прибрежные воды	0,15	0,15	0,17	0,18



Анализ скорости роста биомассы. Ёмкость фотосинтеза

Чем больше ёмкость, тем меньше «еды» у фитопланктона.

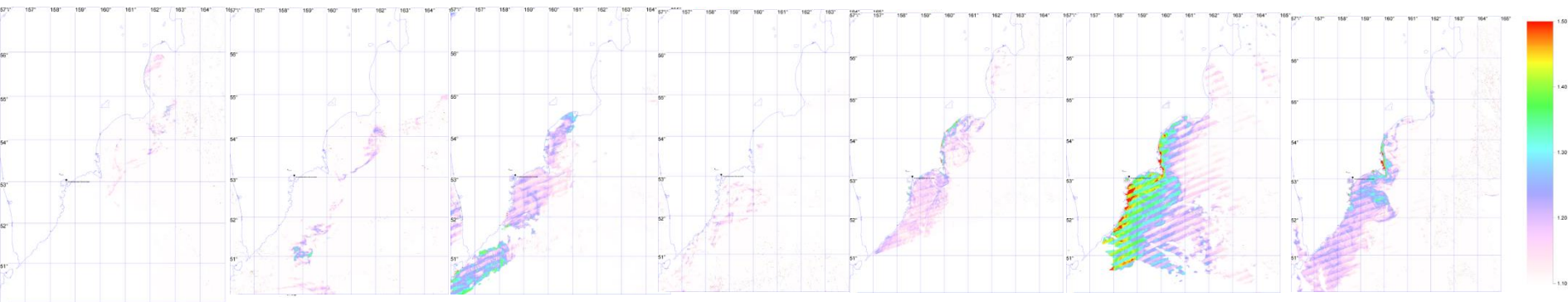


Ёмкость фотосинтеза следующие числа: 5.09, 9.09, 21.09, 25.09, 3.10, 9.10, 12.10.

Авачинский залив. Начало сентября – интенсивный рост фитопланктона (низкая ёмкость).
21-25 сентября стагнация – можно ожидать интенсивного выделения метаболитов (вредных веществ). 3 октября – голод, сопровождавшийся уменьшением биомассы водорослей .



Изменчивость концентрации водоросли *Karenia*



Прогиб спектра яркости моря за следующие числа: 5.09, 9.09, 21.09, 25.09, 3.10, 9.10, 12.10.

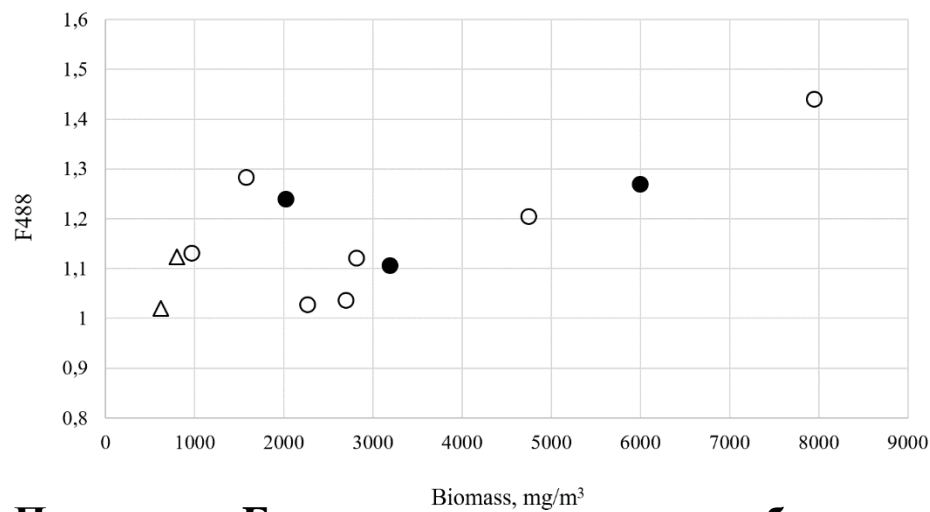
Изменчивость прогиба спектра показывает, что рост водорослей *karenia* начинался в апвеллинговых водах, выносящихся ветром в открытое море. Антициклоническая циркуляция переносила водоросли по кругу и они постепенно заполняли всю прибрежную площадь. 21 сентября в прибрежной зоне доминировали водоросли рода *karenia*, а уже 25 сентября наблюдалось резкое снижение концентраций этого вида. То есть это также подтверждает вывод о том, что цветущая водоросль отмирала и заменялась другими. А такой процесс сопровождается генерацией отмершей органики. В октябре концентрации водорослей рода *karenia* еще больше, но экологической катастрофы не наступает.



Анализ биопараметров

Изменчивость средних величин
биопараметров в Авачинском заливе в
прибрежной зоне (1) и открытом океане (2)

	Дата и время (UTC) month.day (hours:minutes)					
Параметр/регион	09.09 (02:40)	09.21 (1:30)	09.25 (2:40)	10.03 (01:55)	10.09 (01:15)	10.12 (01:45)
Chl-a (mg/m ³)/1	1.60	1.14	1.80	1.62	1.82	1.45
Kd490 (m ⁻¹)/1	0.14	0.14	0.17	0.17	0.18	0.17
F ₄₈₈ /1	0.844	1.169	1.072	1.160	1.365	1.220
flh/chl-a /1	0.06	0.15	0.16	0.23	0.17	0.20
Chl-a (mg/m ³)/2	0.58	0.74	0.74	0.89	0.74	0.81
Kd490 (m ⁻¹)/2	0.08	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09
F ₄₈₈ /2	0.889	0.979	0.958	0.950	1.014	0.915
flh/chl-a (2)	0.14	0.09	0.16	0.11	0.09	0.09
t°C/1	13.750	12.170	11.681	11.570	10.815	9.772



Параметр F_{488} в зависимости от биомассы водорослей рода *Karenia* spp. в пробах. Круги – биомасса *Karenia* более 50%, треугольники – менее. Заполненные кружки – совпадение измерений по времени и месту.

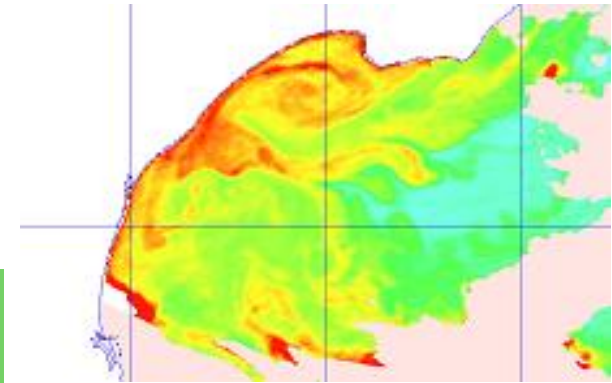


Анализ поля ветра

Доминирующий ветер в сентябре – северо-западный. Такой ветер генерирует апвеллинг в северных частях заливов Камчатского, Кроноцкого и Авачинского, а также на юго-западном побережье – заливы Марии и Камбальский.

Апвеллинг генерирует вынос биогенов на поверхность, что способствует росту фитопланктона. Численность клеток может увеличиваться в 2-6 раз за сутки.

Даунвеллинг за счет ослабления ветра или смены его направления генерирует поверхностное течение к берегу. Все, что легче воды, будет концентрироваться в прибрежной полосе.

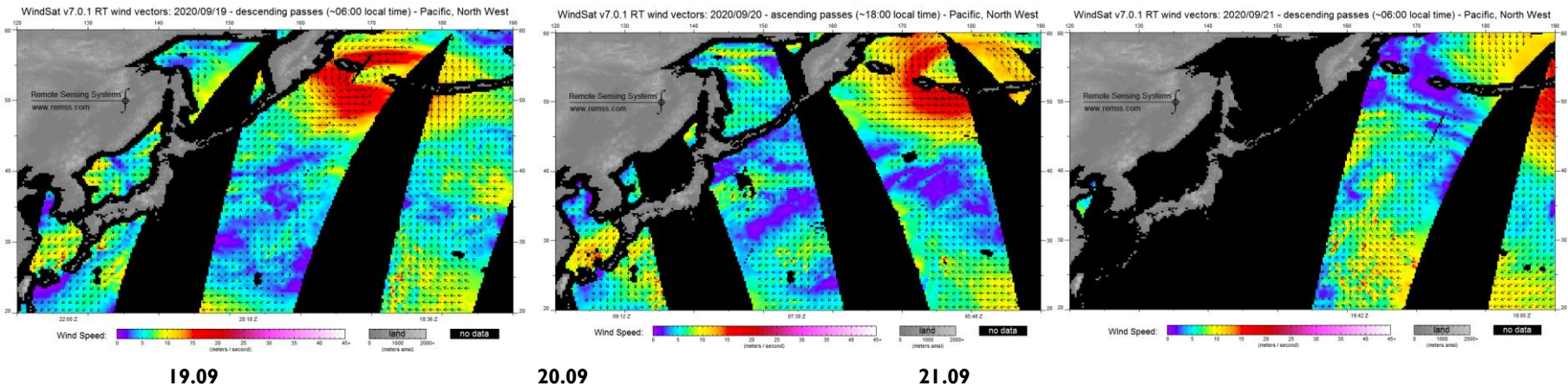


Пример динамики хлорофилла-а в Кроноцком заливе 17.09.2020 в результате апвеллинга. Ветер юго-западный.



Ветер в период экологической катастрофы

Спутник WindSat



19.09 – шторм. Ветер северо-западный 10-20 м/сек. 20.09 ветер 4-10 м/сек. 21.09 – почти штиль.

Даунвеллинг после шторма собрал с поверхности продукты жизнедеятельности фитопланктона и сконцентрировал их в прибрежной полосе.

Ветер и жалобы серфенгистов

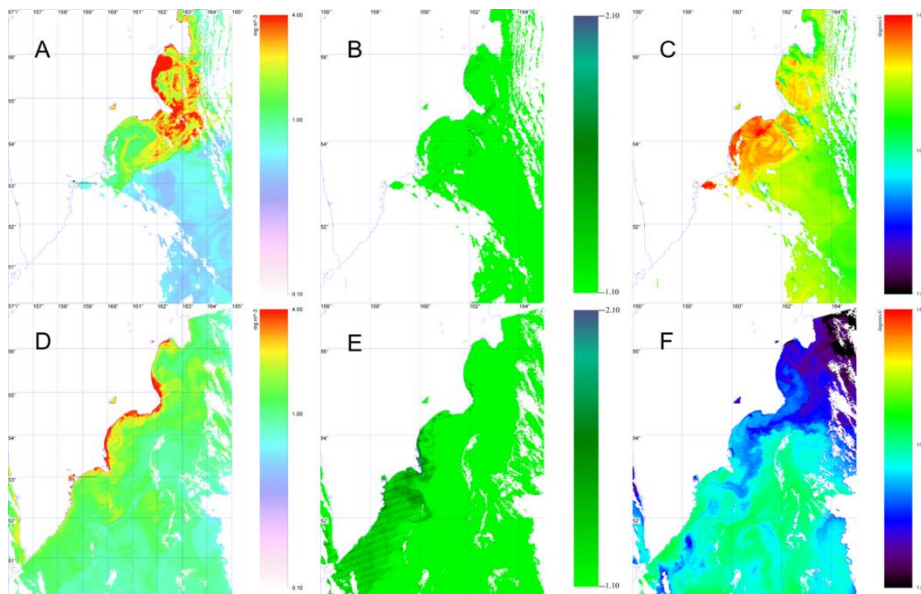
Екатерина Дыба, сообщала (Электронная газета Полит.ру от 16 октября, статья Анны Долгаревой), что 14-го сентября пошла в аптеку за каплями для глаз после катания на волнах. А 20-го получила серьезное воздействие на глаза.

13-го сентября ветер 5-16 м/сек северо-западный. 14-го - 2-10 м/сек. Ветер за 19 и 20-ое на рисунках.



Динамика распространения водоросли *Karenia*

В Авачинский залив вредоносная водоросль пришла с севера из Кроноцкого залива со стороны открытого моря. А возможно даже, и из более северного Камчатского залива. Распространялась водоросль Восточно-Камчатским течением. Циркуляция вод в Авачинском заливе преимущественно антициклоническая. Она разносила водоросль по акватории. В октябрь-ноябре Восточно-Камчатское течение с температурой воды 7–8°C не содержала вредоносную водоросль. Поскольку водоросль при этой температуре благополучно цвела в других районах, то прекращение цветения было обусловлено в основном «смыванием» водоросли в южном направлении.



Изображения хлорофилла-а (A, D), F_{488} (B, E) and ТПО (C, F) в восточных заливах полуострова Камчатка 5 сентября (A–C) и 12 октября (D–F).



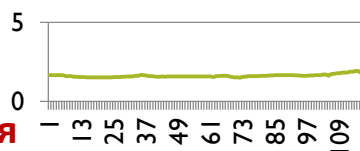
Анализ биопараметров

03.10.2020

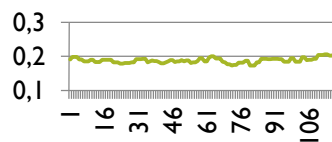
Цель:
выявить закономерности
изменчивости биопараметров
в зависимости от стадий цветения

На участках,
соответствующих цветению
водоросли *Karenia*, т.е. там,
где параметр прогиб был
равен или больше 1,1 ,
строились и
анализировались значения
на профилях четырех
параметров – концентрации
хлорофилла, мутности,
емкости фотосинтеза (ФС),
прогиба.

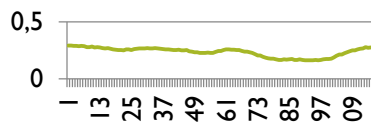
chl_oc3-STSI



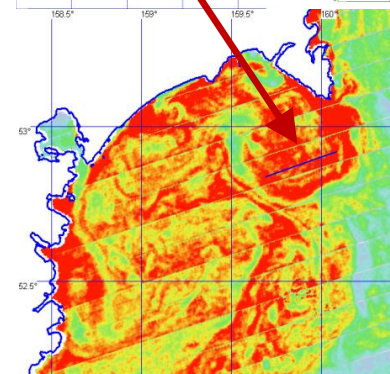
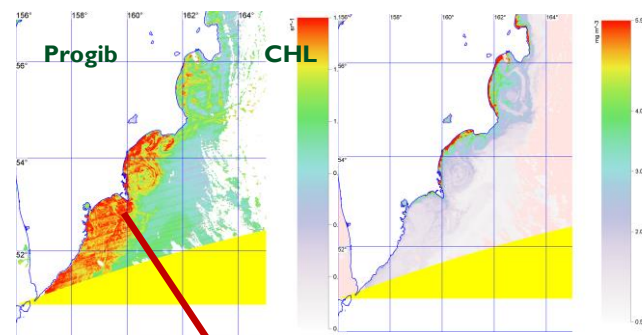
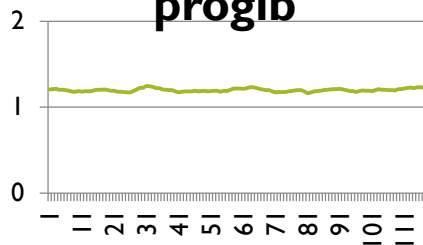
K_490-STSI



flhchl

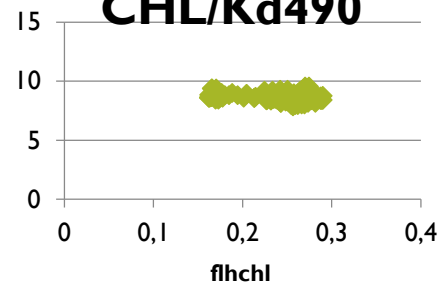


progib



АВАЧИНСКИЙ
ЗАЛИВ

CHL/Kd490





Закономерности взаимодействия биопараметров

В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТАДИЙ ЦВЕТЕНИЯ

Выделяется 3 состояния микроводоросли – сытость, стагнация и голод, которые характеризуются емкостью фотосинтеза:

0-0,08 сытость;

0,08-0,15 стагнация;

>0,15-голод.

Были получены удельные плотности концентрации хлорофилла и величины прогиба по данным, усредненным по всем заливам и в разное время, в зависимости от концентрации хлорофилла.

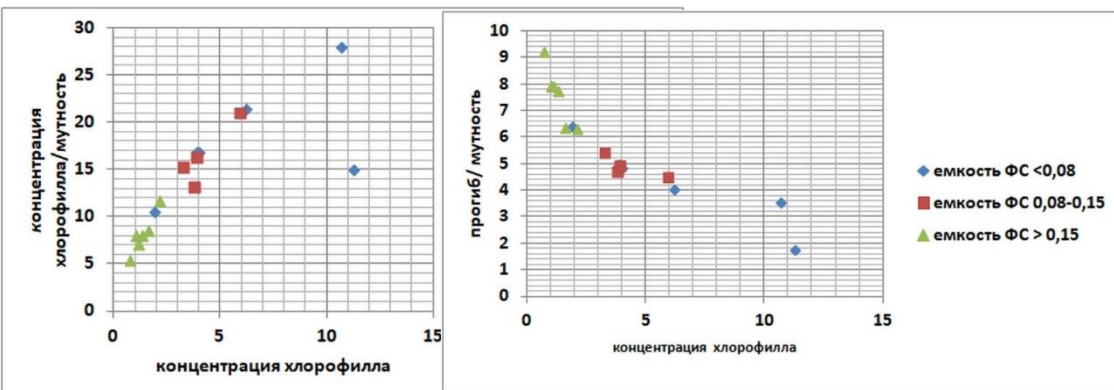
Удельная плотность рассчитывалась относительно мутности K_d-490 . Поскольку разрезы были сделаны вдали от выноса рек, то показатель мутности можно рассматривать как оценку плотности органического вещества в воде.

Наблюдается :

• значительный рост удельной плотности концентрации хлорофилла с ростом концентрации хлорофилла, что довольно неожиданно, поскольку ожидалось постоянство этого параметра. И особенно высокие удельные плотности наблюдаются тогда, когда водоросли находятся в стадии сытости.

• падение удельной плотности прогиба с ростом концентрации хлорофилла. Важно то, что максимальные удельные концентрации прогиба получаются при состоянии голода, что подтверждает естественное предположение о доминировании одного вида водоросли при жесткой борьбе за питание.

• Такие зависимости можно использовать при поиске зон цветения водорослей, находящихся в стадии генерации вредоносных веществ.





Выводы

Основные нерешенные проблемы:

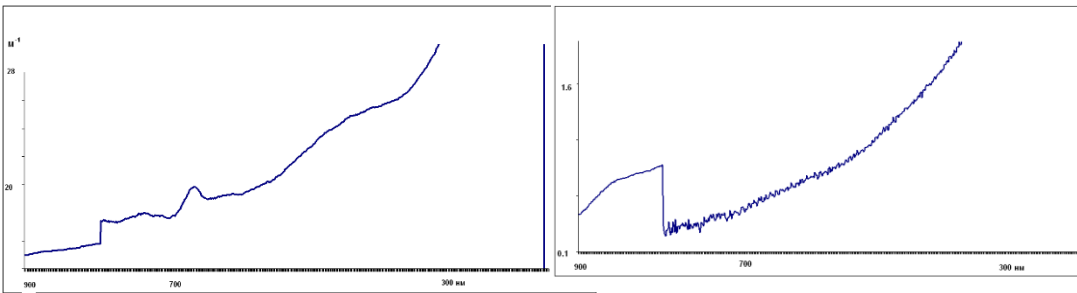
- 1. Атмосферная коррекция. Требуется оценка параметров аэрозоля в синей/ультрафиолетовой области спектра**
- 2. Требуется более надежный алгоритм расчета рассеяния и поглощения излучения компонентами воды**

Возможности распознавания вредоносного цветения:

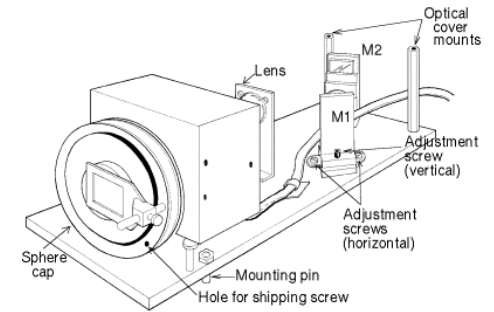
- 1. «Пестрота» видового состава водорослей в пробе не мешает распознаванию цветущей водоросли**
- 2. Распознавание цветущей водоросли дистанционными методами с математической точки зрения не очень сложная задача, но трудоемкая и затратная. Для решения задачи необходимо собирать статистику видового состава в заданной акватории.**
- 3. Мониторинг цветущей водоросли позволяет оценивать динамику ее распространения, стадии развития, условия наступления экологической катастрофы**
- 4. Вредоносные водоросли могут не достигать доминирования по биомассе. Без прямых измерений концентраций токсичных веществ не обойтись.**



Расчет спектральных характеристик водорослей

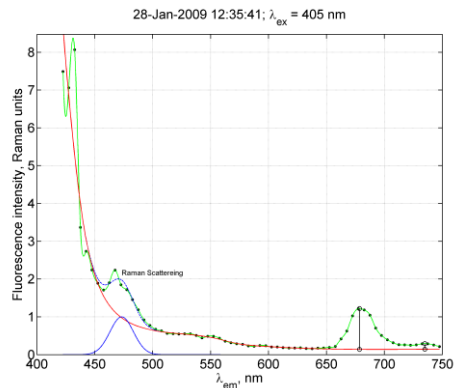


. Коэффициенты ослабления водоросли *Alexandrium tamarense* и ее РОВ.

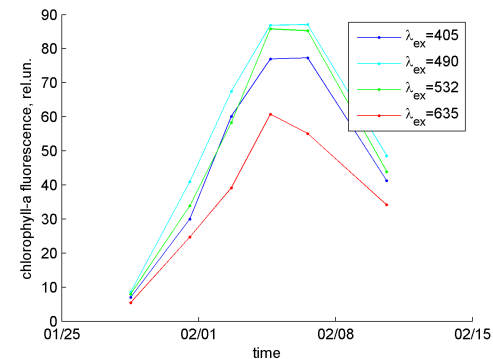


Спектрофотометр Varian Cary-5000

Спекрофлюориметр Varian Cary Eclipse



Анализ флюориметрического спектра.



Флуоресценция хлорофилла-а для разных длин волн и на разных стадиях жизни водоросли *Pseudo-nitzschia*

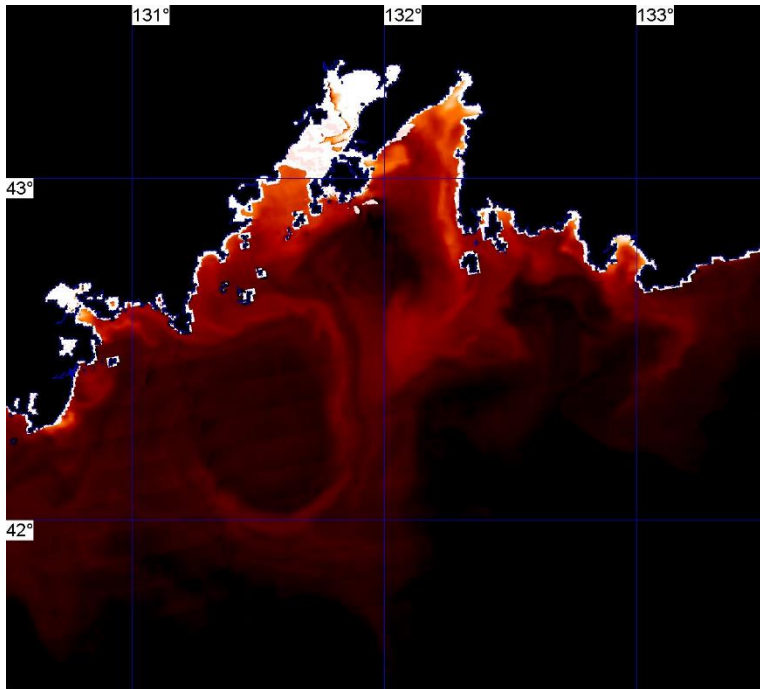
Планирование экспедиционных работ

Планирование экспериментов:

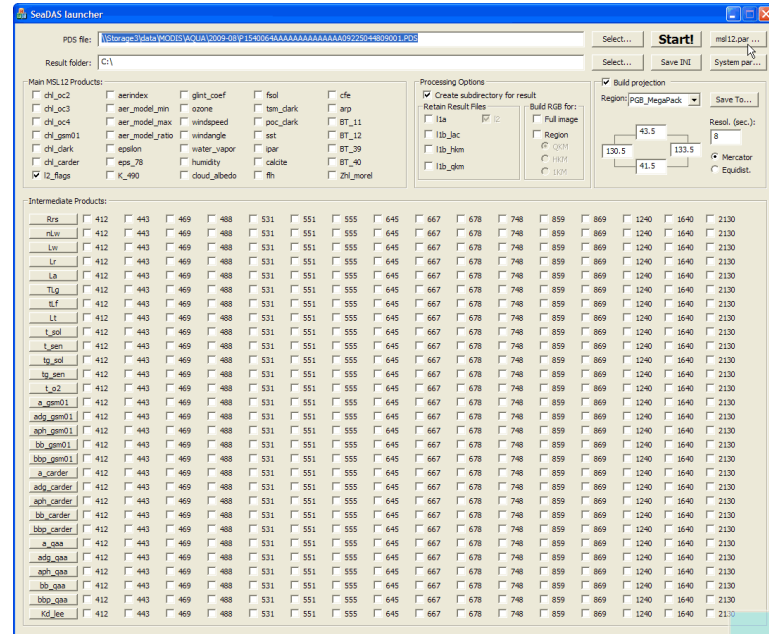
- Наведение на объекты судна по спутниковой информации в режиме реального времени;
- Вертикальное зондирование атмосферы;
- Измерение характеристик падающего и восходящего излучения моря;
- зондирование приповерхностного слоя моря (вертикальные и горизонтальные профили);
- взятие проб на пигменты и видовой состав фитопланктона;
- выращивание водорослей и измерение их спектральных характеристик (в растворах и на отдельной клетке).

Наведение судна на объекты -

Отсутствие « не интересных» измерений



К490 (Мутность)

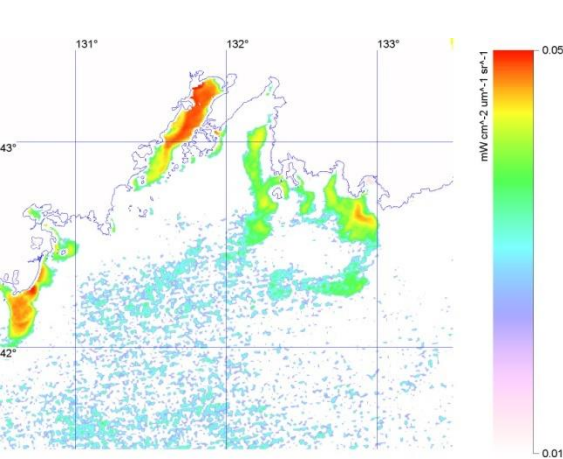


Автоматический расчет различных параметров акватории (SeaDAS, около 200 параметров)

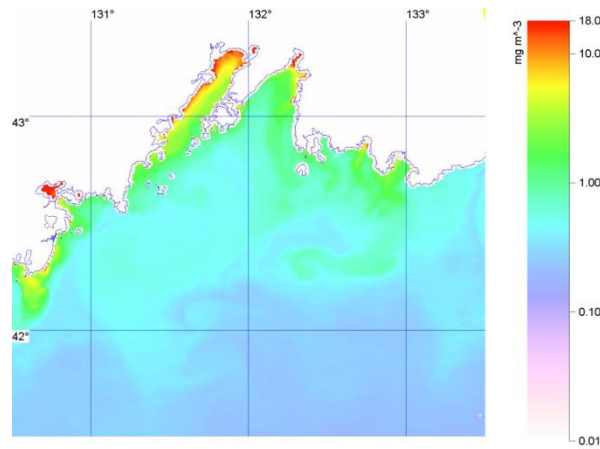
Наведение судна на объекты

Выбор точек измерений по спутниковым данным - по типу вод; по аномалии параметров. Ключевые параметры: температура воды, мутность, флюоресценция, концентрация хлорофилла-а, коэффициент эффективности фотосинтеза, однородность видового состава.

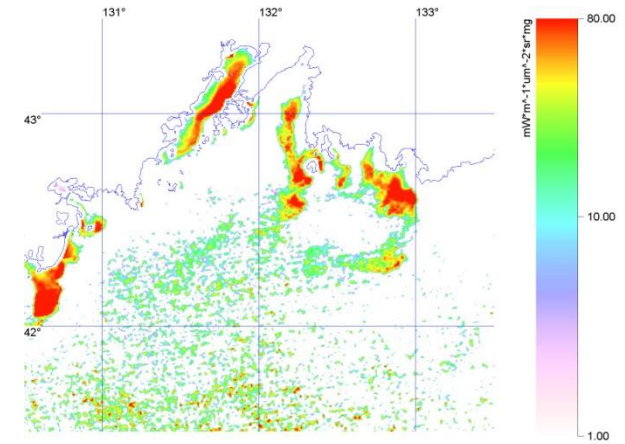
flh



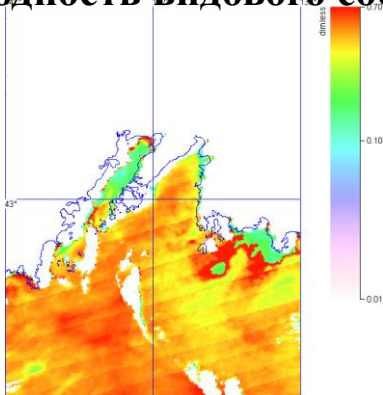
Chl-a



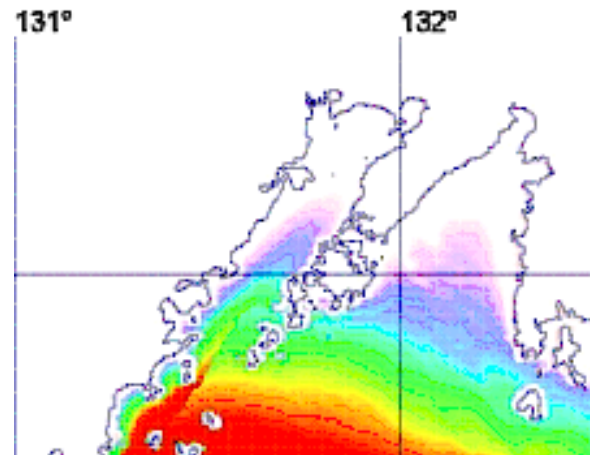
My_CFE



Карта отношений $b_{bp}(\lambda)/a_{ph}(\lambda)$
($\lambda=0.412$ мкм) по Кардеру
(однородность видового состава)

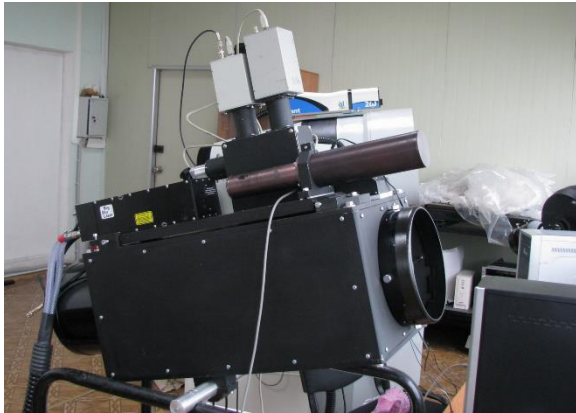


IPAR



Дистанционное зондирование атмосферы

**Расчет вертикальных профилей оптических характеристик атмосферы -
лидарное зондирование и солнечная фотометрия**



Аэрозольный лидар

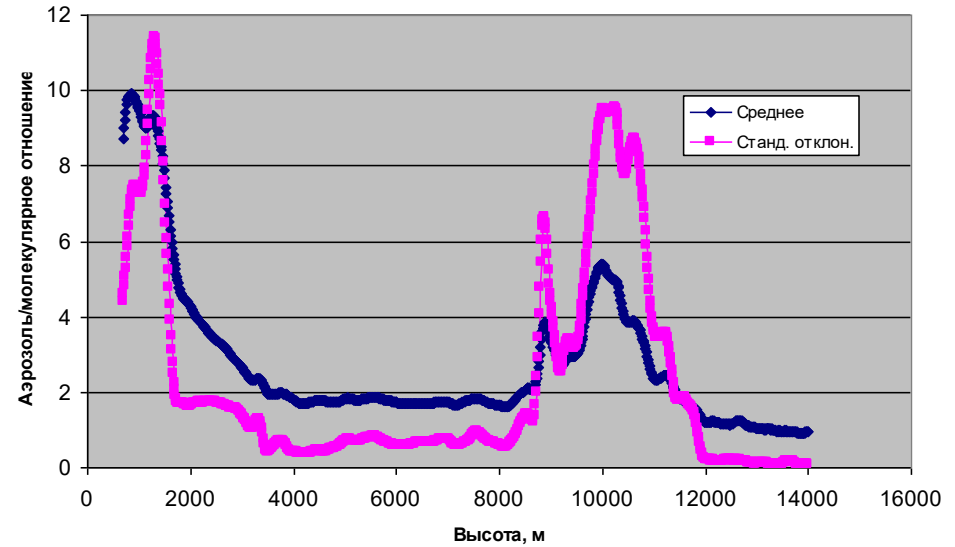
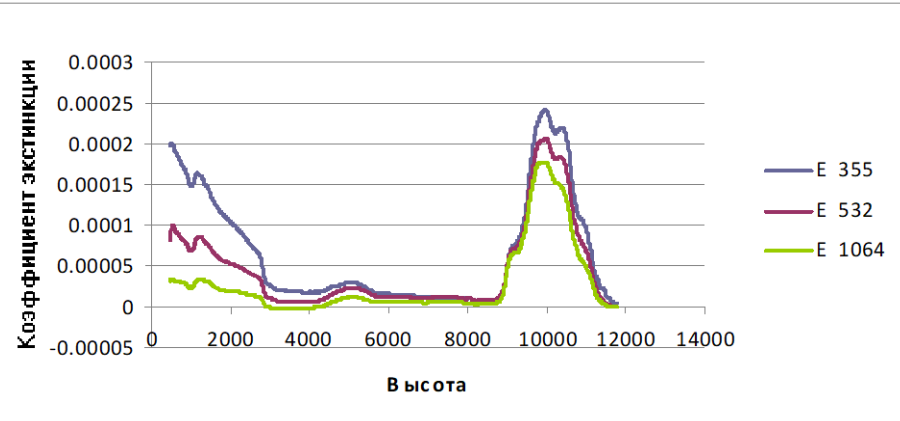


озонный лидар



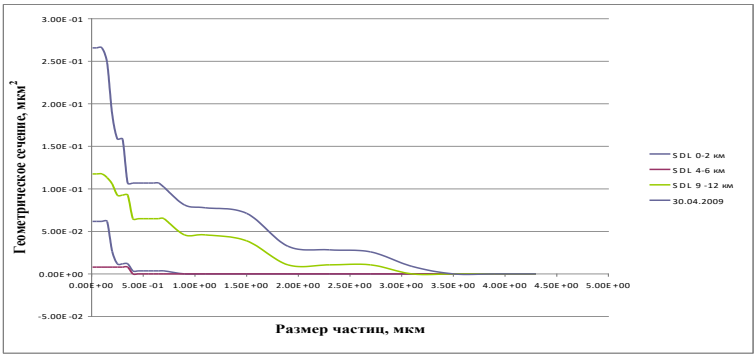
**мобильный лидар
на паруснике Надежда**

Дистанционное зондирование атмосферы



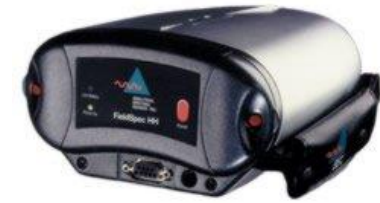
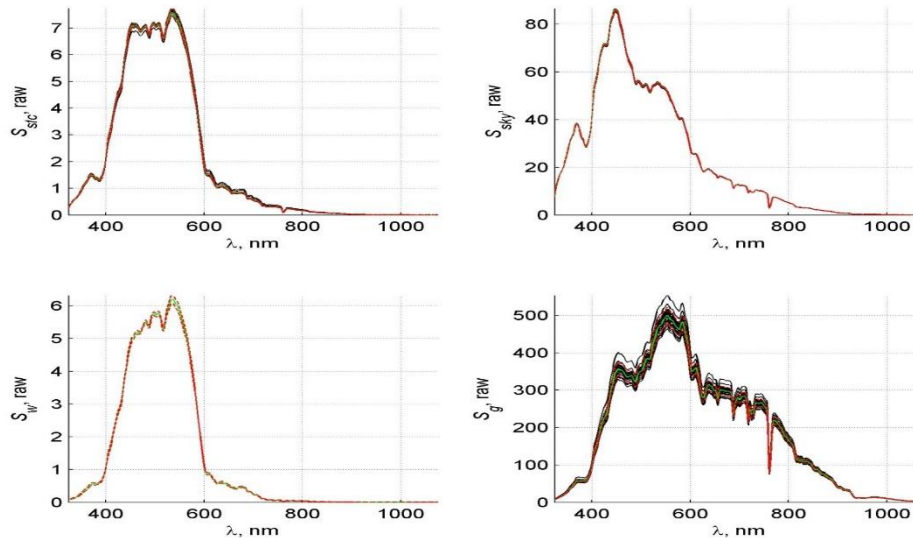
Результат восстановления коэффициента ослабления лазерного излучения на 3-х длинах волн: E355 – 355 нм; E532 – 532 нм; E1064 -1,064 МКМ.

Расположение аэрозольных слоев в континентальной области переходной зоны материк-океан ДВ региона в период апрель-май 2009 года



Функция распределения частиц по размеру

Спектральные коэффициенты отражения



**ASD спектрометри для
надводных и подводных
измерений**

Спектры некалиброванной яркости излучения. (а) восходящего от морской поверхности, (б) неба, (в) восходящего из морской воды, (г) отраженного от Ламбертовской поверхности

Расчет коэффициентов отражения

$$R_{rs}(\lambda, \theta, \phi \in \Omega_{FOV}; \theta_0) = \frac{L_w(\lambda, \theta, \phi \in \Omega_{FOV}; \theta_0)}{E_s(\lambda; \theta_0)}$$

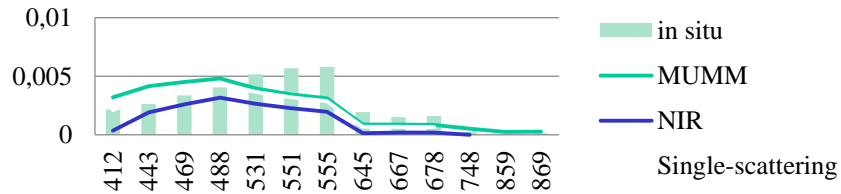
Где $L_w(\lambda, \theta, \phi \in \Omega_{FOV}; \theta_0)$ - спектр яркости восходящего излучения моря,

$E_s(\lambda; \theta_0)$ - спектр освещенности над морской поверхностью

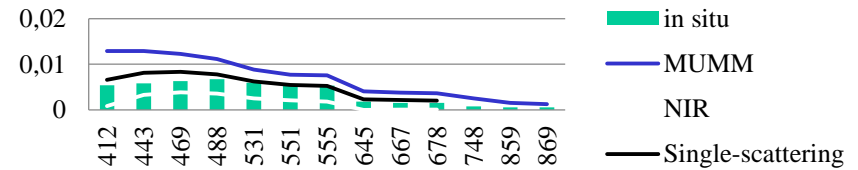
Нормализованные коэффициенты сравниваются со спутниковыми оценками

Коэффициенты отражения

Расчет Rrs

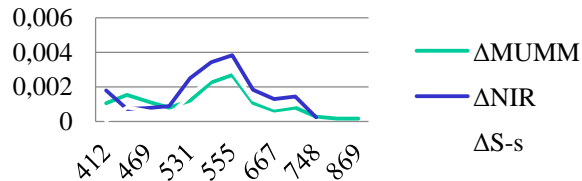


Расчет Rrs

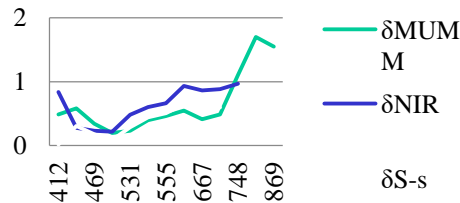


Сравнение спутниковых и подспутниковых оценок коэффициентов отражения (Rrs) в двух пикселях. Сентябрь 2009, спутниковые коэффициенты рассчитаны алгоритмом Кардера для трех алгоритмов расчета атмосферной коррекции.

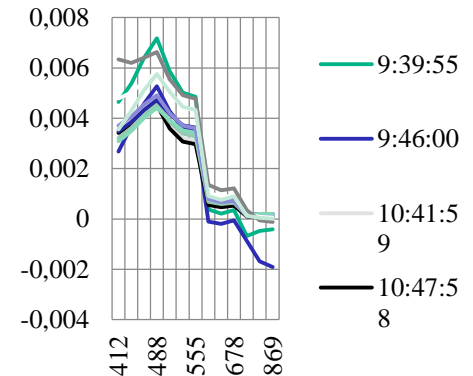
Абсолютная погрешность 31.08.2009 14:05:28



Относительная погрешность 31.08.2009 14:05:28



Абсолютные и относительные ошибки расчета Rrs по спутниковой информации для трех алгоритмов атмосферной коррекции



Суточные измерения Rrs в одной точке

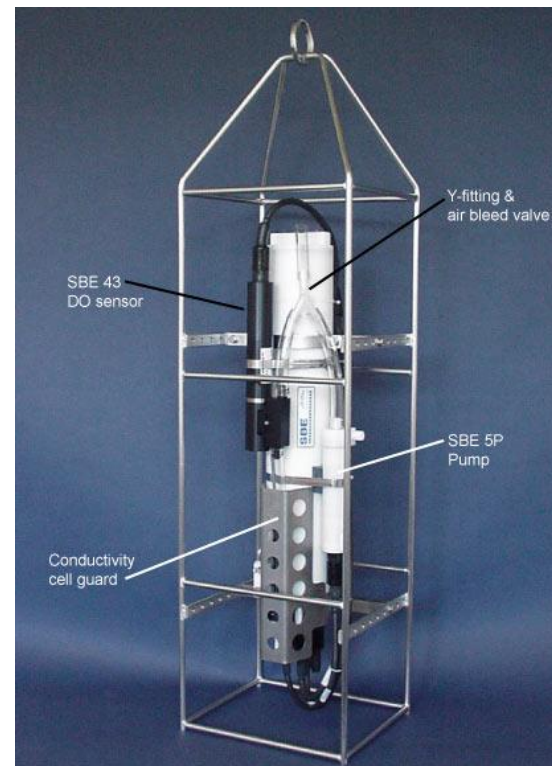
Подводные измерения



Проточный лазерный флуориметр ЛаФ-3 с возбуждающим излучением на длине волны 532 нм и световодная погружаемая приставка, позволяющая измерять спектры ЛИФ морской воды по глубине

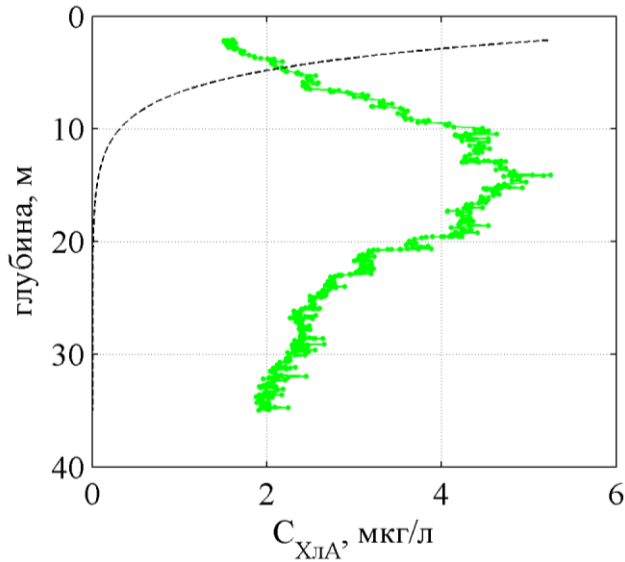


ASD спектрометри (fiber – оптика)

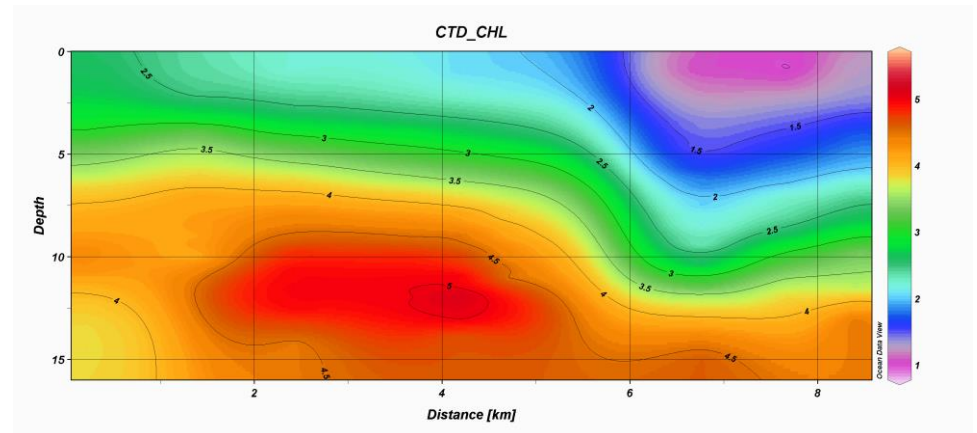
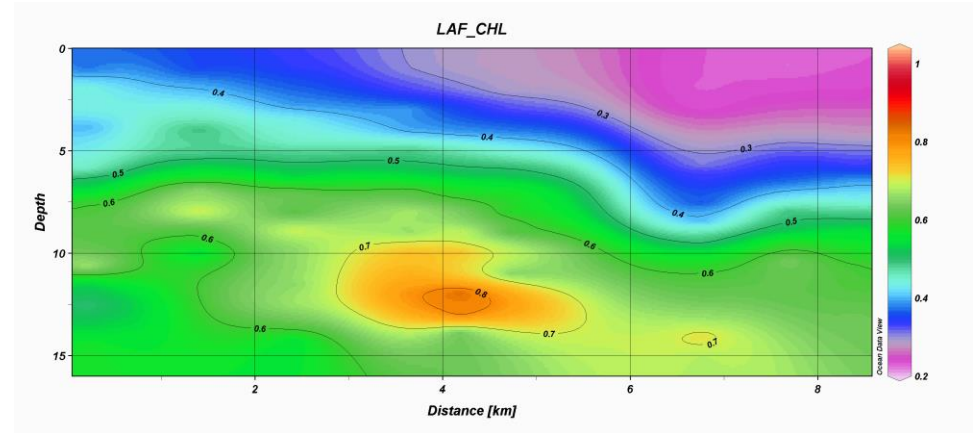


Погружаемый зонд SBE-19-plus фирмы SeaBird (USA), с датчиками температуры (T), солености (S), давления (D), концентрации растворенного органического вещества (СРОВ, датчик фирмы WetLabs), концентрации хлорофилла-а (СХЛА, датчик фирмы WetLabs) в морской воде и датчика величины фотосинтетически-активной радиации (photosynthetically active radiation, PAR, датчик фирмы LICOR) в морской воде. Зонд может быть использован на станциях с глубиной погружения до 250 метров. Концентрация хлорофилла-а и растворенного органического вещества (РОВ) восстанавливаются из измерений флуоресценции морской воды на длинах волн 680 нм и 450 нм при возбуждении излучением светодиодов на длинах волн 420 нм и 370 нм, соответственно.

Примеры измерений

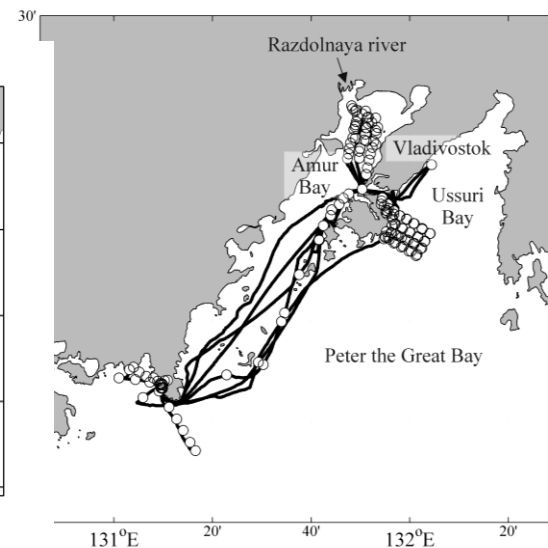
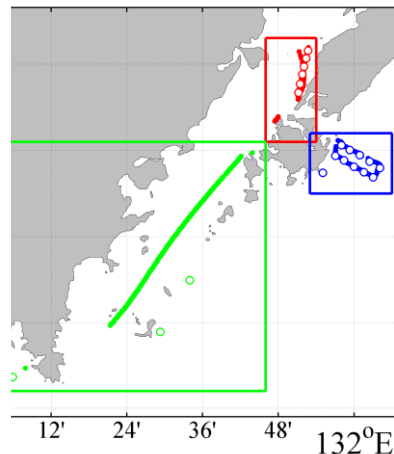
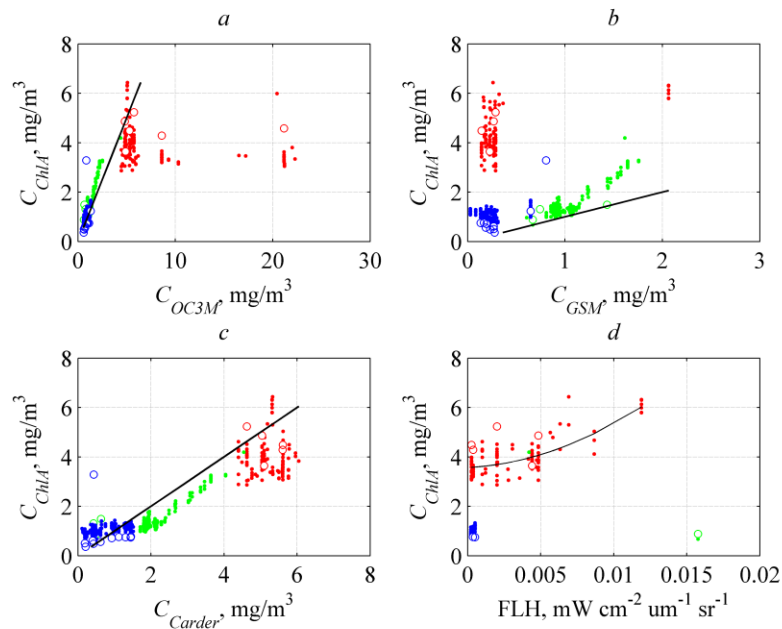


Профиль концентрации хлорофилла-а с (зеленая линия) и весовая функция вклада в сигнал восходящего излучения моря (пунктирная линия).



Глубинные измерения концентрации хлорофилла-«а» (а, зонд SBE-19plus) и интенсивности флуоресценции хлорофилла-«а» (б, ЛаФ-3 с погружаемой световодной приставкой)

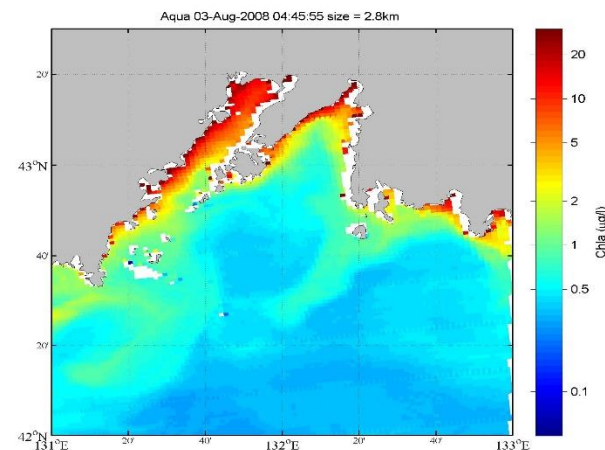
Разработка регионального алгоритма оценки концентрации хлорофилла-а



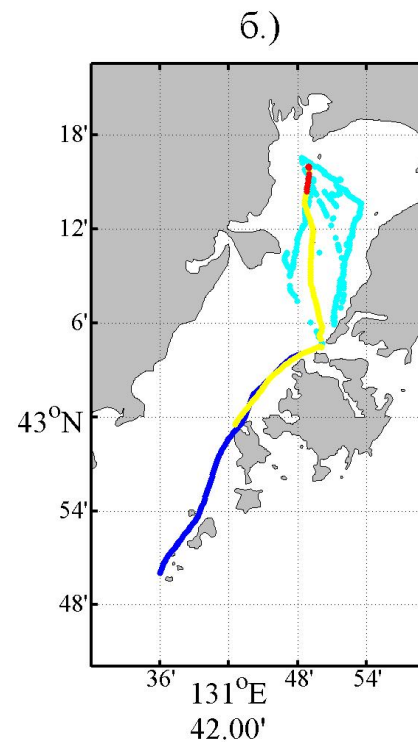
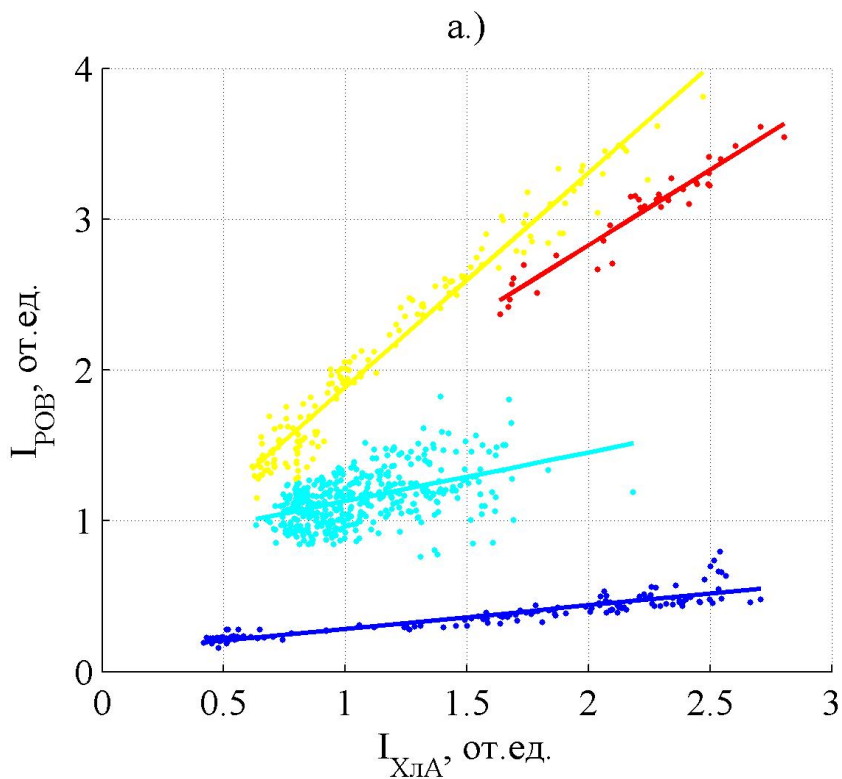
Маршрут съемки 2008 года.

Сравнение спутниковых и in situ измерений концентрации хлорофилла-а.
a,b,c – алгоритмы OC3, GSM и Кардера.
d – использование флуоресценции (flh) для расчета регрессионной зависимости для вод CASE II.

Пересчитанная на основе полученных зависимостей спутниковая карта концентрации хлорофилла-а.



Классификация фитопланктона по Q-C диаграммам



Пример классификации фитопланктонных сообществ по Q-C (IXлА - РОВ) диаграммам рассеяния (слева), и маршрут съемки (справа).

Определение видового состава, выращивание водорослей

Работы 2009 года:

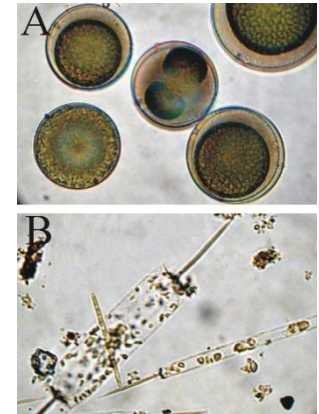
- Выращивание и определение спектральных характеристик водорослей на разных стадиях жизни *Pseudo-nitzschia*, *Alexandrium tamarense*, *Attheya* . Первые 2 вредоносные.
- Обработка архивов видового состава залива Петра Великого (около 500 проб).



Лаборатория экологии шельфовых сообществ

Водоросли под микроскопом
А – *Coscinodiscus oculus-iridis* ;

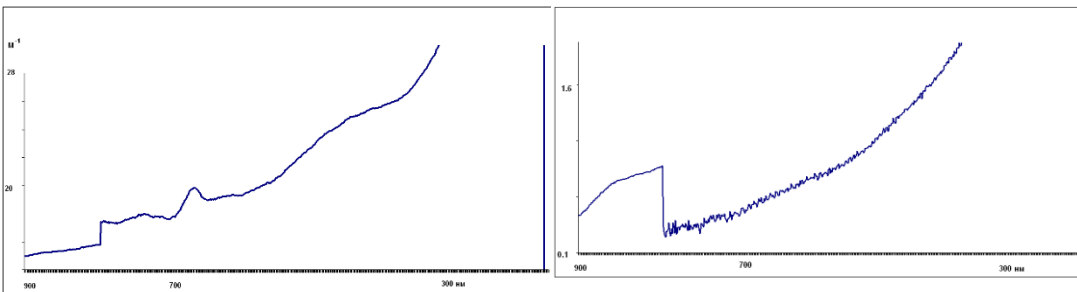
В - *Ditylum brightwellii*



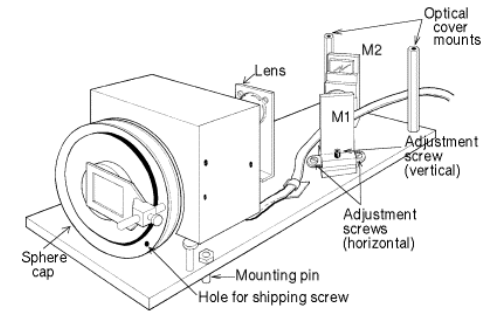
Плотность и биомасса фитопланктона Амурского залива 30.08.2006 г						
Ста	Темпер	Время	Плотность N, кл/Л	Биомасса В, мг/м3	Доминирующий вид	% от биом
1	21°C	10 00	125357,14	2842,96	<i>Coscinodiscus oculi</i>	55
					<i>Ditylum brightwellii</i>	40
2	21°C	10 15	231200,00	2455,12	<i>Coscinodiscus oculi</i>	35
					<i>Ditylum brightwellii</i>	48
3	21°C	10 30	131142,86	733,82	<i>Ditylum brightwellii</i>	75
4	21°C	10 45	173828,57	3482,62	<i>Ditylum brightwellii</i>	80
5	21°C	11 00	24857,14	991,15	<i>Coscinodiscus oculi</i>	41
					<i>Ditylum brightwellii</i>	37
6	21°C	10 25	98971,43	1426,08	<i>Ditylum brightwellii</i>	61
7	22°C	12 00	24100,00	1003,18	<i>Coscinodiscus oculi</i>	38
					<i>Ditylum brightwellii</i>	40
8	22°C	12 30	11228,57	646,72	<i>Coscinodiscus oculi</i>	37
					<i>Ditylum brightwellii</i>	30
9	21°C	12 55	8571,43	405,78	<i>Coscinodiscus oculi</i>	60
10	22°C	13 15	12942,86	391,52	<i>Ditylum brightwellii</i>	56
11	22°C	13 35	12000,00	617,92	<i>Coscinodiscus oculi</i>	76
12	21°C	16 30	33942,86	284,84	<i>Coscinodiscus oculi</i>	38
13	22°C	17 00	12900,00	285,90	<i>Coscinodiscus oculi</i>	66
14	22°C	17 30	6857,14	299,11	<i>Coscinodiscus oculi</i>	54

Доминирующие водоросли в пробах залива Петра Великого за 30.08.2006

Расчет спектральных характеристик водорослей

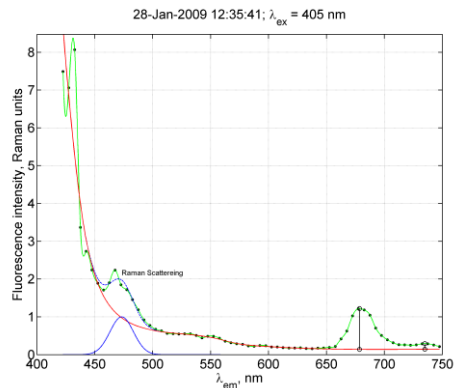


. Коэффициенты ослабления водоросли *Alexandrium tamarense* и ее РОВ.

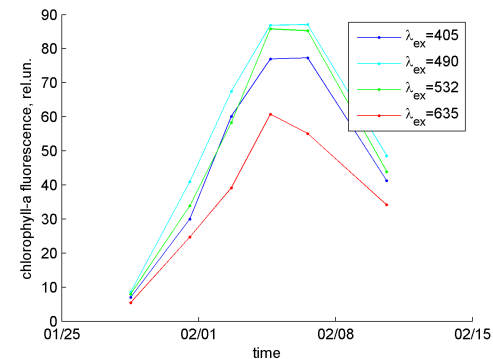


Спектрофотометр Varian Cary-5000

Спекрофлюориметр Varian Cary Eclipse



Анализ флюориметрического спектра.



Флуоресценция хлорофилла-а для разных длин волн и на разных стадиях жизни водоросли *Pseudo-nitzschia*