

О.В. Копелевич, ИО РАН, Москва

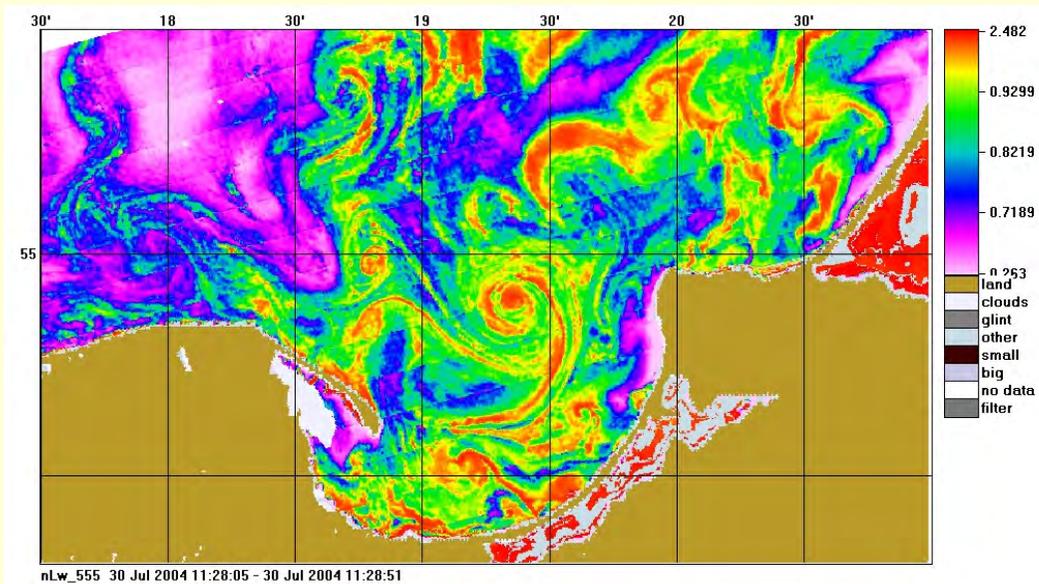
Физические аспекты спутниковых наблюдений цвета океана

Достоинства спутниковых сканеров цвета

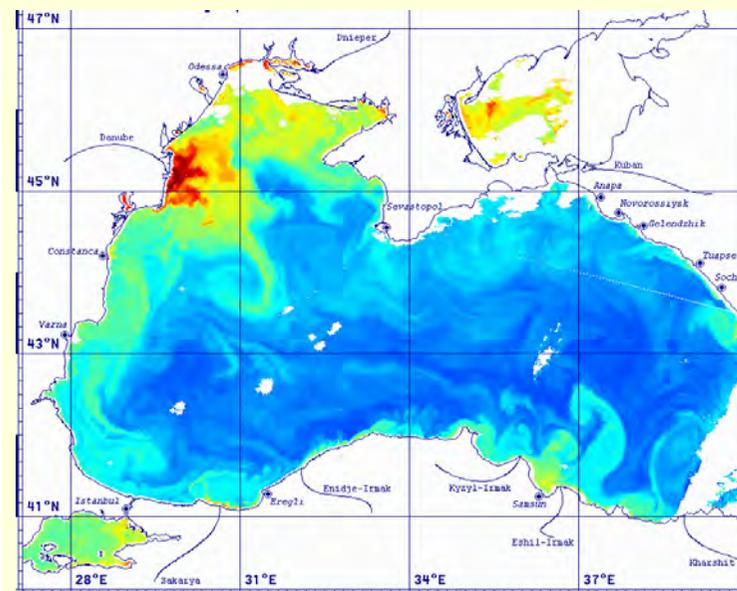
- Только излучение видимой области спектра способно проходить с малыми потерями(и выходить обратно) через поверхность раздела атмосфера-океан.
- Излучение, вышедшее из водной толщи, содержит информацию о характеристиках подповерхностного слоя океана и процессах, происходящих в этом слое.
- Спутниковые сканеры цвета, наряду с ИК-радиометрами, наиболее эффективны с экономической точки зрения.
- Данные спутниковых сканеров цвета, также как ИК - радиометров, можно совершенно бесплатно получать через Интернет в течение суток после измерений.
- Полоса обзора большинства спутниковых сканеров цвета составляет порядка 1500 км при пространственном разрешении – 250 м – 1 км.

Недостаток: облачность – непреодолимое препятствие.

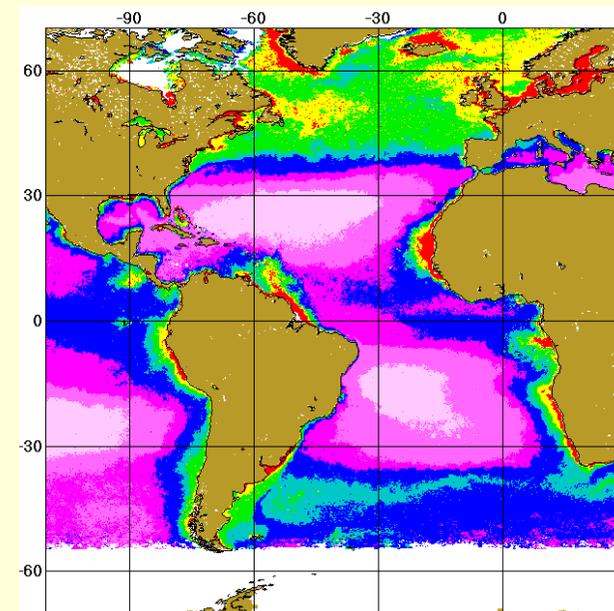
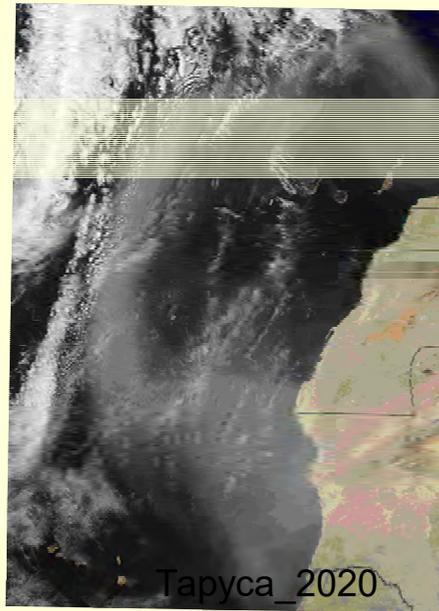
Примеры результатов, полученных со сканеров цвета



Мезомасштабная динамика в Балтийском море



Черное море



Каспийское море. Цветение *Nodularia*

Пылевая буря. Атлант. океан

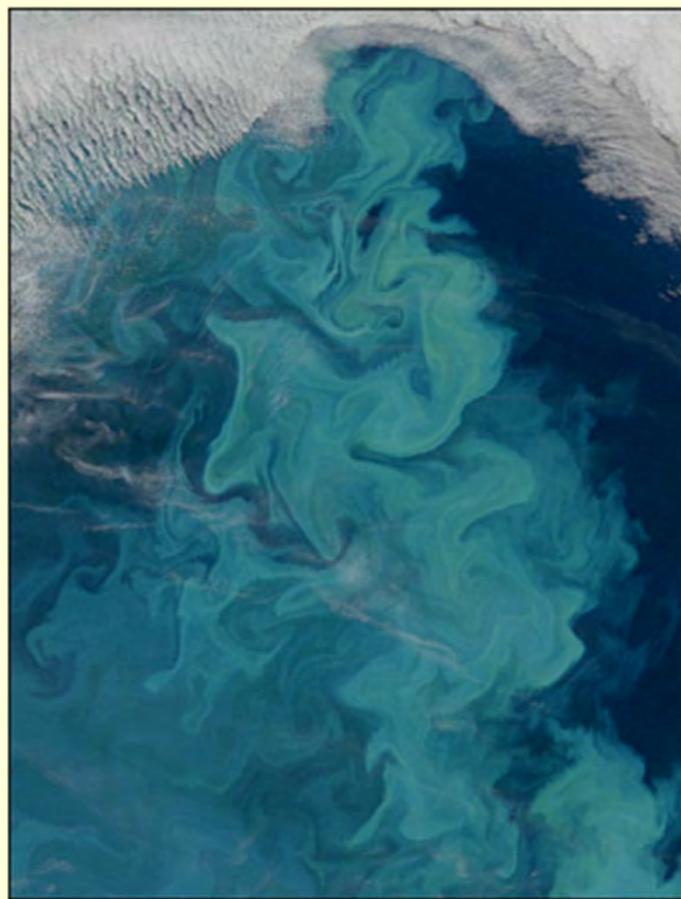
Атлантический океан. Хл. Май 1998.

Спутниковые изображения в видимом цвете



SeaWiFS True Color image taken on Sunday 2 March 2003
NASA/GSFC and ORBIMAGE

Пыльная буря
вблизи Африки



Кокколитофоридное цветение
в Баренцевом море по данным
сканера MODIS-Terra
1 августа 2007 г.



Наводнение в штате Квинсленд,
Австралия.
Изображение в видимом свете
по данным сканера MODIS-Aqua,
4 января 2007 г.



In this image of Sentinel-3, captured on 27 July 2019, sea ice can be seen in the waterways of the Canadian Archipelago, as well as broken-up sea ice in the Beaufort Sea. Numerous, large ice floes are seen at the southern margin of the pack ice, and can be seen drifting southwards. As the pack ice drifts and encounters warmer waters, the ice is more prone to rapid melting.

The SENTINEL-3 Ocean and Land Colour Instrument (OLCI)

- swath width: 1 270 km
- push-broom imaging spectrometer with five cameras, mitigation of sun-glint contamination by tilting cameras in westerly direction
- spatial sampling: 300 m
- **spectrum: 21 bands [0.4-1.02] μm**
- **radiometric accuracy: 2% abs, 0.1% rel**
- launch mass: 153 kg
- size: 1.3 m³
- design lifetime: 7.5 years.

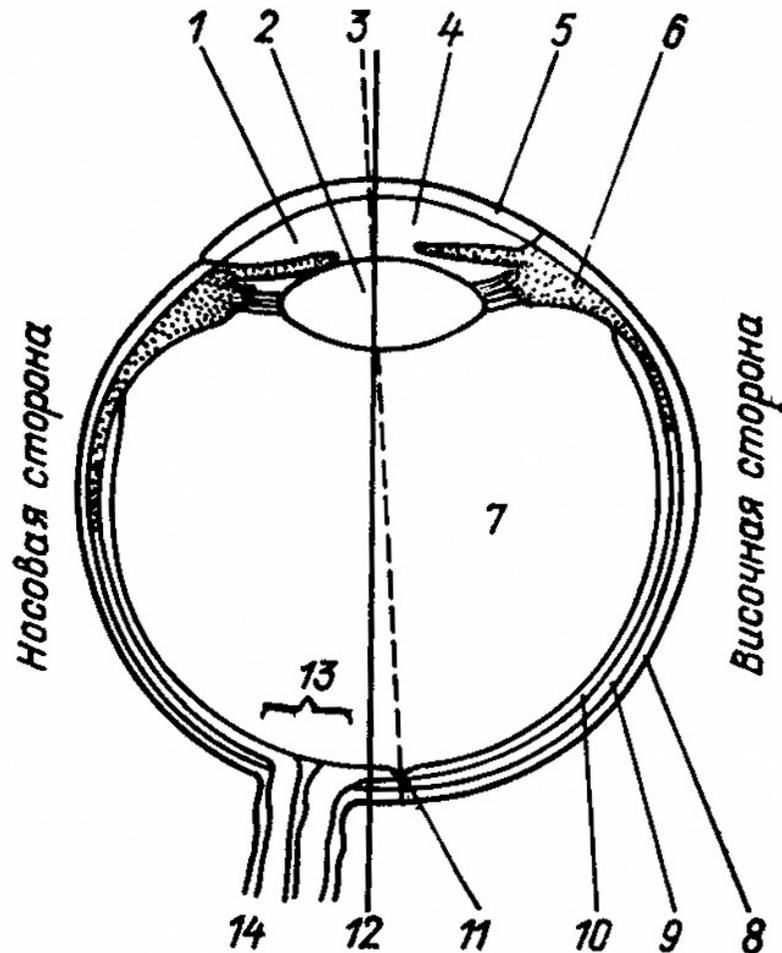


Рис. 1. Горизонтальный разрез правого глазного яблока

1—радужка, 2—хрусталик; 3—ось фиксации; 4—водянистая влага; 5—роговица; 6—цилиарная мышца; 7—стекловидное тело; 8—склера; 9—сосудистая оболочка; 10—сетчатка; 11—фовеа (центральная ямка); 12—оптическая ось; 13—слепое пятно; 14—зрительный нерв (к мозгу)

Как видит человеческий глаз

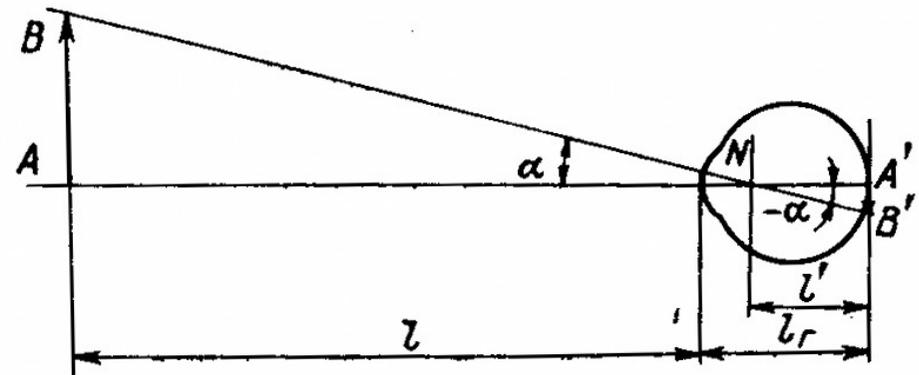


Рис. 8. Построение изображения в редуцированном глазе

Показатели преломления:

Роговица – 1.376
 Хрусталик – 1.386
 Водянистая влага
 и стекловидное
 Тело – 1.336.

Световые величины,

$$\Phi_z = \int_{400}^{760} F_\lambda d\lambda \quad - \quad \text{энергетический поток};$$

$$\Phi_{\text{света}} = K_{\text{max}} \int_{400}^{760} F_\lambda \cdot V_\lambda d\lambda \quad - \quad \text{световой поток}$$

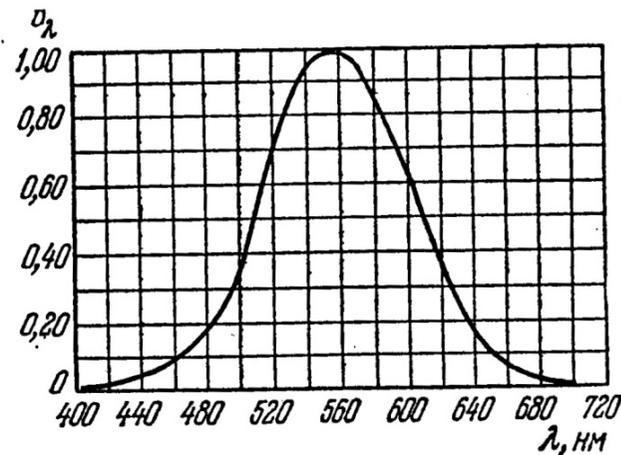
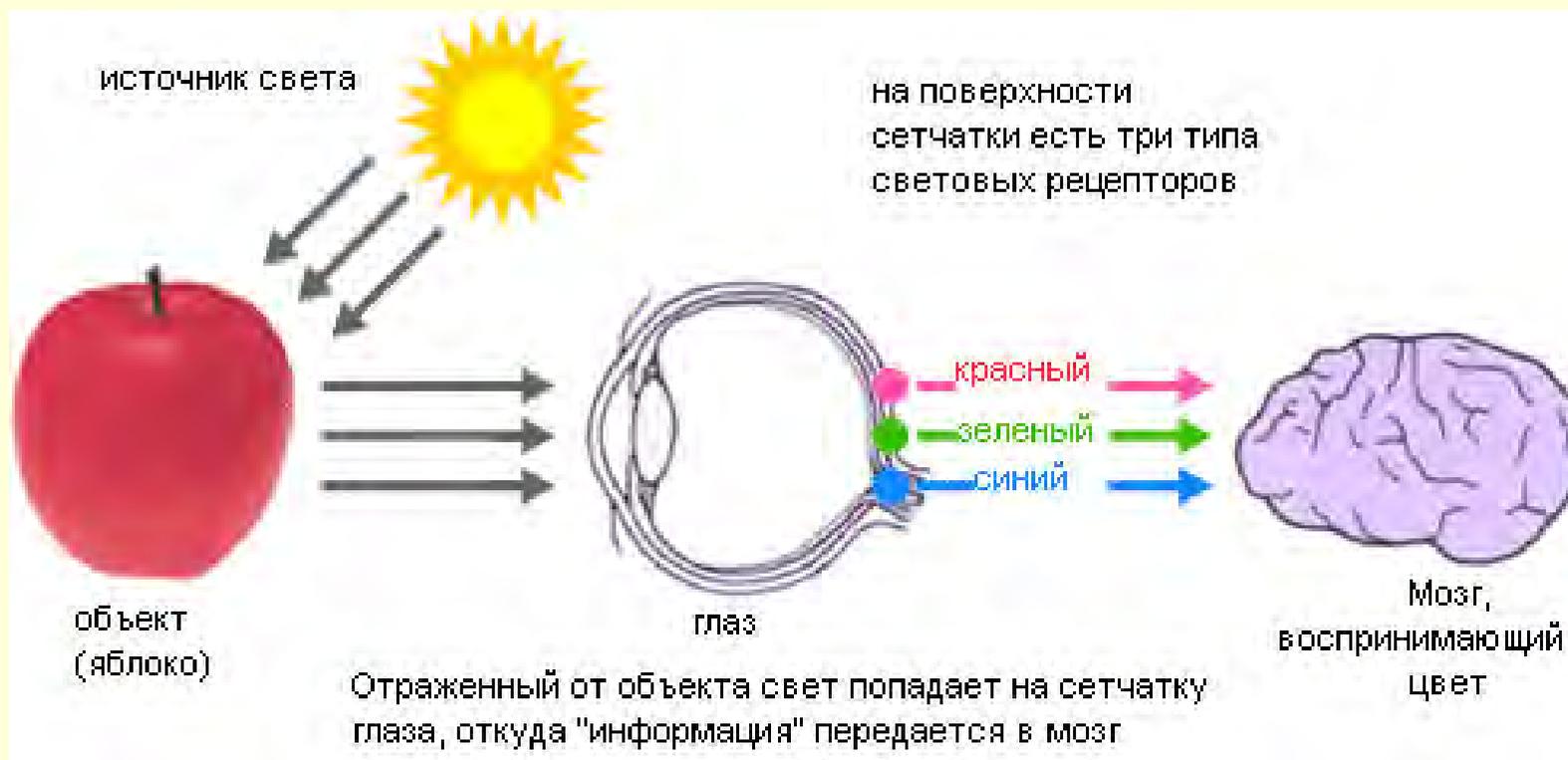


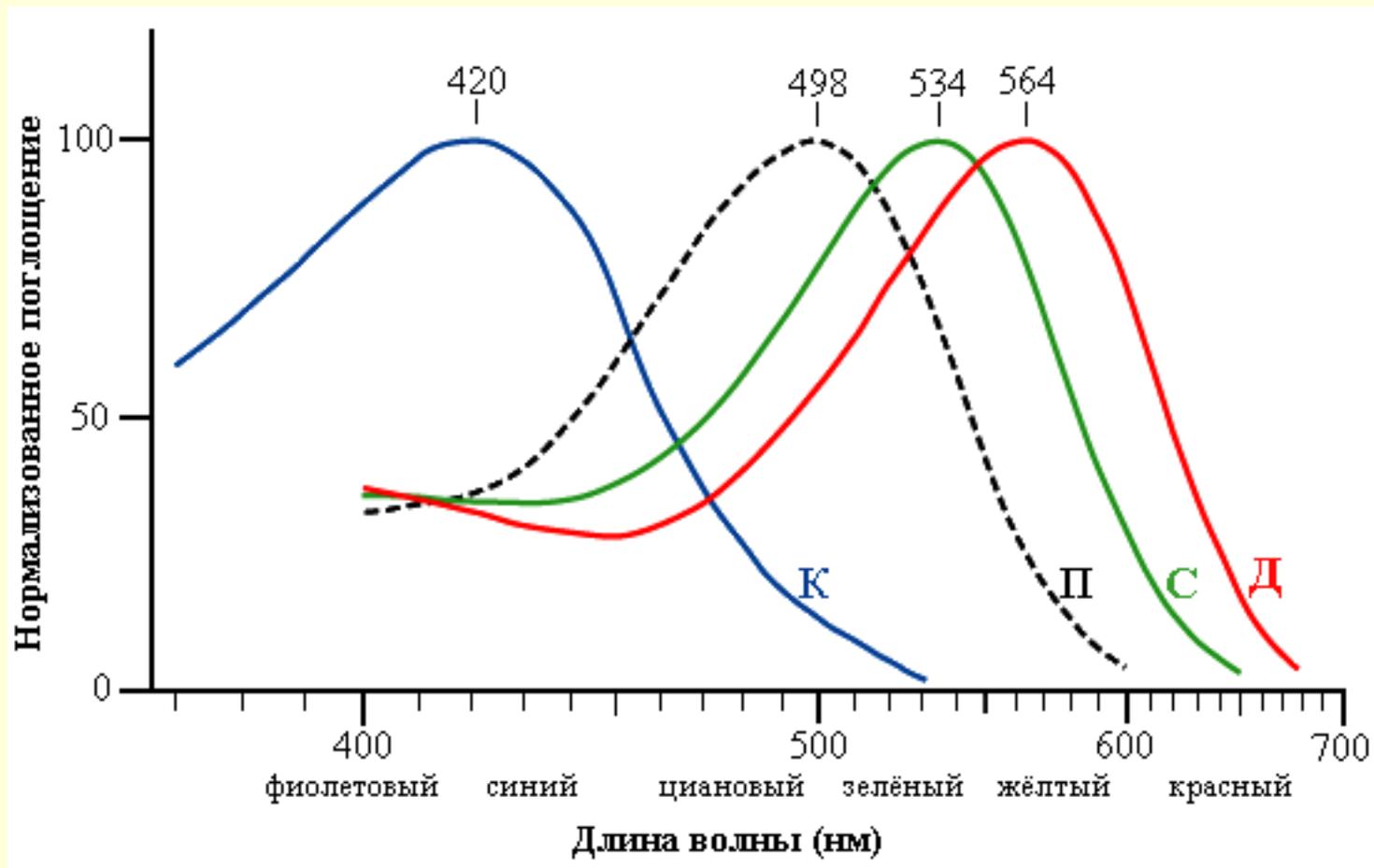
Рис. 3.5. Кривая видности.

$$K_{\text{max}} = 1/A, \quad \text{где} \quad A = 0.00160 \text{ Вт/мм} \quad - \quad \text{механический эквивалент света}$$

$$K_{\text{max}} = 625 \text{ мм/Вт.}$$

Таруса_2020





Средние нормализованные спектральные характеристики чувствительности цветовых рецепторов человека — колбочек. Штриховой линией показана чувствительность палочек — рецепторов сумеречного зрения. Ось длин волн на графике имеет логарифмический масштаб

Восприятие цвета человеческим глазом

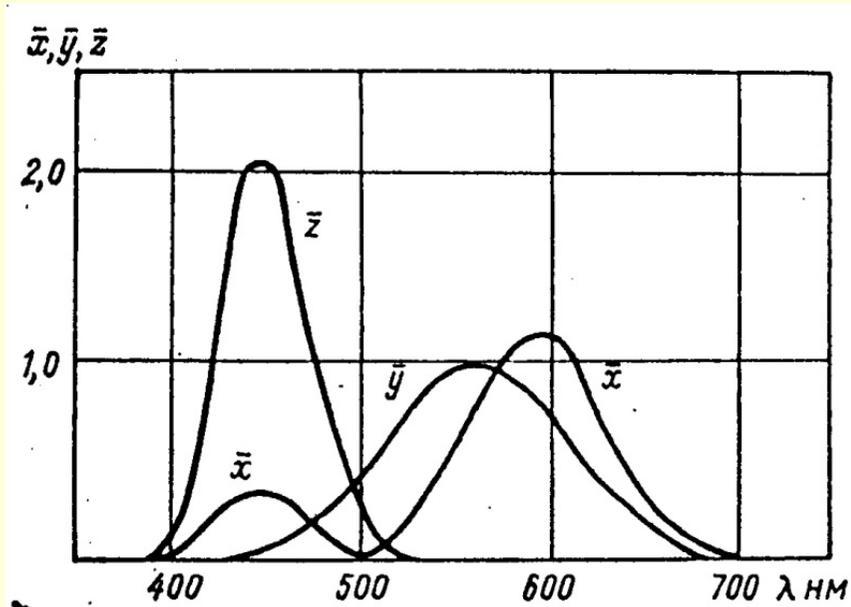


Рис. 9.12. Удельные координаты цвета \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1964 г. (Джадд и Выщецкий, 1978).

Координаты цвета:

$$X = \int_{380}^{770} F_{\lambda} \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda ; \quad - \text{красный}$$

$$Y = \int_{380}^{770} F_{\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \quad - \text{зеленый}$$

$$Z = \int_{380}^{770} F_{\lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad - \text{синий}$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} ; \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

$$x + y + z = 1 .$$

Двумерная диаграмма цветности

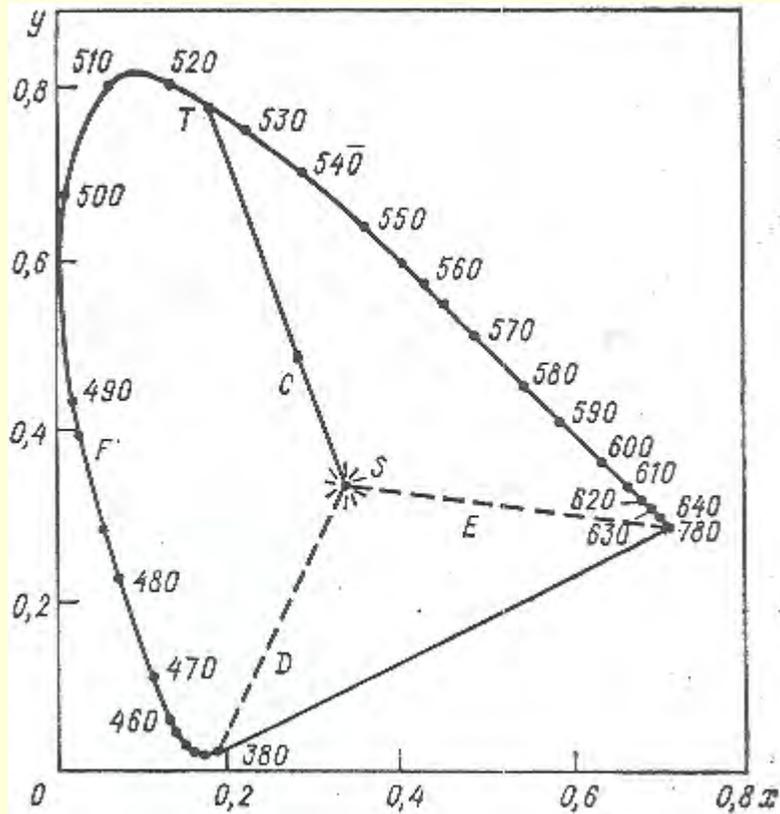


Рис. 9.13. Цветовой треугольник \bar{x} , \bar{y} МКО 1964 г. с линиями цветности спектральных и пурпурных цветов.

$$q = \frac{SC}{ST} = d_T - \text{густота (на поверхность) цвета}$$

λ_T - цветовой тон

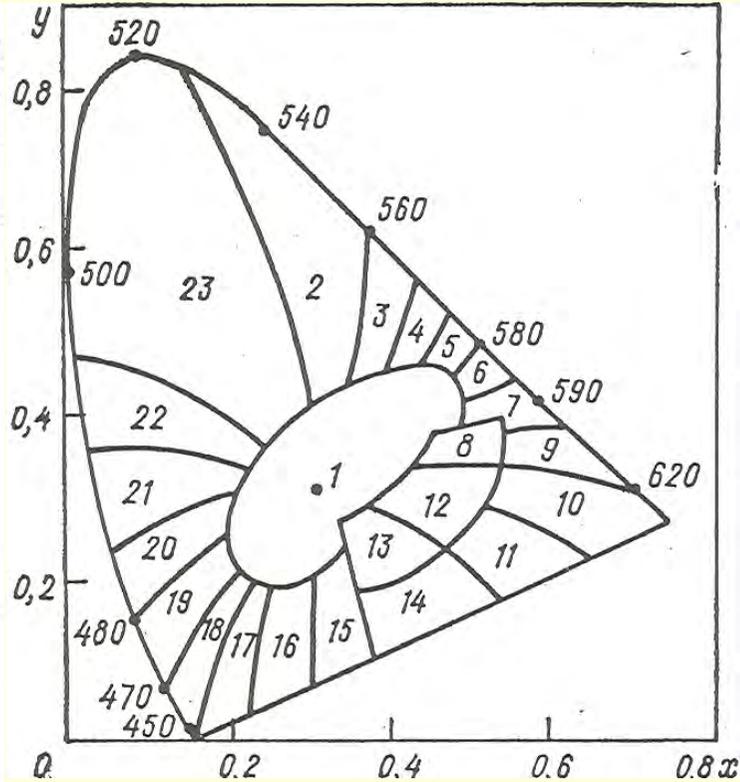
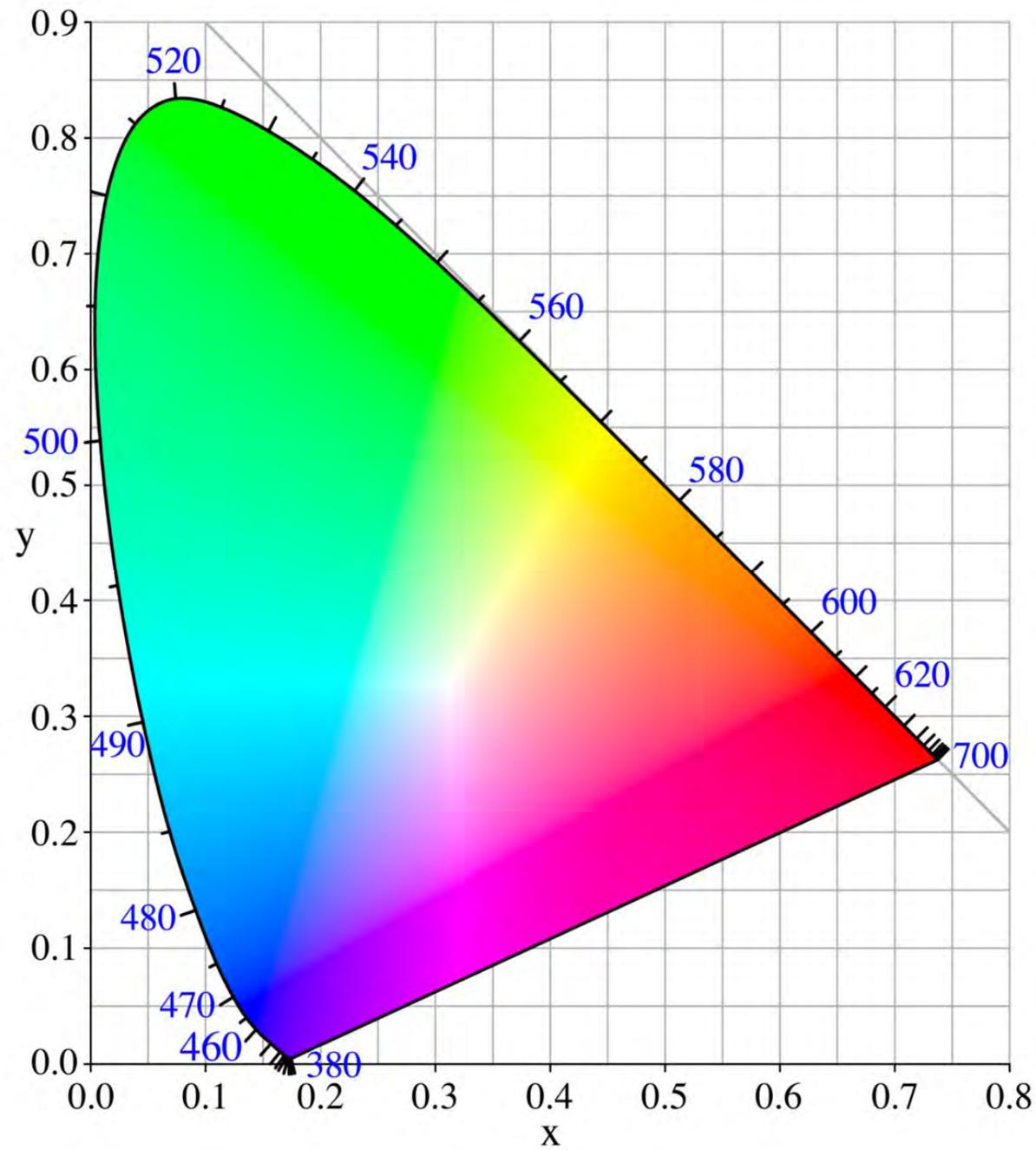
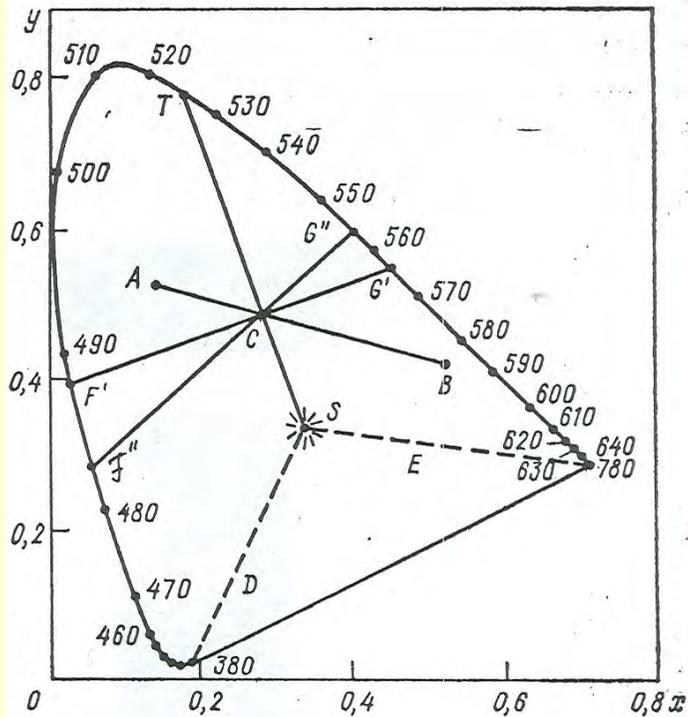


Рис. 9.14. Местоположение различных областей цветности на цветовом треугольнике.

Название цветов по Келли (1943): 1 — белый (серый); 2 — желтовато-зеленый; 3 — желто-зеленый; 4 — зеленовато-желтый; 5 — желтый; 6 — желтовато-оранжевый; 7 — оранжевый; 8 — оранжево-розовый; 9 — красновато-оранжевый; 10 — красный; 11 — пурпурно-красный; 12 — розовый; 13 — пурпурно-розовый; 14 — красно-пурпурный; 15 — красновато-пурпурный; 16 — пурпурный; 17 — синевато-пурпурный; 18 — пурпурно-синий; 19 — синий; 20 — зеленовато-синий; 21 — сине-зеленый; 22 — синевато-зеленый; 23 — зеленый.





Сложение цветов

$$X = X_1 + X_2 ; \quad Y = Y_1 + Y_2 ; \quad Z = Z_1 + Z_2 ;$$

$$x = x_1 \cdot \frac{\Sigma_1}{\Sigma} + x_2 \cdot \frac{\Sigma_2}{\Sigma} ;$$

$$y = y_1 \cdot \frac{\Sigma_1}{\Sigma} + y_2 \cdot \frac{\Sigma_2}{\Sigma} ;$$

$$\Sigma_1 = X_1 + Y_1 + Z_1 ; \quad \Sigma_2 = X_2 + Y_2 + Z_2 ; \quad \Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 ;$$

$$d_1 = \frac{\Sigma_1}{\Sigma} ; \quad d_2 = \frac{\Sigma_2}{\Sigma} - \text{относительные веса складывающихся излучений} ;$$

$$d_1 + d_2 = 1 .$$

$$AC \cdot d_1 = CB \cdot d_2 .$$

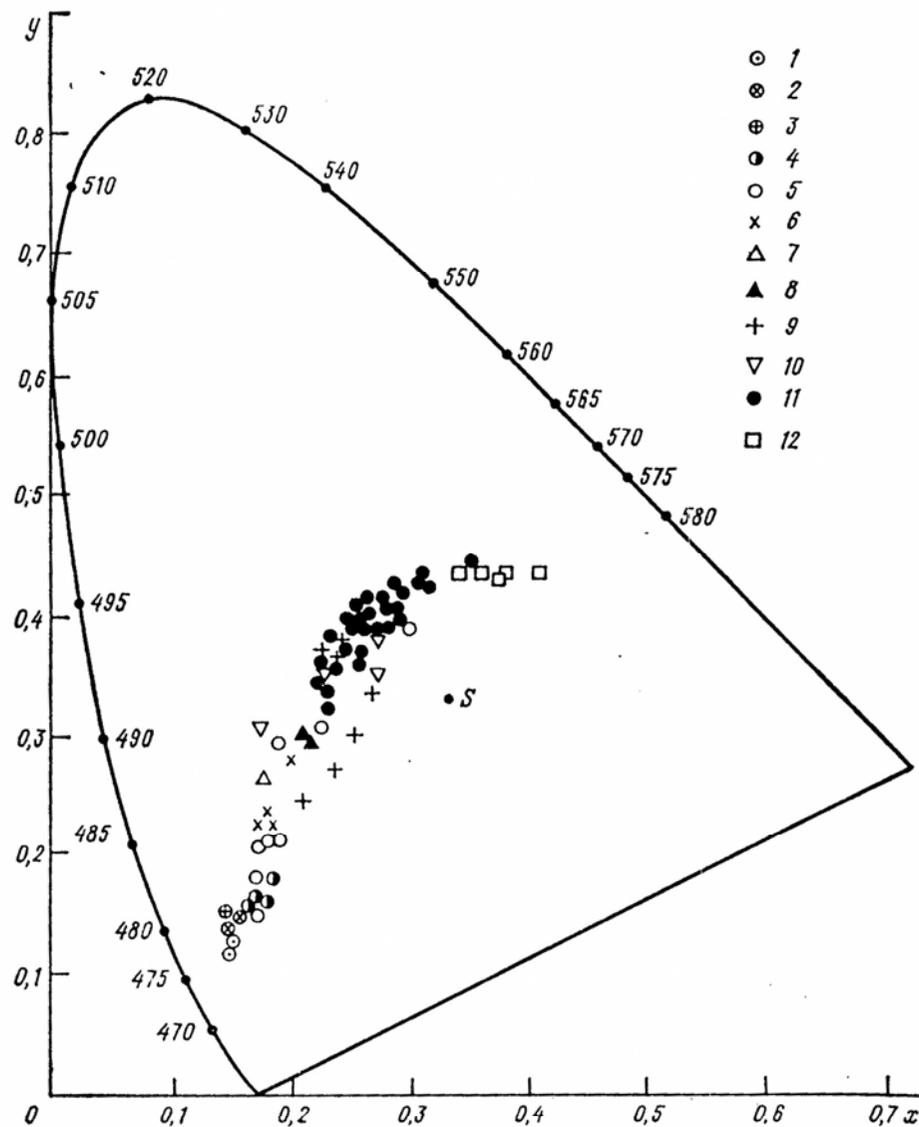
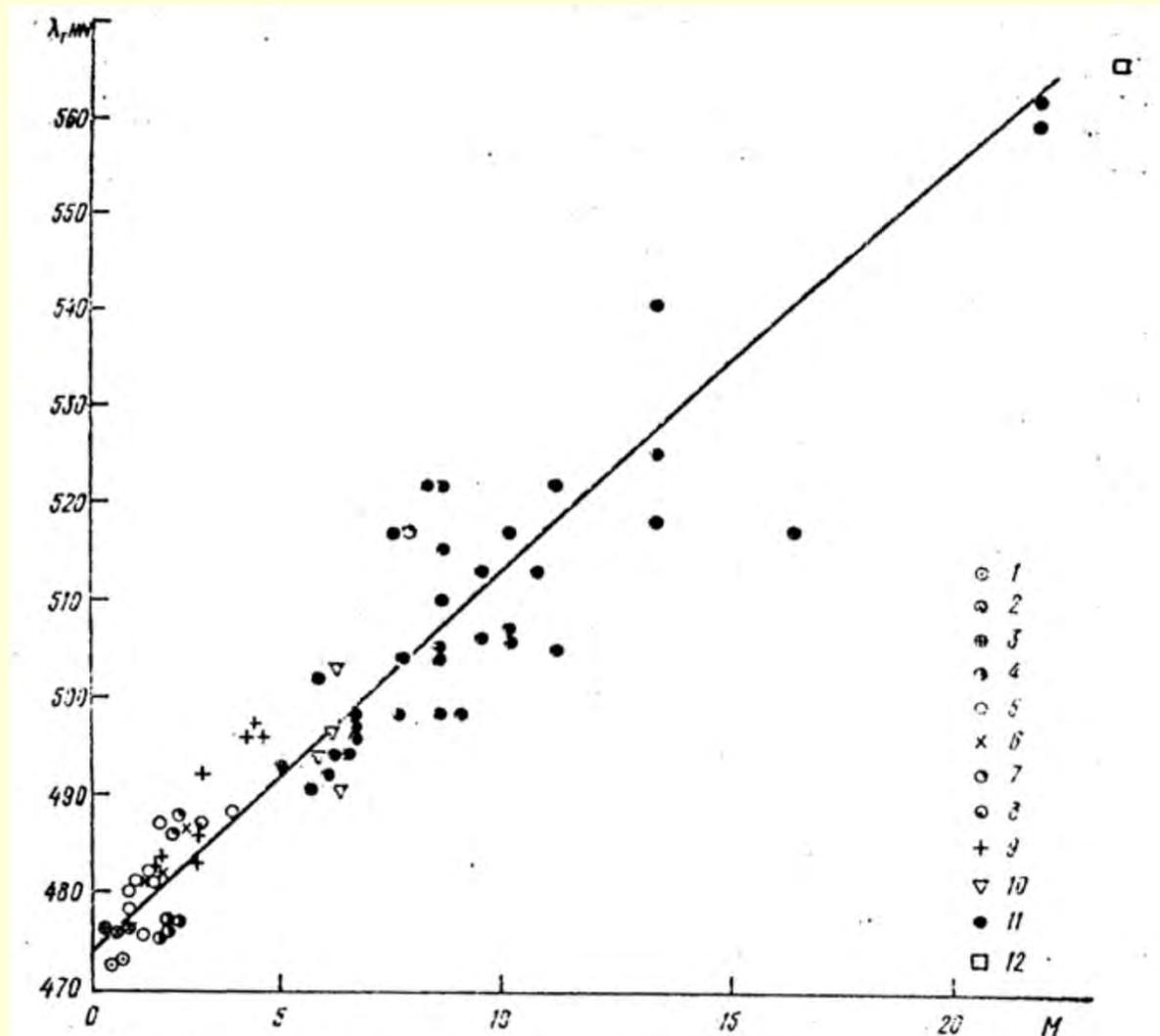


Рис. 9.17. Координаты цветности излучения, выходящего из океана.

1 — западная часть Саргассова моря, Атлантический океан; 2 — у побережья о. Гаити, Атлантический океан; 3 — Карибское море, Центральный район; 4 — Японское море; 5 — восточная часть тропической Атлантики, 0—10° с. ш.; 6 — восточная часть Тихого океана, зона экваториального апвеллинга; 7 — вход в Панамский канал со стороны Атлантики; 8 — Панамский залив, Тихий океан; 9 — Тихий океан, вблизи восточного побережья Японии; 10 — восточная Атлантика, район Мавританского апвеллинга, 15—19° с. ш.; 11 — зона шельфа у западного побережья Африки, 20°30′—22° с. ш., глубины 25—300 м, Атлантический океан; 12 — залив Микава, восточное побережье Японии, Тихий океан.

Связь между цветовым тоном и показателем диффузного ослабления



Зависимость между доминирующей длиной волны λ_T выходящего из океана излучения и оптическим индексом типа вод M . Уравнение регрессии: $\lambda_T = 473 + 4,3 M$. Средние квадратические отклонения $\lambda_T = 4$ нм при $M \leq 5$ и 8 нм при $5 < M \leq 15$.

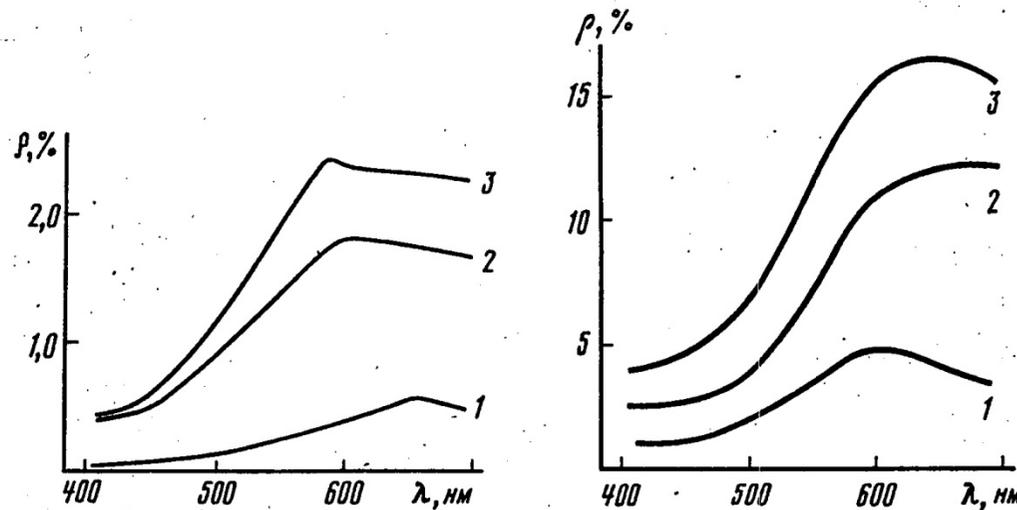
$$M = 100 K_d(500) / 2,3$$

$$E_d(z) = E_d(0^-) \cdot e^{-K_d \cdot z}$$

Colour evaluated from spectral energy distribution of upward irradiance

Station	Position	Solar elevation ($^{\circ}$)	Depth (m)	Colour (nm)	Purity (%)	
Pacific Ocean 142	S01 $^{\circ}$ 20' E167 $^{\circ}$ 23'	61	2	473	85	
			5	473	87	
			10	473	89	
			25	472	92	
			50	469	95	
Indian Ocean 191 192	S11 $^{\circ}$ 25' E102 $^{\circ}$ 13' S11 $^{\circ}$ 25' E102 $^{\circ}$ 08'	31	10	472	90	
			50	469	97	
		80	2	474	84	
			10	473	87	
			25	472	92	
50	469	94				
Mediterranean 277	N33 $^{\circ}$ 54' E28 $^{\circ}$ 17'	74	0	473	83	
			5	473	86	
			10	473	87	
			25	472	92	
			50	470	95	
Atlantic Ocean off Bermuda Sargasso Sea	N32 $^{\circ}$ W65 $^{\circ}$ N26 $^{\circ}$ 50' W63 $^{\circ}$ 30'	70	0	483	71	
			62	2	470	86
				10	470	88
				25	468	92
				50	467	95
				100	465	97
			25	1	471	85
				10	470	88
				25	469	91
				50	468	93
100	466	95				
Baltic Sea	N60 $^{\circ}$ E19 $^{\circ}$	55	0	540	24	
			10	551	73	
			20	553	87	

Воды Амазонки



Р и с. 30. Спектральные зависимости коэффициента яркости в «черных» и «чистых» водах

1 — Риу-Негру; 2 — Тапажос; 3 — Шингу

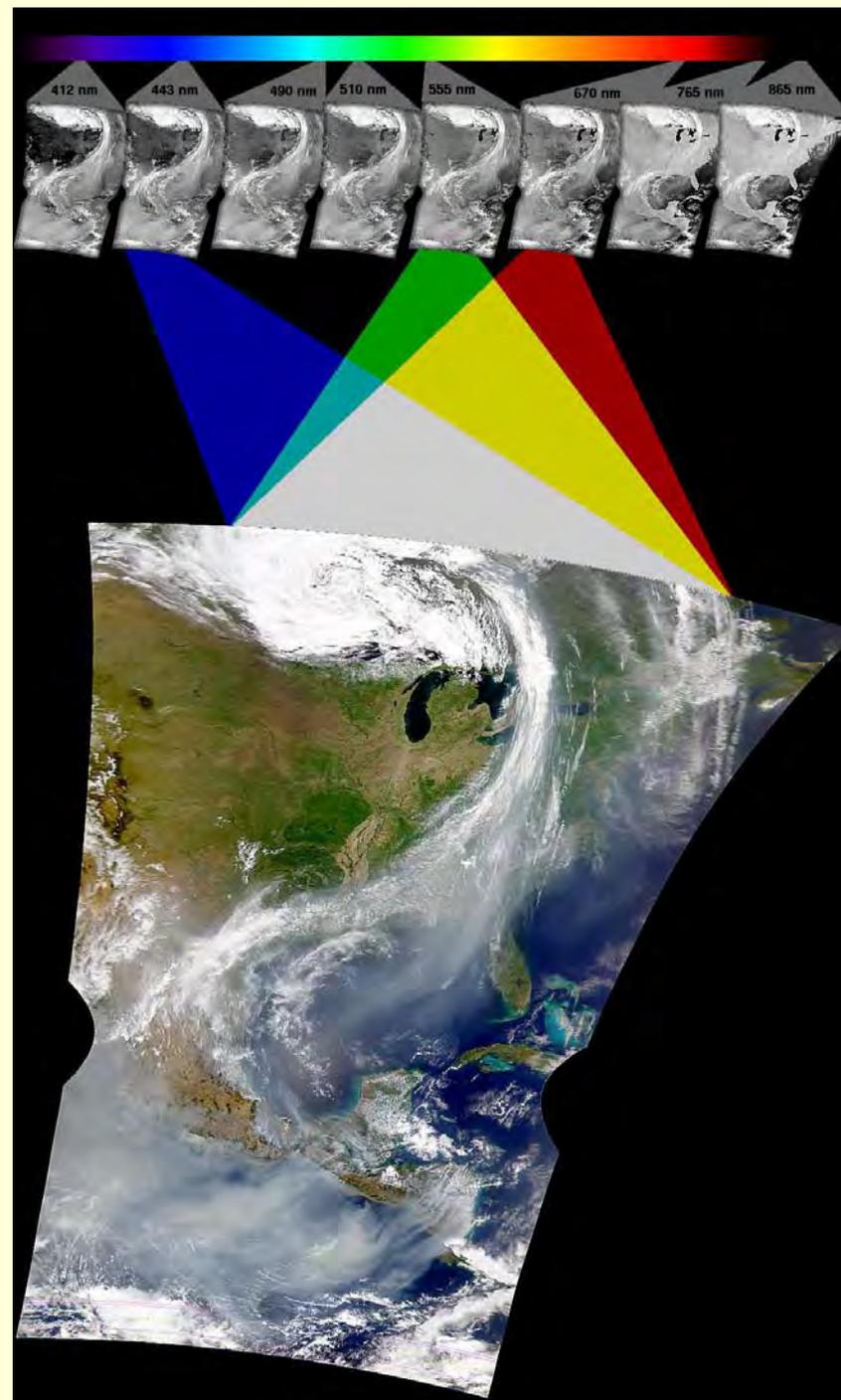
Р и с. 31. Спектральные зависимости коэффициента яркости в «белых» водах

1 — Амазонка; 2 — Мадейра; 3 — Солимойнс

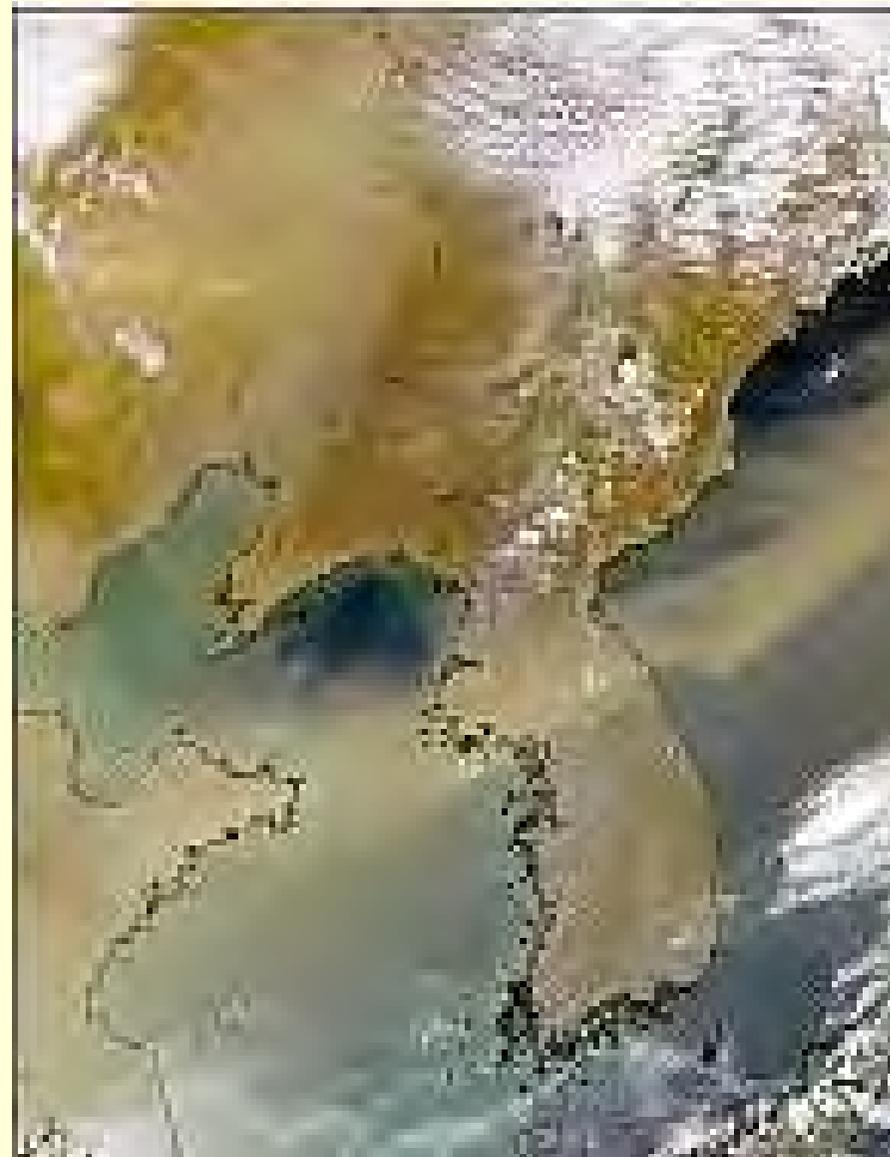
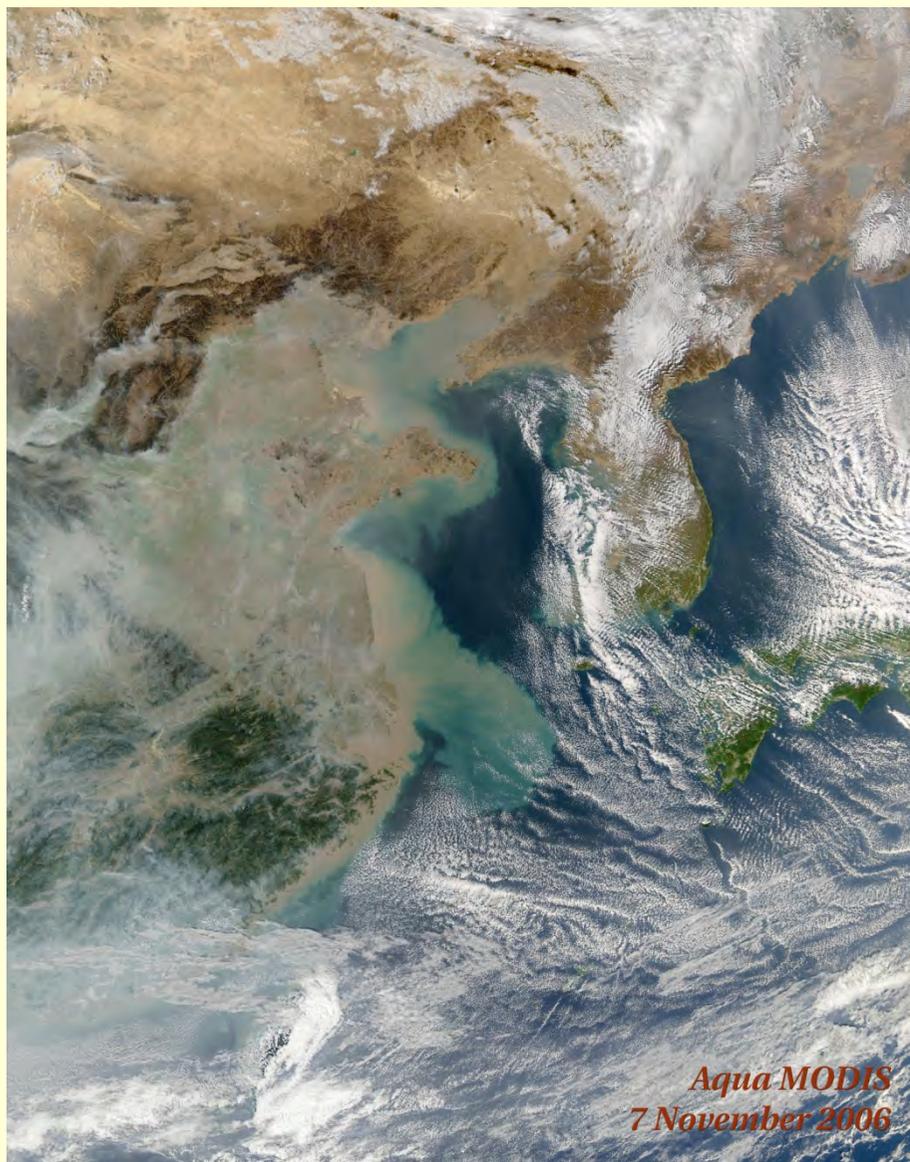
Характеристики излучения, выходящего из водной толщи, и значения альбедо в разных диапазонах спектра

Река	Цветовой тон, нм	Чистота цвета, %	Индекс цвета	Альбедо			
				400— —500 нм	500— —600 нм	600— —700 нм	400— —700 нм
Амазонка	578	38	2,4	8,7	13,0	16,0	12,0
Мадейра	582	46	2,1	12,0	23,0	36,0	22,0
Солимойнс	581	43	2,0	15,0	29,0	41,0	27,0
Риу-Негру	583	65	3,5	6,1	6,5	7,0	6,5
Тапажос	578	50	3,0	7,1	8,8	9,6	8,5
Шингу	578	33	3,0	7,4	10,0	11,0	9,4

Построение изображений
в видимом цвете
("True Color" image)
по данным измерений
в трех спектральных каналах
(443, 555 и 670 нм)
спутникового сканера цвета
SeaWiFS

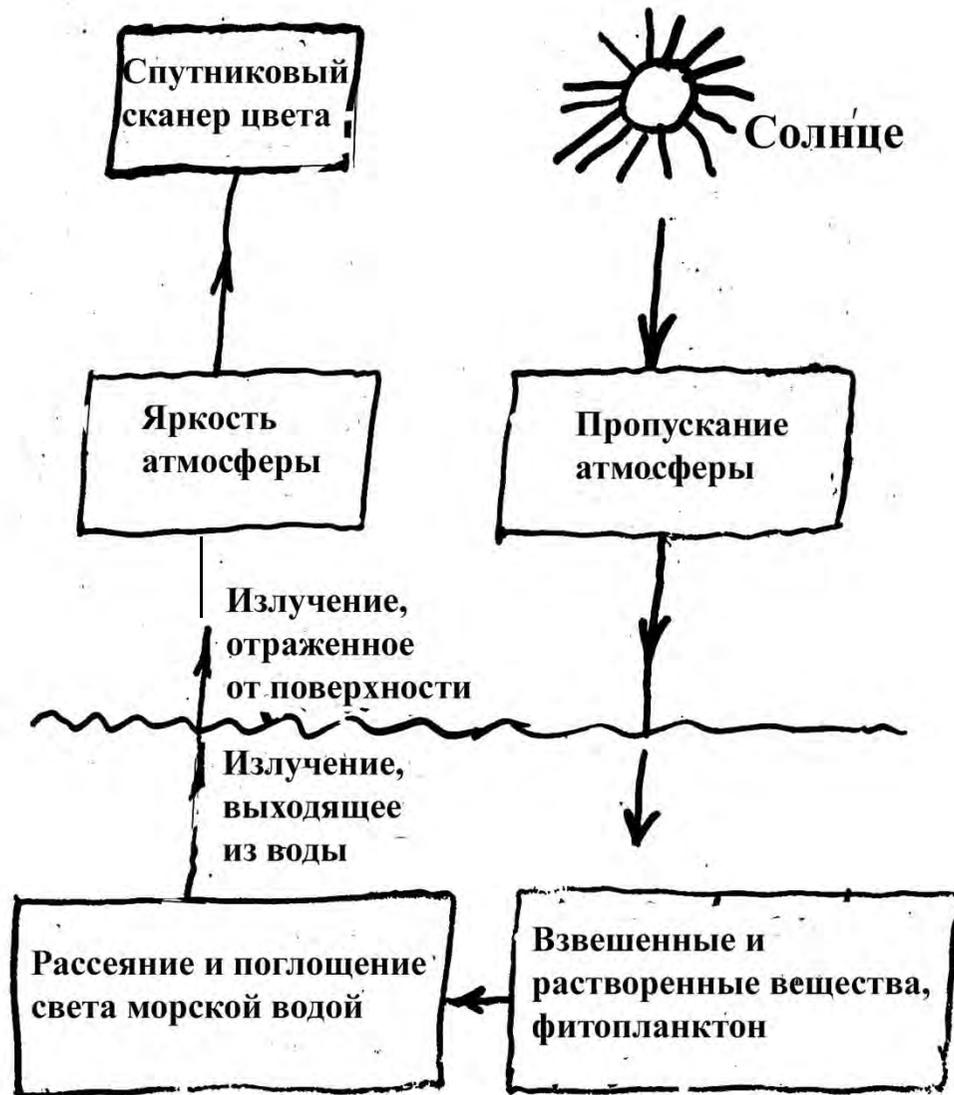


Что «видят» спутниковые сканеры цвета?



MODIS-Aqua, 7 ноября 2006г. Таруса_2020 SeaWiFS, 20 марта 2001г.

Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



«Истинный» цвет океана обусловлен спектральным составом, излучения, выходящего из водной толщи.

Спектральная яркость выходящего излучения определяется оптическими свойствами морской воды, которые зависят от количественного и качественного состава содержащегося в морской воде вещества.

«Видимый» спутниковым датчиком цвет обусловлен в значительной степени влиянием атмосферы и отражением от поверхности.

Составляющие яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы

$L_t(\lambda_i)$ – спектральная яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеряемая спутниковым датчиком:

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i),$$

где $L_r(\lambda_i)$ и $L_a(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолями;

$L_g(\lambda_i)$ и $L_{wc}(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, солнечными бликами и диффузным отражением пеной;

$T(\lambda_i)$ и $t(\lambda_i)$ – направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой;

$L_w(\lambda_i)$ – искомая яркость излучения, вышедшего из водной толщи.

Вышеперечисленные яркости зависят от зенитного и азимутального углов Солнца θ_0, φ_0 и наблюдения θ, φ .

Спектральные распределения разных составляющих восходящего излучения на верхней границе атмосферы

(Данные SeaWiFS для района около Гавайских островов,
16 июля 1998; даны значения яркости в мВт/см²/мкм/ср).

λ_i , нм	412	443	490	510	555	670	765	865
$L_t(\lambda_i)$	9.13	8.23	6.22	5.22	3.95	2.34	1.48	1.24
$L_r(\lambda_i)$	6.74	5.62	3.78	3.12	2.11	0.84	0.36	0.21
$L_a(\lambda_i)$	0.45	0.53	0.58	0.57	0.56	0.50	0.38	0.34
$TL_g(\lambda_i)$	0.63	0.83	0.99	1.00	1.03	0.98	0.74	0.68
$tL_{wc}(\lambda_i)$	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
$tL_w(\lambda_i)$	1.311	1.246	0.890	0.516	0.232	0.023	0.002	0.001

$L_t(\lambda_i)$ – суммарная яркость восходящего излучения;

$L_r(\lambda_i)$ – рэлеевское рассеяние;

$L_a(\lambda_i)$ – аэрозольное расеяние (включая взаимодействие рэлеевского и аэрозольного рассеяния);

$TL_g(\lambda_i)$ – солнечный блик;

$tL_{wc}(\lambda_i)$ – диффузное отражение пеной;

$tL_w(\lambda_i)$ – излучение, вышедшее из водной толщи.

Два главных этапа обработки данных спутниковых сканеров цвета

1. Атмосферная коррекция – определение спектральных значений яркости $L_w(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости $L_t(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком:

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i),$$

где $L_r(\lambda_i)$ и $L_a(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;

$L_g(\lambda_i)$ и $L_{wc}(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, солнечными бликами и диффузным отражением пеной;

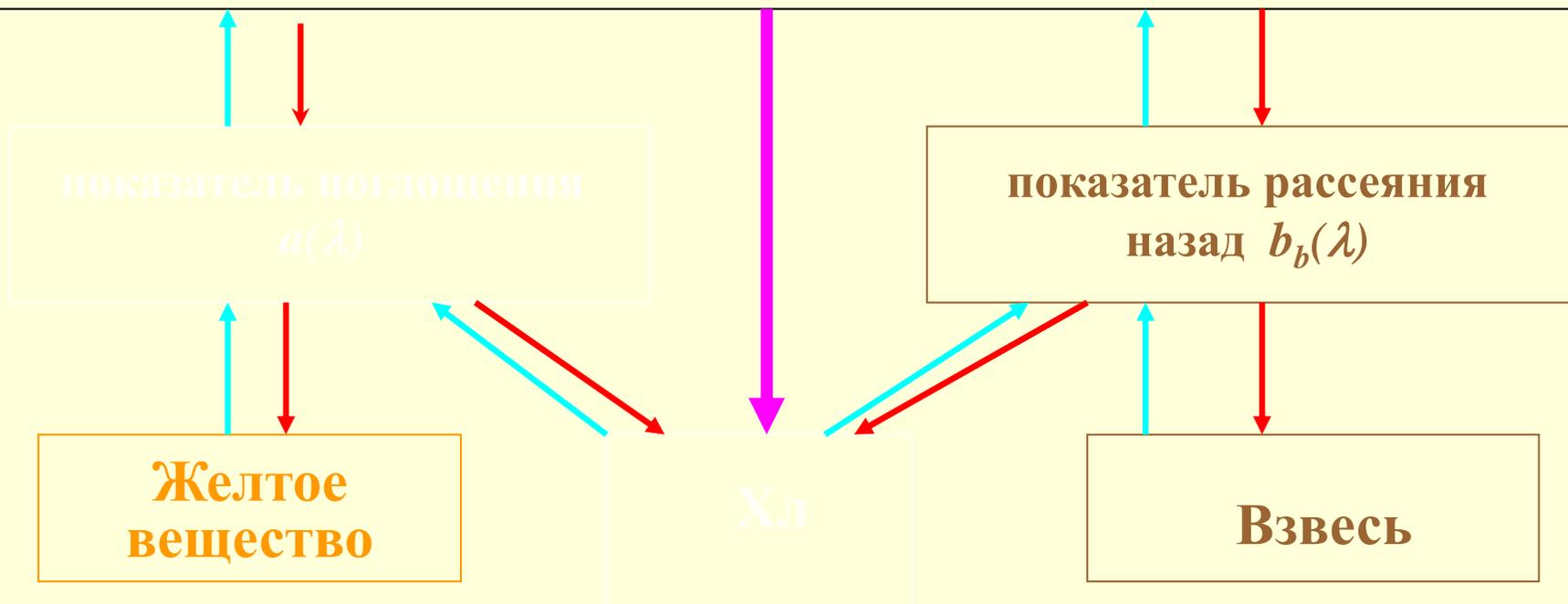
$T(\lambda_i)$ и $t(\lambda_i)$ – направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой;

$L_w(\lambda_i)$ – искомая яркость излучения, вышедшего из водной толщи.

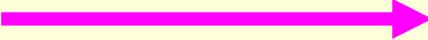
2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости $L_w(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи.

Биооптические алгоритмы

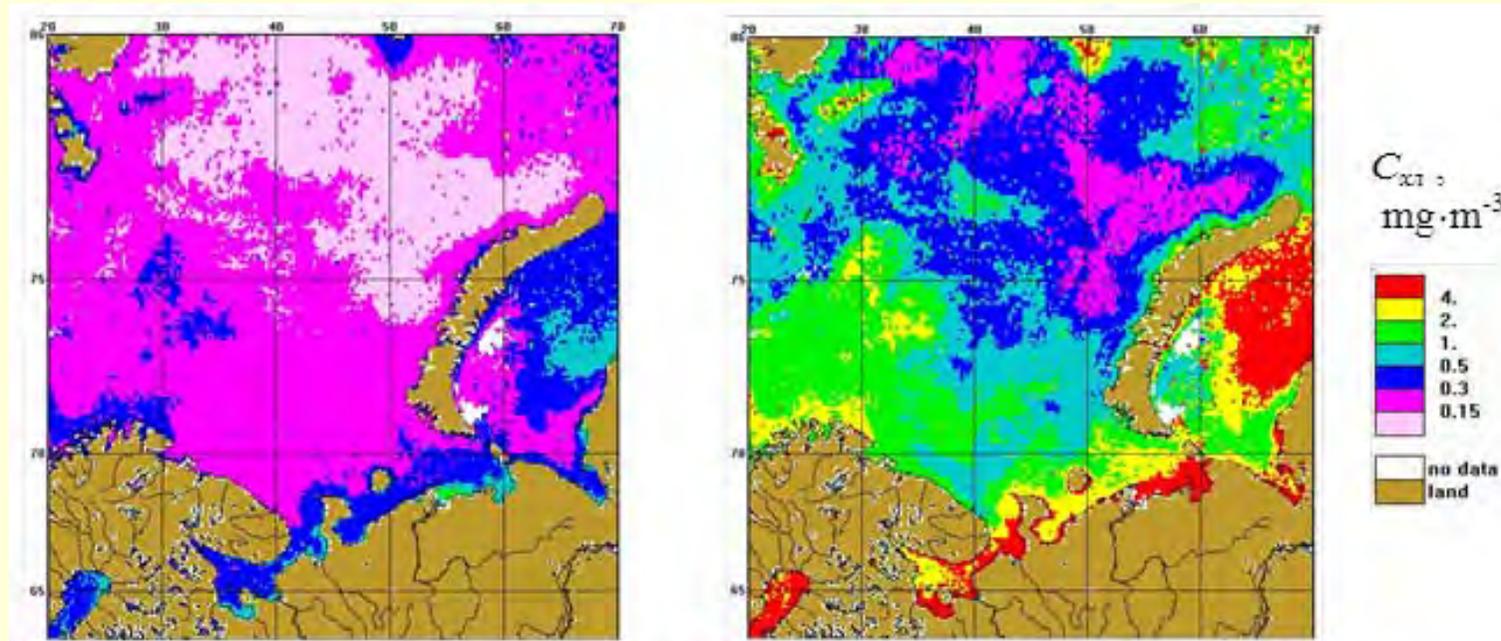
Спектральный коэффициент яркости водной толщи $\rho(\lambda)$



Полуаналитический алгоритм:  - прямая задача
 - обратная задача

Регрессионный алгоритм: 

Сравнение стандартного и регионального алгоритмов . Баренцево море.



The mean monthly distributions of chlorophyll concentration in the Barents Sea calculated with the standard SeaWiFS algorithm (right) and with the regional SIO RAS algorithm, validated by field data (left). August 2001.

Баренцево море

St.	Coordinates	Chl Meas.	Chl Auth.	Chl SeaWiFS	β
1088	70.42 N, 47.58E	0.16	0.25	0.63	5.7
1090	70.18N, 52.42E	0.5	0.77	3.3	12.7
1095	68.97N, 58.47E	0.79	0.21	10.4	114
1112	69.09N, 58.29E	0.42	0.62	9.5	36.7
1125	69.50N, 57.25E	0.23	0.06	2.8	76.2
1126	69.67N, 57.24E	0.18	0.19	2.7	33.3
1157	70.54N, 52.79E	0.25	0.17	1.09	15.0
1174	69.25N, 41.00E	1.39	1.03	1.0	2.3
1183	71.50N, 41.00E	0.38	0.32	0.81	3.8
1196	74.75N, 41.00E	0.13	0.14	0.28	3.6
1209	78.00 N, 41.00E	0.16	0.17	0.25	2.8
1281	76.00N, 42.27E	0.27	0.41	0.44	2.2

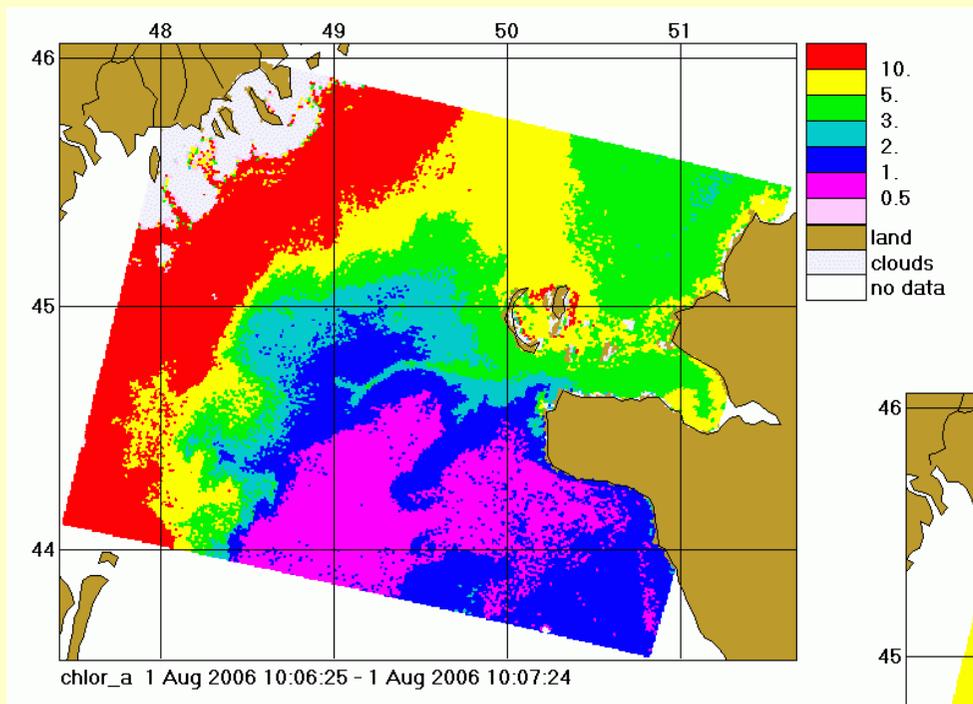
Pechora

Basin

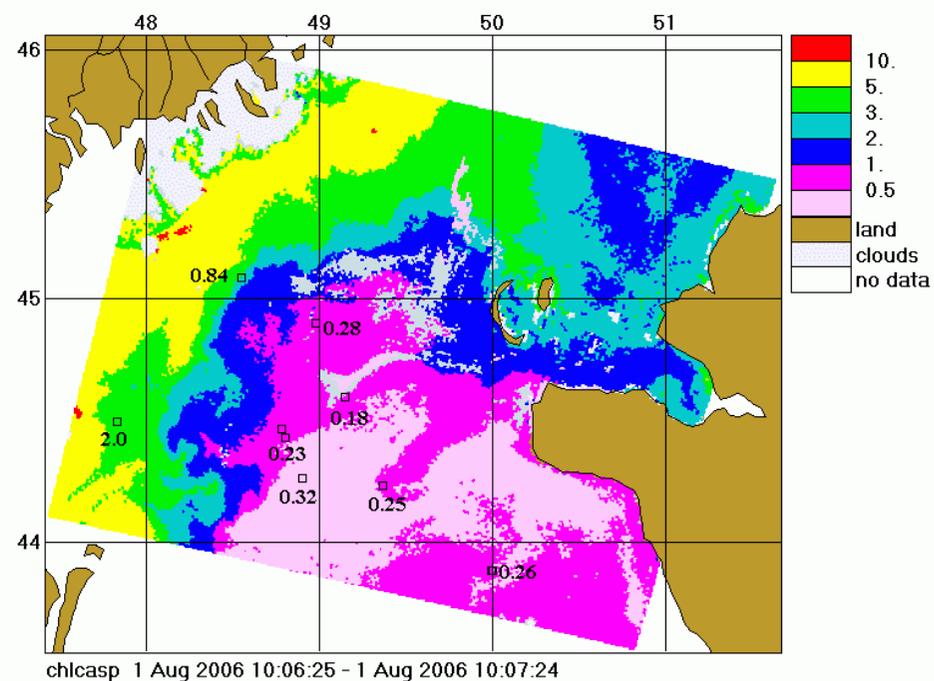
Сравнение между значениями концентрации Chl, измеренными (meas.), рассчитанными по региональному (Auth.) и стандартному (SeaWiFS) алгоритмам

<i>Pechora</i>	<i>Basin</i>	<i>48%</i>	<i>12 times</i>
<i>out of</i>	<i>it</i>	<i>27%</i>	<i>2 times</i>

Сравнение распределений концентрации хлорофилла по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS 1.08.06, рассчитанных посредством стандартного (слева) и нового регионального (справа) алгоритмов



Каспийское море



Необходимые условия получения качественных геофизических продуктов:

1. Выполнение необходимых требований к характеристикам спектральных каналов спутникового датчика;
2. Обеспечение радиометрической точности измерений не хуже 5% для определения абсолютных значений и 1% для относительных изменений;
3. Контроль калибровки спутникового датчика в период работы на орбите посредством бортовых и приводных измерений;
4. Разработка алгоритмов атмосферной коррекции и биооптических алгоритмов, адаптированных к особенностям прибора и его техническим характеристикам;
5. Обеспечение необходимой дополнительной информации для обработки спутниковых данных (данные о содержании озона, атмосферном давлении, относительной влажности, скорости ветра);
6. Верификация алгоритмов по данным натурных измерений для различных гидрометеорологических и океанологических условий; оценка точности рассчитываемых геофизических продуктов.

Организация получения, обработки и верификации данных

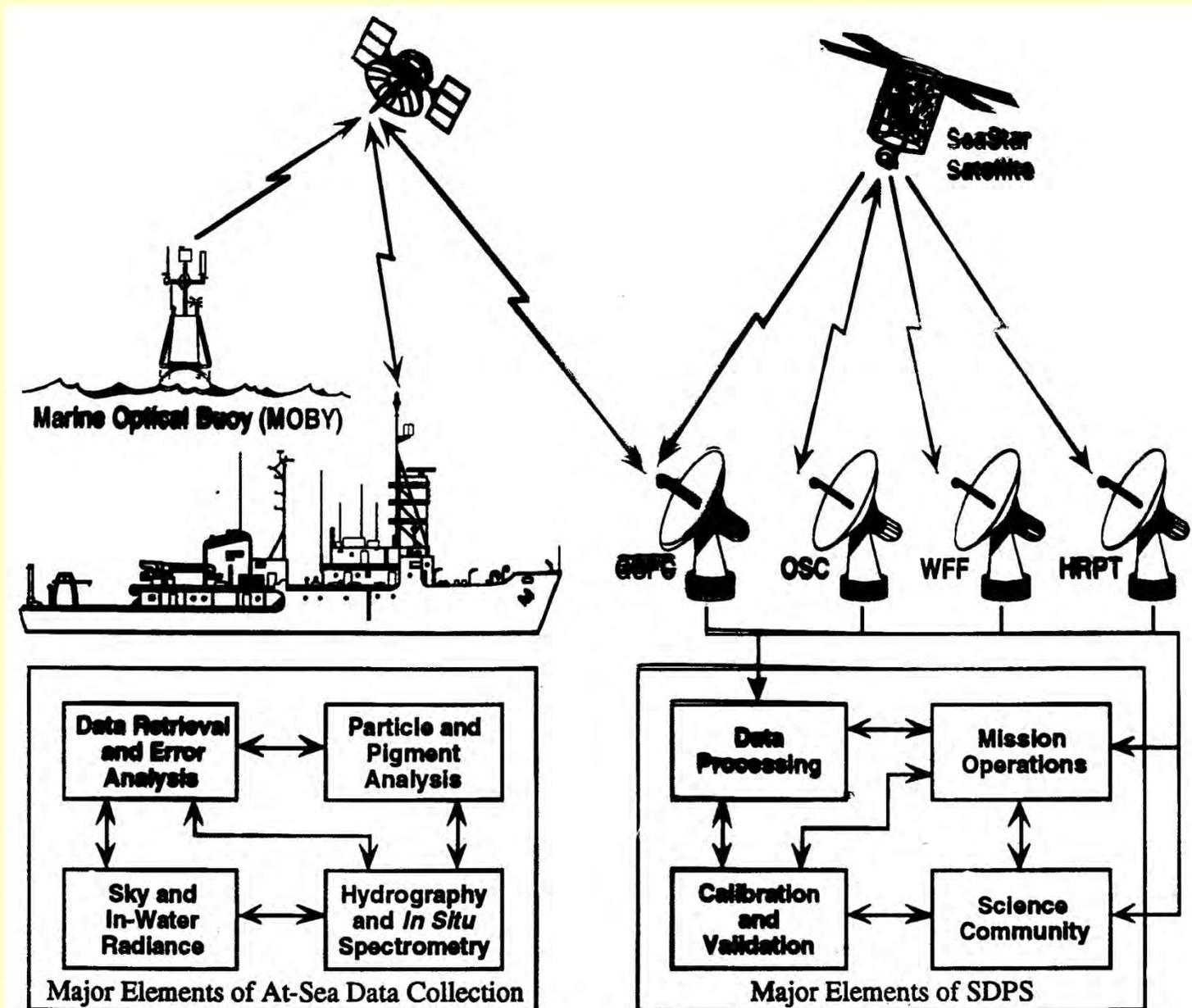
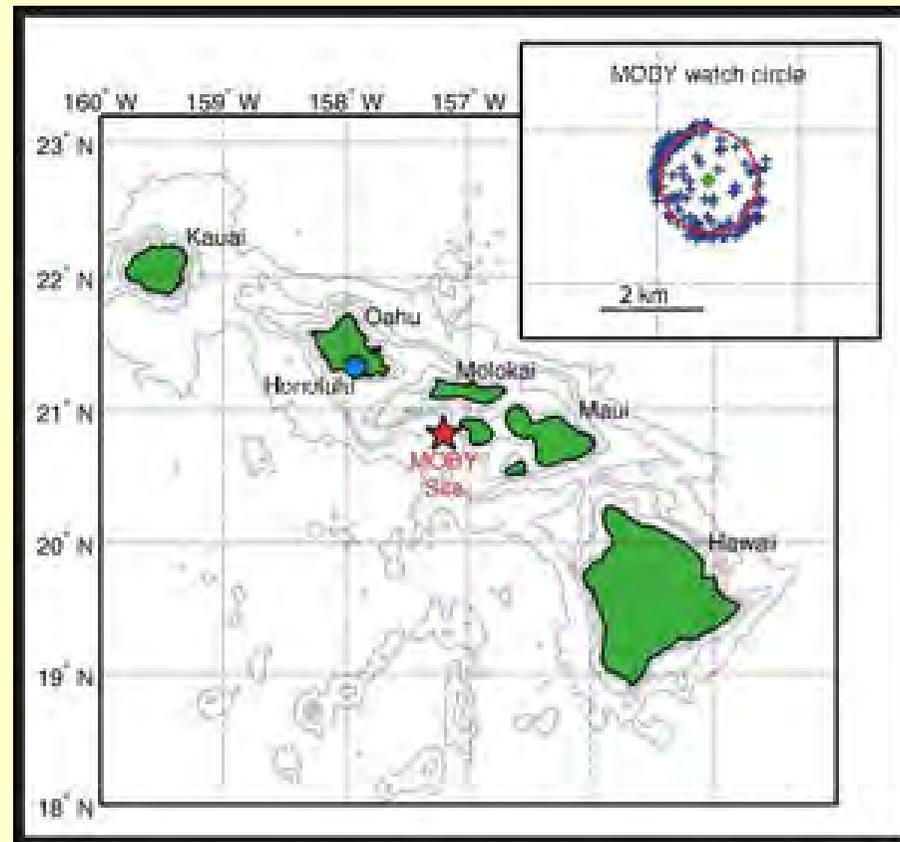
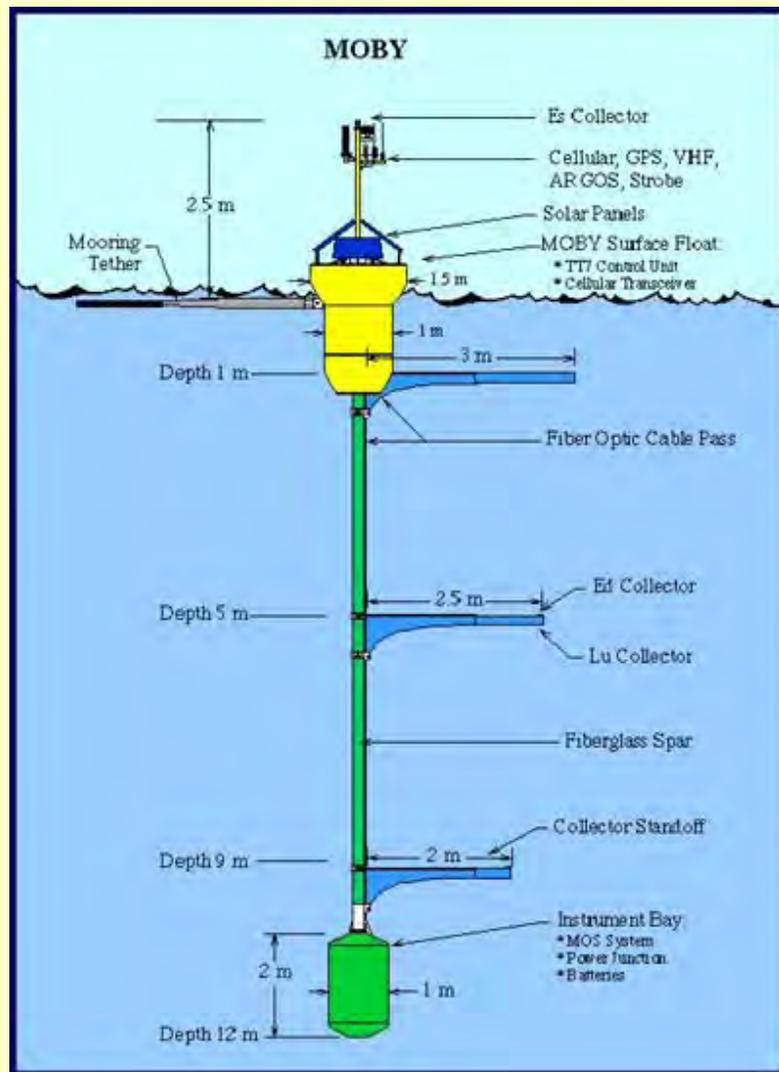


Fig. 2. SeaWiFS Project schematic showing major elements of shore and at-sea data processing.

Оптический буй MOBY для контроля калибровки Спутникового датчика и верификации алгоритмов

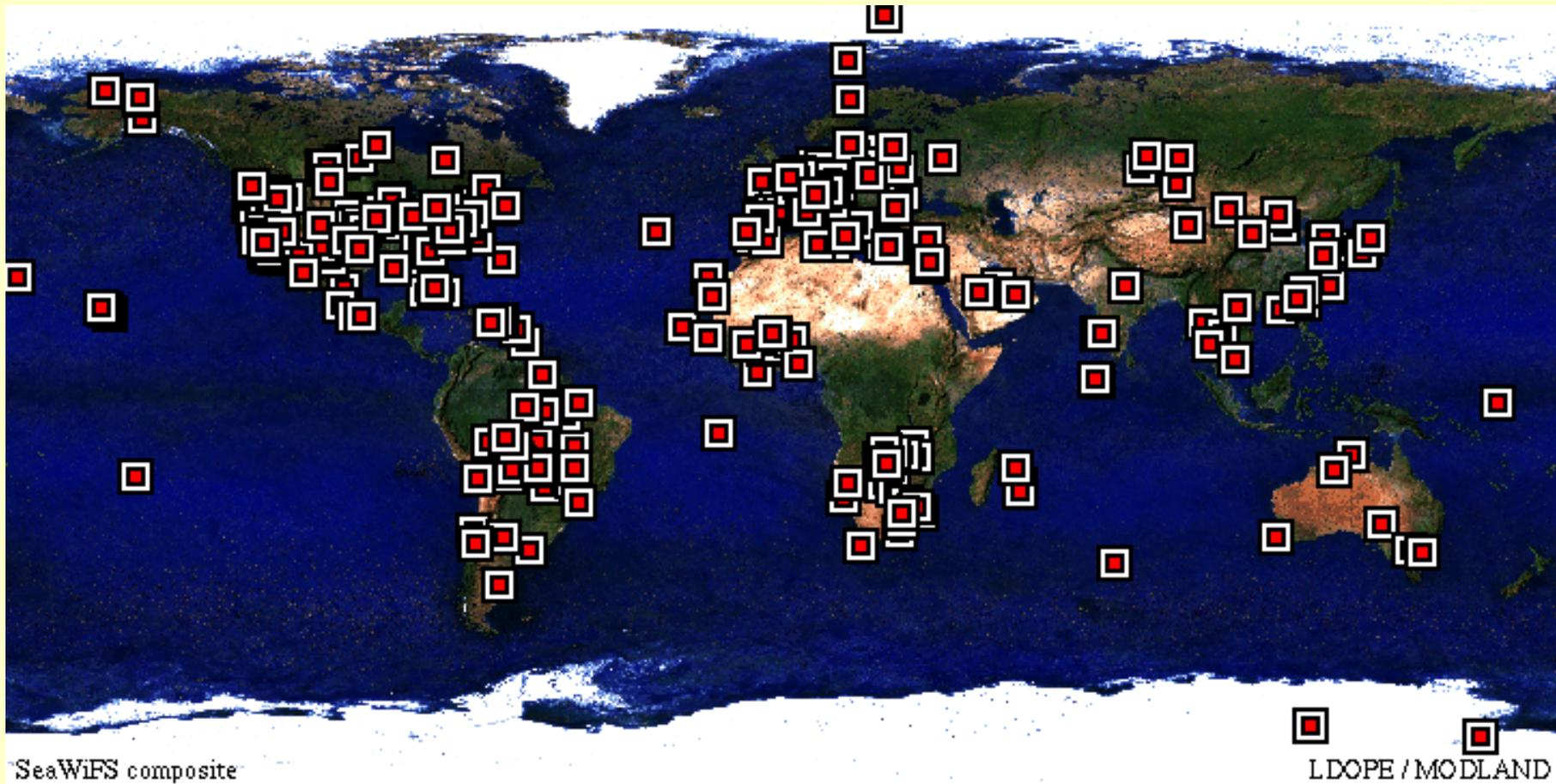


Местоположение MOBY:

13 морских миль от острова Ланаи
на глубине 1200 м.

Кружок на врезке показывает «блуждание» буй
относительно точки его закрепления.

AERONET



(**AErosol RObotic NETwork**) is an optical ground based aerosol monitoring network. The network hardware consists of identical automatic sun-sky scanning spectral radiometers. The data provide globally distributed near real time observations of aerosol spectral optical depths and aerosol size distributions. They used for algorithm validation of satellite aerosol retrievals and as well as for characterization of aerosol properties that are unavailable from satellite sensors.

LandSat-8

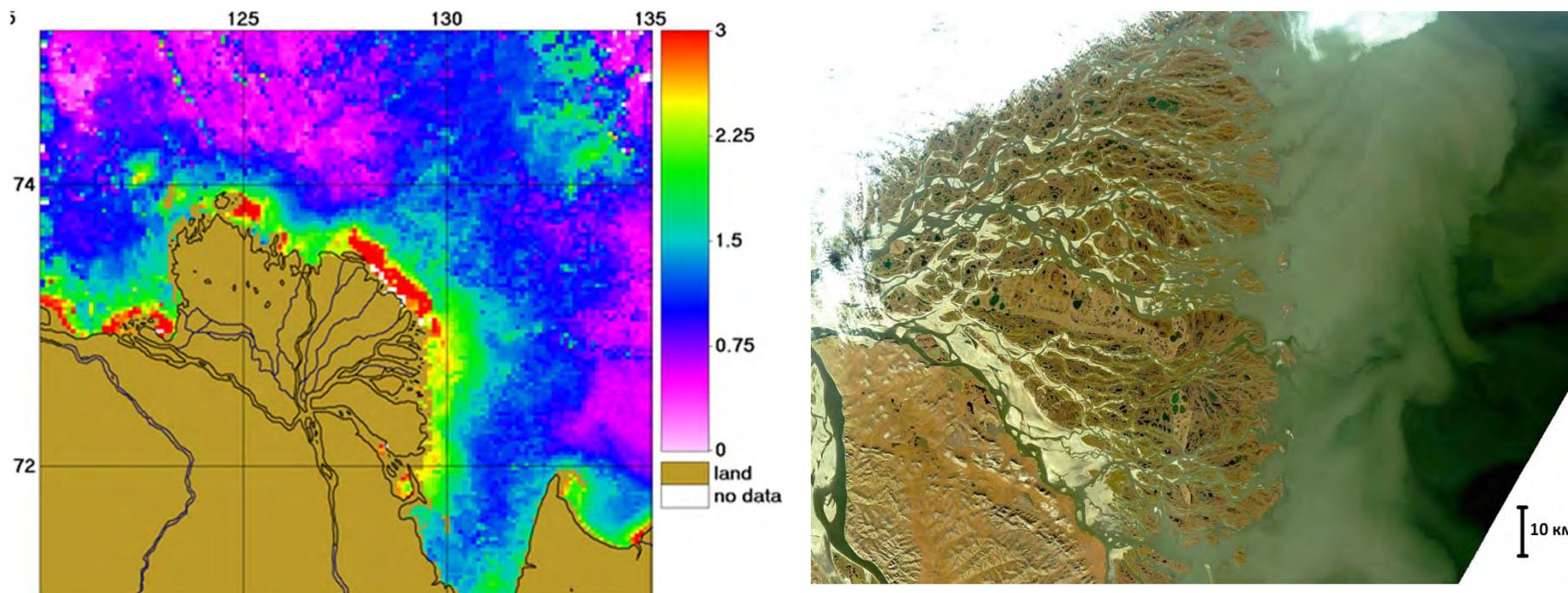
Выведен на орбиту 11 февраля 2013 года. На борту два набора инструментов:

[Operational Land Imager](#) (OLI) и [Thermal InfraRed Sensor](#) (TIRS).

Спутник рассчитан на срок активного существования в 5.25 лет, однако запас топлива позволяет использовать его до 10 лет.

Спектральный канал	Длины волн, мкм	Разрешение
Канал 1 — Побережья и аэрозоли (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0.433 — 0.453	30 м
Канал 2 — Синий (Blue)	0.450 — 0.515	30 м
Канал 3 — Зелёный (Green)	0.525 — 0.600	30 м
Канал 4 — Красный (Red)	0.630 — 0.680	30 м
Канал 5 — Ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0.845 — 0.885	30 м
Канал 6 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1.560 — 1.660	30 м
Канал 7 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2.100 — 2.300	30 м
Канал 8 — Панхроматический (Panchromatic, PAN)	0.500 — 0.680	15 м
Канал 9 — Перистые облака (Cirrus, SWIR)	1.360 — 1.390	30 м
Канал 10 — Дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10.30 — 11.30	100 м
Канал 11 — Дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11.50 — 12.50	100 м

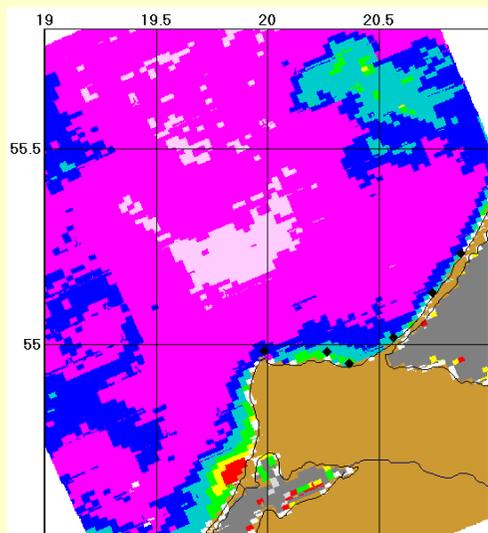
Распространение стока Лены в море Лаптевых



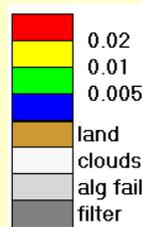
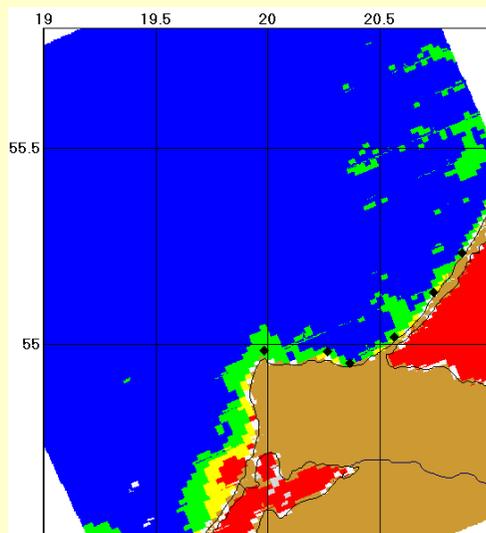
Слева: распределение показателя поглощения желтого вещества по данным MODIS-Aqua за период 6 -17 сентября 2015 г., справа - изображение от 8 сентября 2015 г. со спутника Landsat 8. Хорошо видна структура речного стока Лены – множество сливающихся проток, несущих теплые, пресные и мутные воды (Глуховец, Артемьев, 2017).

Спутниковые изображения района вблизи Куршского и Калининградского заливов в юго-восточной части Балтийского моря.

Левый и средний рисунки – данные сканера цвета MODIS-Aqua 22 апреля 2009 г., правый – изображение Landsat 21 апреля 2009 г.



Распределение концентрации хлорофилла, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$, рассчитанное по алгоритму Woźniak et al. (2008)



Распределение концентрации взвеси, $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$, рассчитанное по алгоритму Буренков и др. (2008)



Изображение Landsat 21 апреля, построенное по данным первых 3-х каналов.

Спасибо за внимание!

Таруса_2020