

Лекция: «Спутниковые биооптические параметры  
в качестве основных климатических переменных»»

*Копелевич О.В., Костяной А.Г.*  
(ИО РАН, Москва)

## ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI: 10.21513/2410-8758-2018-3-8-29

УДК 551.46

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКЕАНА, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАНЫМ, В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ**

*О.В. Копелевич<sup>1)</sup>, А.Г. Костяной<sup>1), 2)\*</sup>*

<sup>1)</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36; \*[Oleg@ocean.ru](mailto:Oleg@ocean.ru), [Kostyanoy@gmail.com](mailto:Kostyanoy@gmail.com)

<sup>2)</sup> Московский университет им. С.Ю. Витте,  
Россия, 115432, Москва, 2-й Кожуховский пр-д, 12, строение 1

**Реферат.** В работе представлен краткий обзор современных возможностей дистанционного зондирования океанов и морей из космоса для мониторинга климатически значимых биооптических (биогеохимических и биологических/экосистемных) параметров океана.

# Основные климатические переменные (ОКП)

## Essential Climate Variables (ECV)

ОКП – физические, химические или биологические переменные или группа связанных между собой переменных, наиболее важные для характеристики климата Земли.

Данные ОКП обеспечивают эмпирическое подтверждение, необходимое для понимания и прогнозирования эволюции климата, для руководства мерами по смягчению и адаптации, для оценки рисков и обеспечения возможности отнесения климатических явлений к основным причинам и для поддержки климатического обслуживания.

Всемирная климатическая программа (**World Climate Programme - WCP**) с 1980 г.

Всемирная программа исследования климата (**World Climate Research Programme - WCRP**), результаты которой используются межправительственной группой экспертов по изменению климата для оценки изменений климата и их последствий. Глобальная система наблюдений за климатом (**Global Climate Observing System - GCOS**) и Глобальная система наблюдений за океаном (**Global Ocean Observing System - GOOS**).

**GOOS** - глобальная, унифицированная, международная система для систематических наблюдений, сбора и распространения океанографических данных наблюдений, подготовки анализов и прогнозов и другой продукции.

## Критерии выбора ECV

### **Значимость** (relevance)

-важность для описания климатической системы и ее изменений;

### **Выполнимость** (feasibility)

-наблюдение или извлечение переменной в глобальном масштабе  
технически возможно с помощью обоснованных методов, понятных  
-с научной точки зрения;

### **Экономическая эффективность** (cost effectiveness)

- получение и архивизация данных для переменной доступно по цене,  
основано на координированных системах наблюдения, использующих  
обоснованную технологию, преимущественно с наличием  
исторических наборов данных.

## ECV

## Products

### Physical

Ocean Surface Heat Flux	Latent Heat Flux; Sensible Heat Flux (скрытый и явный потоки тепла)
Sea Ice	Sea Ice Concentration; Sea Ice Extent/Edge; Sea Ice Thickness; Sea Ice Drift (концентрация морского льда, протяженность, толщина)
Sea Level	Global Mean Sea Level; Regional Sea Level (уровень моря)
Sea State	Wave Height (высота волн)
Sea Surface Salinity	Sea Surface Salinity – SSS (соленость на поверхности моря)
Sea Surface Temperature	Sea Surface Temperature SST (температура на поверхности моря)
Subsurface Currents	Interior Currents (подповерхностные течения)
Subsurface Salinity	Interior Salinity (подповерхностная соленость)
Subsurface Temperature	Interior Temperature (подповерхностная температура)
Surface Currents	Surface Geostrophic Current (поверхностные геострофические течения)
Surface Stress	Surface Stress (напряжение трения ветра)

## Biogeochemical

Inorganic Carbon	Surface Ocean Partial Pressure of CO <sub>2</sub> (p CO <sub>2</sub> ); Subsurface ocean storage of CO <sub>2</sub> (неорганический углерод)
Nitrous Oxide	Interior ocean N <sub>2</sub> O; N <sub>2</sub> O air-sea flux (оксид азота)
Nutrients	Interior ocean concentrations of silicate, phosphate, nitrate («биогены»)
Ocean Colour	Water Leaving Radiance; Chlorophyll-a Concentration (цвет океана)
Oxygen	Interior ocean oxygen concentration (концентрация кислорода)
Transient Tracers	Interior ocean CFC-12, CFC-11, SF <sub>6</sub> , tritium, <sup>3</sup> He, <sup>14</sup> C, <sup>39</sup> Ar («трассеры»)

## Biological/Ecosystems

Marine Habitat Properties	Coral Reefs; Mangrove Forests, Seagrass Beds, Macroalgal Communities (коралловые рифы, мангровые леса, заросли и сообщества макрофитов)
Plankton	Phytoplankton; Zooplankton (фитопланктон, зоопланктон).

**Всего 54 переменных, для океана – 19.**

## ОКП, измеряемые со спутников

Данные предоставляются Совместной Рабочей группой по климату (WGClimate) Комитета по дистанционному зондированию Земли (**Committee on Earth Observation Satellites - CEOS**) и Координационной группы по метеорологическим спутникам (**Coordination Group for Meteorological Satellites - CGMS**).

- (1) Цвет океана (восходящее излучение, концентрация хлорофилла-а);
- (2) Морской лед (концентрация льда, площадь/кромка льда, толщина льда, дрейф льда);
- (3) Температура поверхности океана;
- (4) Уровень океана (региональный уровень океана, глобальный средний уровень океана);
- (5) Потоки тепла на поверхности океана (потоки скрытого и явного тепла);
- (6) Состояние океана (высота волн);
- (7) Напряжение трения ветра на поверхности океана

## Современные спутниковые датчики, подходящие для определения ОКП

<b>Датчик</b>	<b>Агентство, страна</b>	<b>Спутник</b>	<b>Дата запуска</b>	<b>Ширина полосы, км</b>	<b>Пространственное разрешение</b>	<b>Число спектр. каналов</b>	<b>Спектр. диапазон, нм</b>	<b>Время пересеч. экватора</b>
<b>MODIS-</b>	NASA	Aqua (EOS-PM1)	04.05 2002	2330	250/500 /1000	36	405-14385	13:30
<b>MODIS-</b>	NASA	Terra (EOS-AM1)	18.12 1999	2330	250/500 /1000	36	405-14385	10:30
<b>OLCI</b>	ESA/ EUMETSAT	Sentinel 3A	16.02 2016	1270	300/1200	21	400-1020	10:00
<b>OLCI</b>	ESA/ EUMETSAT	Sentinel 3B	25.04 2018	1270	300/1200	21	400-1020	10:00
<b>VIIRS</b>	NOAA	SuomiNPP	28.10 2011	3000	375/750	22	402-11800	13:30
<b>VIIRS</b>	NOAA/NASA	JPSS-1/ NOAA-20	18.11 2017	3000	375/750	22	402-11800	13:30
<b>GOCI</b>	KARI/KIOST	COMS	26.06 2010	2500	500	8	400-865	Геостац.



## Стандартные продукты обработки данных спутниковых датчиков цвета, относящиеся к океану

<b>Параметр</b>	<b>Примечание</b>
<p>Спектральный коэффициент яркости моря*, <math>sr^{-1}</math></p> <p>Remote Sensing Reflectance, <b>Rrs</b>, <math>sr^{-1}</math></p>	<p>Определяется для спектральных каналов 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм – MODIS; 410, 443, 486, 551, 671 нм – VIIRS; 400, 412, 442, 490, 510, 560, 620, 665, 674, 681, 709 нм - OLCI</p>
<p>Концентрация хлорофилла-а, <math>mg\ m^{-3}</math></p> <p>Chlorophyll-a concentration, <b>chlor_a</b>, <math>mg\ m^{-3}</math></p>	<p>chlor_a по данным MODIS и VIIRS рассчитывается через значения Rrs для 2-4 длин волн из диапазона 440-670 нм (Algorithm Descriptions, 2018).</p> <p>По данным OLCI chlor_a рассчитывается двумя способами: по двум длинам волн 442 и 560 нм и методом нейронных сетей.</p>
<p>Показатель диффузного ослабления для длины волны 490нм, <math>m^{-1}</math></p> <p>Diffuse attenuation coefficient at 490nm, <b>Kd_490</b>, <math>m^{-1}</math></p>	<p>Рассчитывается для нисходящего потока солнечного излучения для слоя 0-<math>z_1</math>, где <math>z_1</math> – «первая оптическая глубина», равная <math>\sim 1/Kd_{490}</math>. Для MODIS рассчитывается через значения Rrs для 488 и 547 нм, VIIRS – 490 и 550 нм, OLCI – 490 и 560 нм.</p>

<p>Первичные оптические характеристики, <math>m^{-1}</math></p> <p>Inherent Optical Properties, <b>IOPs</b>, <math>m^{-1}</math></p>	<p>Для расчета IOPs по данным MODIS и VIIRS разработано программное обеспечение GIOP (Generalized IOP) (Algorithm Descriptions, 2018; Werdell et al., 2013, 2018), позволяющее рассчитывать спектральные показатели поглощения и рассеяния назад, а также значения этих показателей для окрашенного органического вещества, фитопланктона и взвешенных частиц для длины волны 443 нм. По-видимому, GIOP применимо и для OLCI.</p>
<p>Взвешенный органический углерод, <math>mg\ m^{-3}</math></p> <p>Particulate Organic Carbon, <b>POC</b>, <math>mg\ m^{-3}</math></p>	<p>POC рассчитывается через отношение значений <math>R_{rs}</math> для длин волн 443 и 547-560 нм с помощью уравнения регрессии, выведенного по данным измерений in situ для Атлантического и Тихого океанов. По-видимому, применимо и для OLCI.</p>
<p>Взвешенный неорганический углерод, <math>mol\ m^{-3}</math></p> <p>Particulate Inorganic Carbon, <b>PIC</b>, <math>mol\ m^{-3}</math></p>	<p>Расчетный алгоритм включает два варианта: через отношение значений <math>R_{rs}</math> для длин волн 443 и 555 нм и с использованием трех длин волн 670, 750 и 870 нм (применяется, если 2-х волновый алгоритм не срабатывает). Пригоден для всех современных спутниковых датчиков (Algorithm Descriptions, 2018).</p>

<p>Фотосинтетически Активная Радиация, ФАР, Эйнштейн <math>\text{м}^{-2}</math> <math>\text{сут}^{-1}</math></p> <p>Photosynthetically Available Radiation, PAR, Einstein <math>\text{м}^{-2}</math> <math>\text{d}^{-1}</math></p>	<p>Количество квантов солнечного излучения (фотонов) в спектральном диапазоне 400-700 нм, падающего за сутки на <math>1\text{м}^2</math> морской поверхности, в молях (1 Эйнштейн <math>\approx 6 \cdot 10^{23}</math> квантов). (Algorithm Descriptions, 2018); Frouin et al., 2012).</p>
<p>Мгновенное значение ФАР, Эйнштейн, <math>\text{м}^{-2}</math> <math>\text{с}^{-1}</math></p> <p>Instantaneous PAR, iPAR, Einstein <math>\text{м}^{-2}</math> <math>\text{s}^{-1}</math></p>	<p>Интегральная облученность поверхности моря в спектральном диапазоне 400-700 нм, в Эйнштейн <math>\text{м}^{-2}</math> <math>\text{с}^{-1}</math> (или <math>\mu\text{Эйнштейн}</math> <math>\text{м}^{-2}</math> <math>\text{с}^{-1}</math>).</p> <p>Для MODIS и OLCI (Algorithm Descriptions, 2018; Sentinel 3, 2018).</p>
<p>Концентрация взвешенного вещества, <math>\text{г}</math> <math>\text{м}^{-3}</math></p> <p>Total suspended matter concentration, TSM, <math>\text{г}</math> <math>\text{м}^{-3}</math></p>	<p>Входит в список стандартных продуктов OLCI вместе с оценкой ошибок расчета, рассчитывается через значения <math>R_{rs}</math> для 15 спектральных каналов (400 – 753.5 нм, 779, 865 и 1020нм) методом нейронных сетей.</p>

## Параметры, определяемые по данным спутниковых сканеров цвета, рекомендуемые для включения в перечень ОКП

### Группа «Физические»

Предлагается включить три переменные:

Спектральный коэффициент яркости моря (Remote Sensing Reflectance),  $R_{rs}$ ,  $sr^{-1}$ ;

показатель диффузного ослабления (diffuse attenuation coefficient)  $K_d(490)$ ,  $m^{-1}$ ;

фотосинтетически активную радиацию (photosynthetically available radiation), Эйнштейн  $m^{-2} сут^{-1}$ .

Совокупность этих трех переменных даст возможность приближенно оценивать не только ФАР, поступающую на поверхность, но и ФАР, вышедшую из-под поверхности и отраженную от поверхности (для последней еще потребуются данные о скорости ветра), также поглощенную в водной толще.

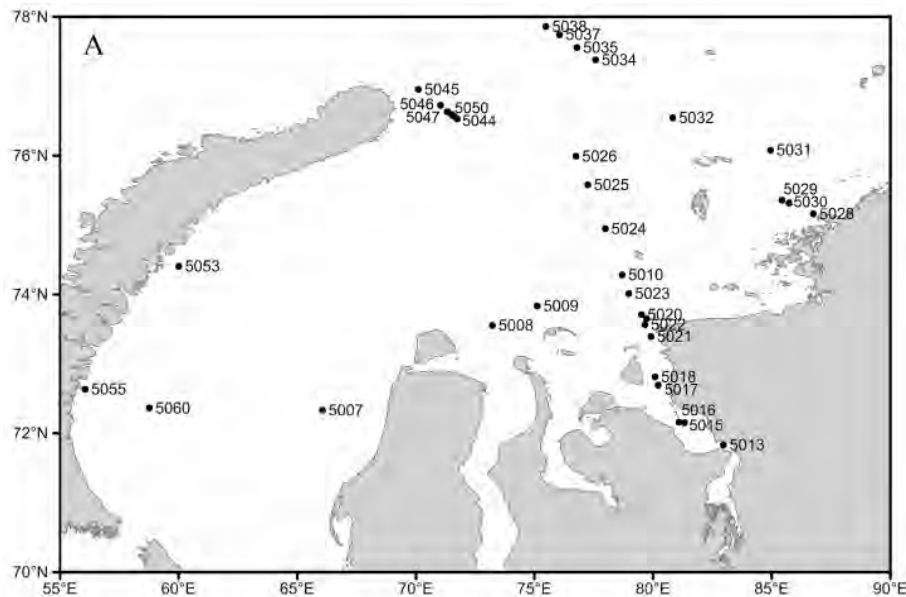
### **Группа «Биогеохимические»**

1. Предлагается переменную «концентрация хлорофилла-а» (Chlorophyll-a Concentration) перенести из этой группы в группу «Биология/Экосистемы».
2. В группу «Биогеохимические» включить биогеохимические параметры:  
**«концентрация взвешенного вещества» (Total Suspended Matter), г м<sup>-3</sup>;**  
**показатель поглощения окрашенного органического вещества, м<sup>-1</sup> .**

### **Группа «Биология/Экосистемы»**

Предлагается включить в подгруппу «Фитопланктон» (Phytoplankton) (GOSIC, 2018) две переменных:

- «концентрация хлорофилла-а» (Chlorophyll-a Concentration), мг м<sup>-3</sup>,**  
**«взвешенный неорганический углерод» (Particulate Inorganic Carbon - PIC), моль м<sup>-3</sup>**  
.

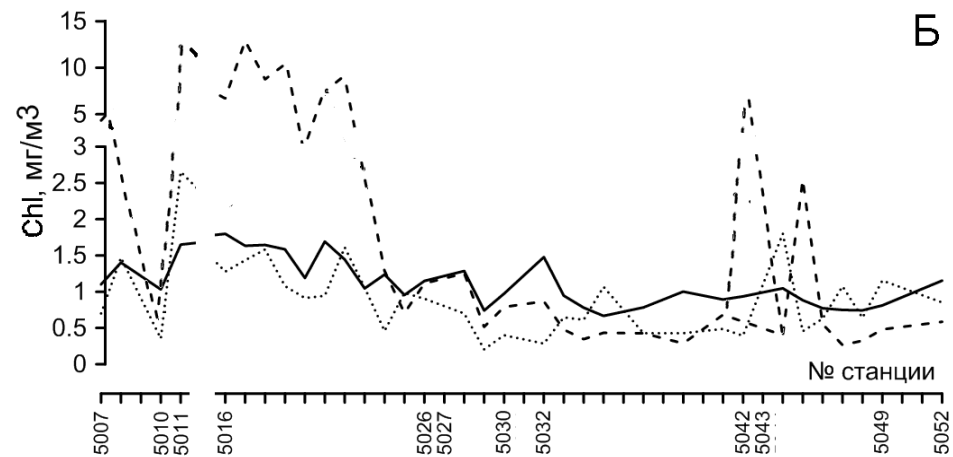


**Необходимость использования  
региональных алгоритмов для  
акваторий  
с аллохтонными источниками  
оптически активных примесей**

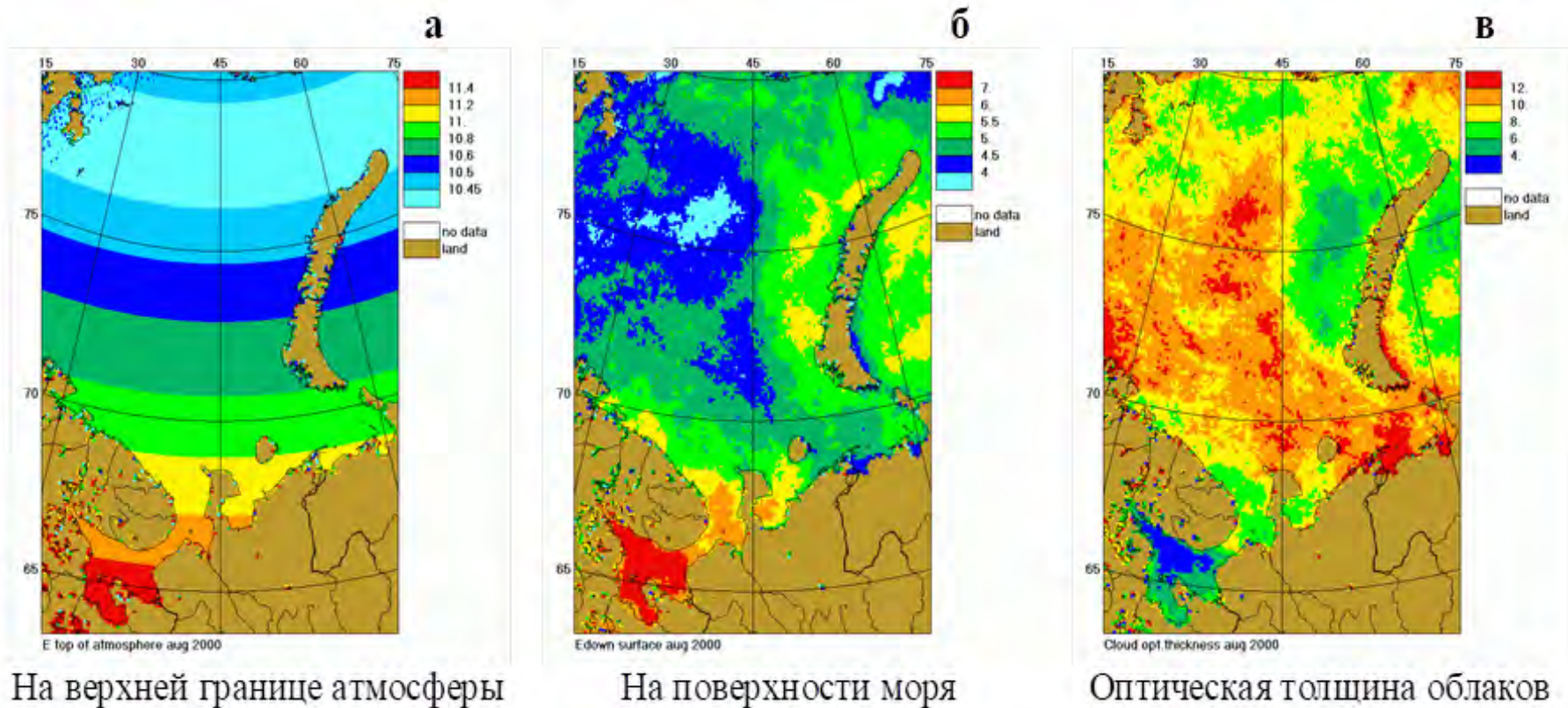
Маршрут 59-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море в сентябре 2011г.

(А) изменения концентрации Хл по маршруту

(Б) (ст.5013-5015 в водах Енисея исключены).



## ФАР на поверхности моря



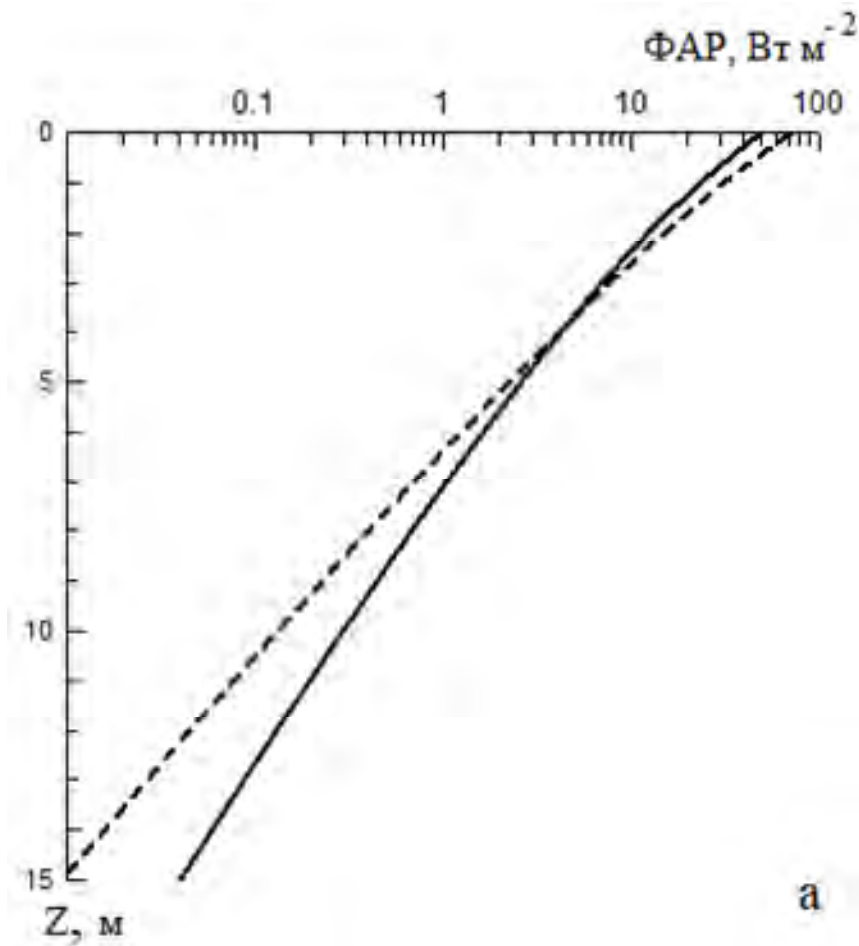
Среднемесячные распределения дневной экспозиции ФАР,  $\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$  на верхней границе атмосферы (а);

на поверхности моря (б);

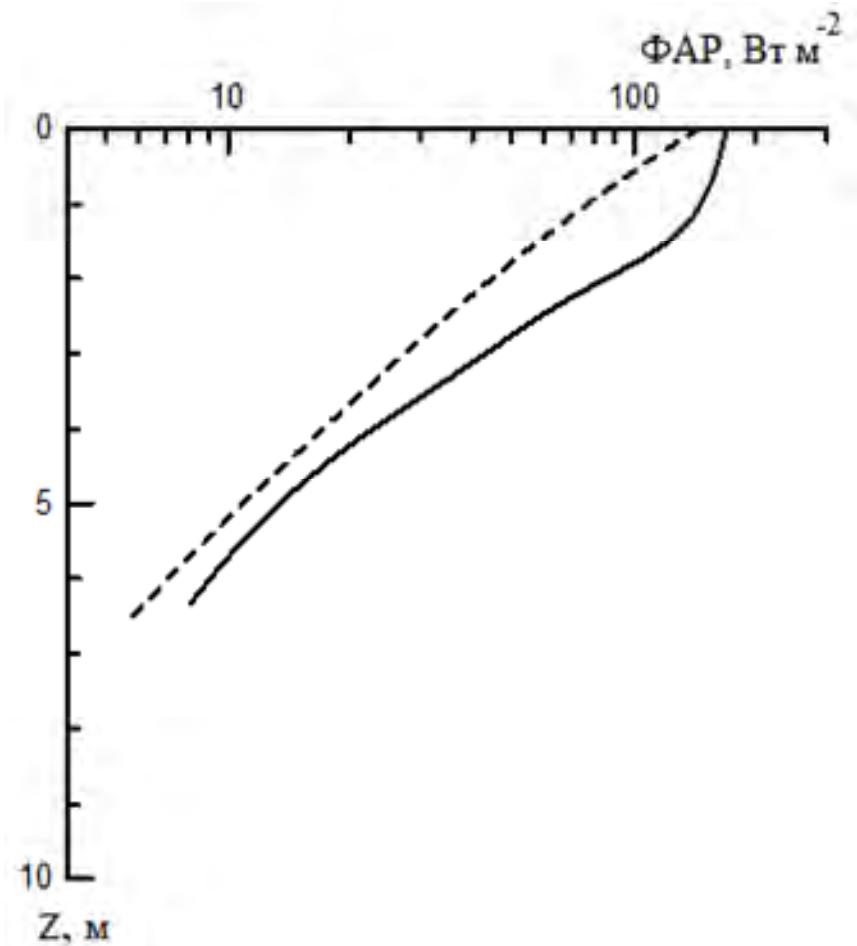
оптическая толщина облаков (в).

*Баренцево море, август 2000г. Рассчитаны по данным спутникового сканера цвета*

*SeaWiFS*



Белое море, 2007 г.

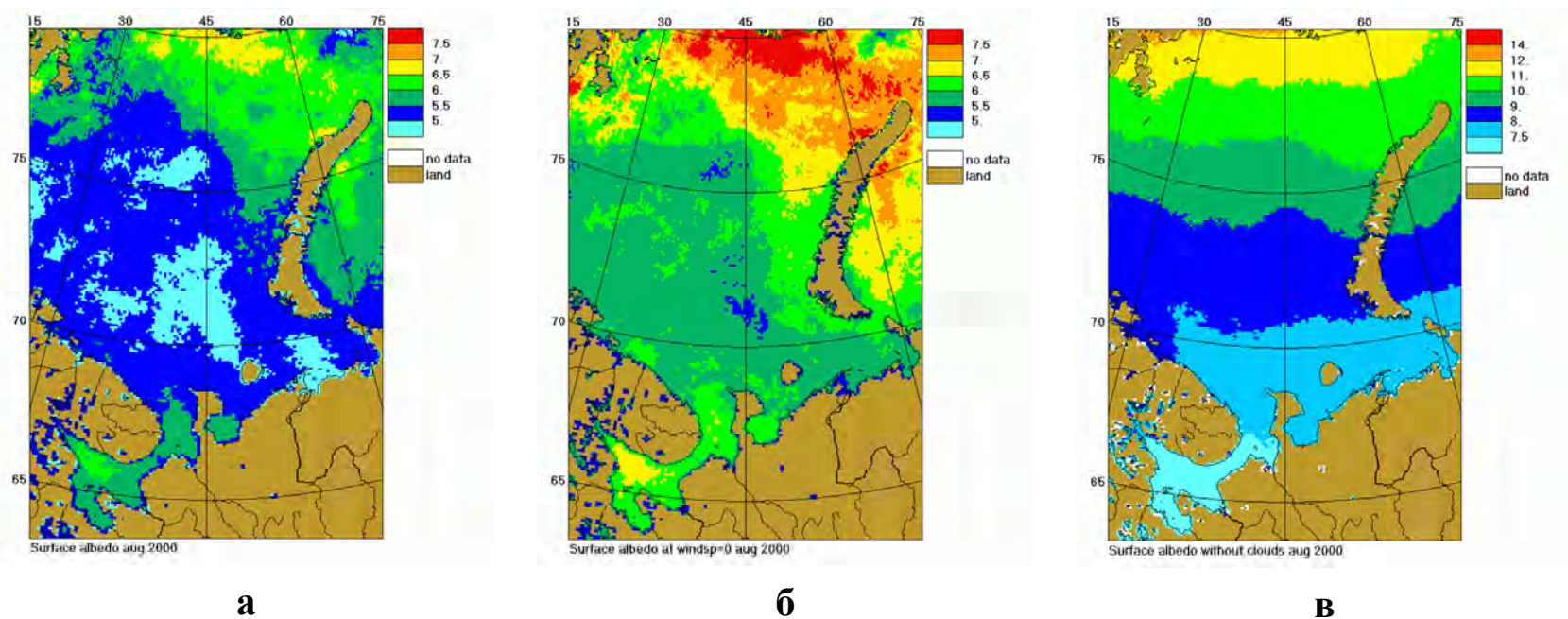


Баренцево море, 1998 г.

Рис.3 Вертикальные профили  $\Phi AP(z)$ , рассчитанные по спутниковым данным (пунктир), в сравнении с данными измерений *in situ* (сплошные линии).

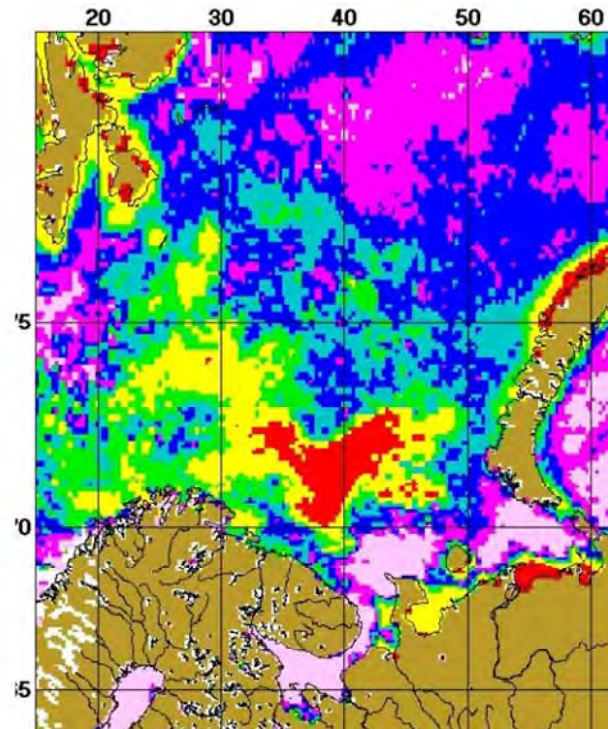


## Альbedo поверхности моря

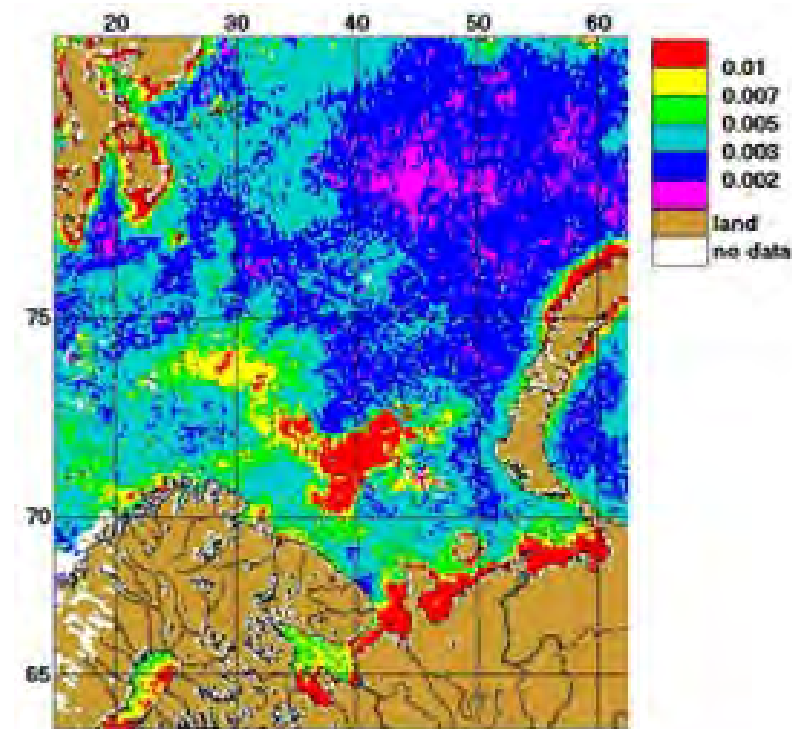


Среднемесячные распределения реального альbedo поверхности моря, % (а), рассчитанного по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS; то же при отсутствии ветра (б) и отсутствии облачности (в) Баренцево море, август 2000 г. (Копелевич и др., 2003).

## Альбе́до водной толщи



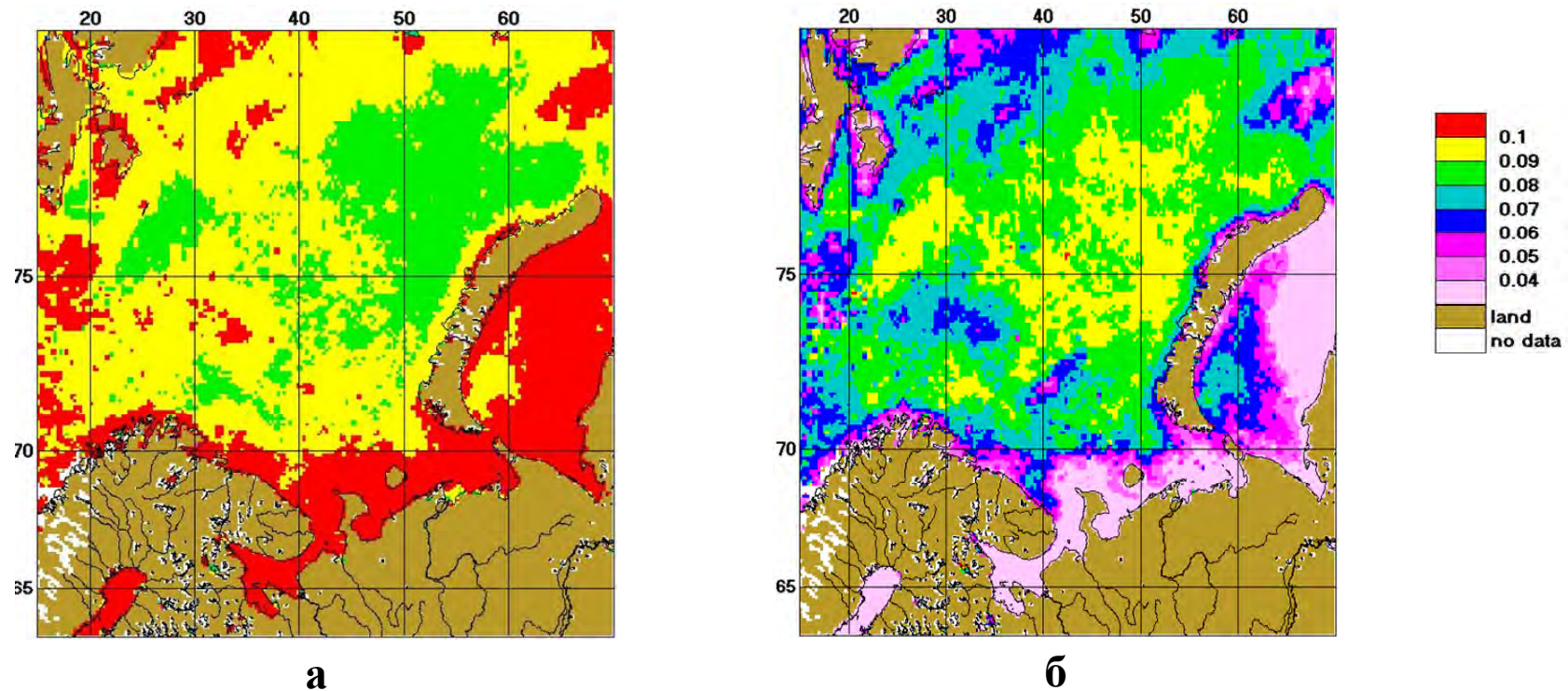
а



б

Среднемесячные распределения альбе́до водной толщи (а ) и показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{br}$ ,  $m^{-1}$  (б), рассчитанные по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS. Баренцево море, август 2000 г.

## Объемное поглощение ФАР в водной толще



Среднемесячные распределения доли поглощенной ФАР в слое 2-3 м (а) и в слое 15-25 м (б), рассчитанные по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS Баренцево море, август 2000 г. (Korelevich et al., 2007).

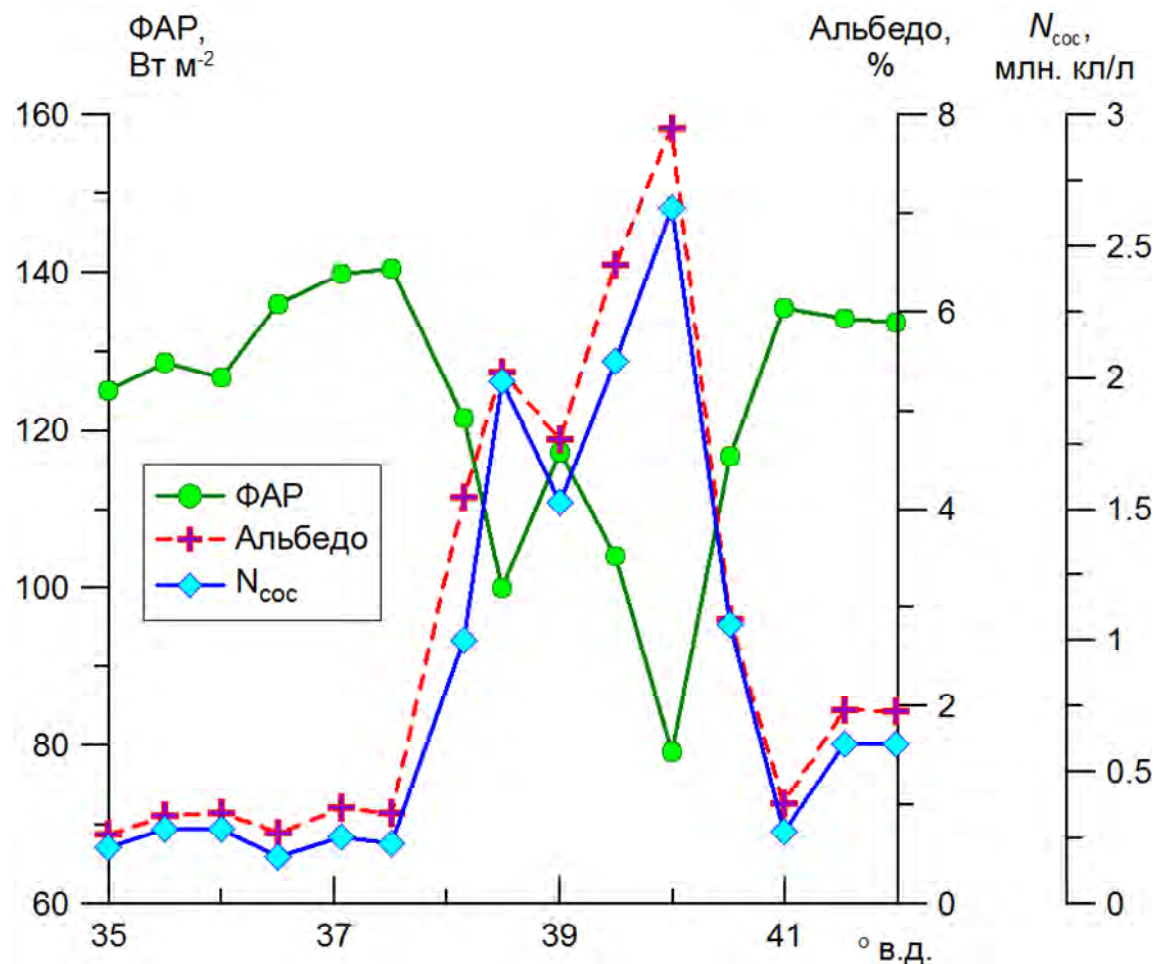


Рис.4 Изменение величины ФАР на глубине 5 м (Вт м<sup>-2</sup>, кружочки, сплошная линия), концентрации кокколитофорид N<sub>coc</sub> (млн. кл/л, ромбики, сплошная линия) и альbedo водной толщи (% , крестики, пунктирная линия) на разрезе по 71° с.ш. в Баренцевом море по данным MODIS 6.07.2016 г. (Копелевич и др., 2017).

**Спасибо за внимание!**