

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА MODIS/(TERRA+AQUA)

Мамаш Е.А.¹, Пестунов И.А.¹, Чурилова Т.Я.², Федоров Р. К.³

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск, Россия

²Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»,
Севастополь, Россия

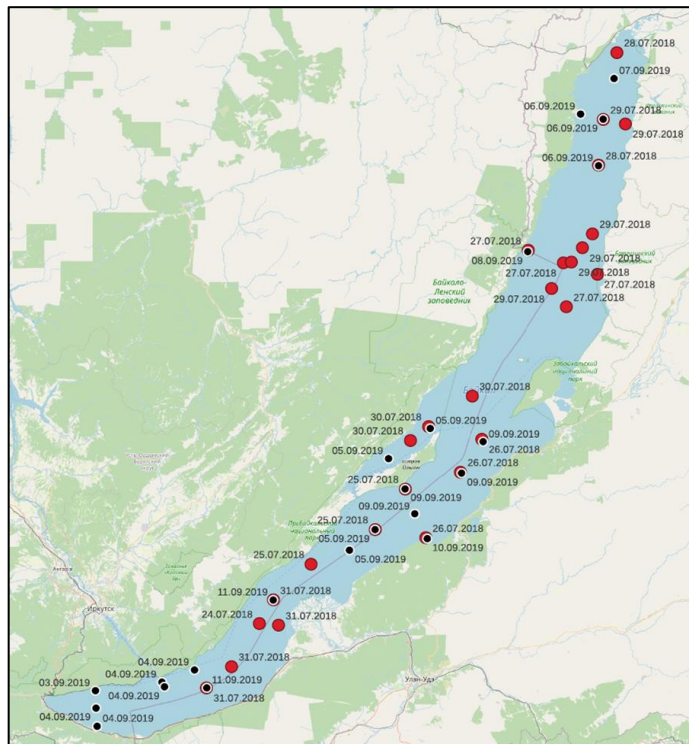
³Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова, Иркутск, Россия

Использование данных дистанционного зондирования для оценки содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое водоемов

- Хлорофилл «а» – это основной фотосинтетически активный пигмент, который часто используется в качестве показателя биомассы фитопланктона и продуктивности водоемов.
- В настоящее время методы оценки концентрации хлорофилла «а» на основе спутниковых данных широко используются при изучении продуктивности морей и океанов. Однако их применение в комплексных исследованиях внутриконтинентальных водоемов достаточно ограничено. Это связано, прежде всего, с необходимостью учета особенностей каждого исследуемого водоема, которые определяются оптически активными компонентами водоема и их соотношениями [Чурилова и др., 2024; Karimi et al, 2024; Bocharov et al, 2017; Vazyulya et al, 2014; El-Alem et al, 2012].
- Для оценки содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое внутренних водоемов используются как региональные модели так и океанические, построенные на основе исследования поверхностных вод морей и океанов. Эти модели в основном, используют данные спутников серии Landsat, Sentinel-2 и Sentinel-3, MODIS (Terra/Aqua), AVHRR, VIIRS(NPP) [Liu et al, 2024; Zhang et al, 2023; Karimi et al, 2024; Болданова Е.В. et al, 2022; Markogianni et al, 2020; Jianga et al, 2020 ; Wagle et al, 2019; Chavula et al, 2012; Drozd et al, 2014; Vazyulya et al, 2014; Bocharov et al, 2017; Ruiz-Verdú et al, 2016, El-Alem et al, 2012 и др.].

Данные судовых измерений*

Карта с расположением мест и указанием времени взятия биооптических проб в озере Байкал, используемых для валидации спутниковой продукции.



*Предоставлены Федеральным исследовательским центром «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

Региональные модели, использованные для оценки содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое оз. Байкал

APPEI (APProach by Elimination(*El-Alem et al, 2012*))

$$SL=B2-[(B1-B2)+(B3-B2)*B2],$$

$$\text{Chl}_a=4.4614*\text{Exp}(30.648*SL)$$

Kahru (*Kahru et al, 2004*)

$$SL=B2-B1,$$

$$\text{Chl}_a=9.7113*\text{Exp}(70.213*SL)$$

FAI (Floating Algae Index(*Hu et al, 2010*))

$$SL=B2-[B1+(B5-B1)*((859-645)/(1240-645))]$$

$$\text{Chl}_a=12.237*\text{Exp}(110.89*SL)$$

Gitelson (Floating Algae Index(*Gitelson, 2005*))

$$SL=[1/B1 - 1/(B3 + (B3 - B1)/(B4 - B1))] * B2$$

$$\text{Chl}_a=1.3633*\text{Exp}(1.9654*SL)$$

Данные MODIS
(разрешение 500м)

Канал	Длина волны (нм)
B1	620-670
B2	841-876
B3	459-479
B4	545-565
B5	1230-1250
B6	1628-1652
B7	2105-2155

Результаты валидации значений хлорофилла «а», полученных на основе представленных моделей, с использованием судовых измерений показали необходимость адаптации этих моделей к биооптическим особенностям водных масс оз. Байкал.

Алгоритмы и продукты, использованные для оценки значений содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое оз. Байкал по данным MODIS (Terra/Aqua)

Трехканальный алгоритм OC3 (Ocean Color Chlorophyll) [O'Reilly et al, 2019] :

$$\text{Log}_{10}(\text{Chl}_a) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4$$

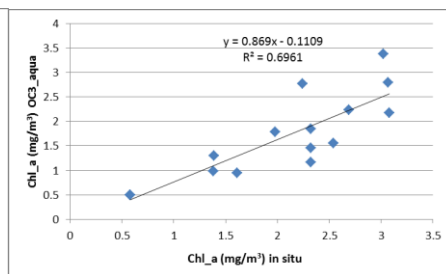
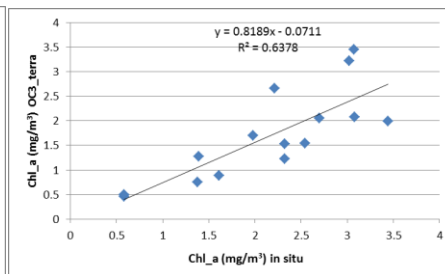
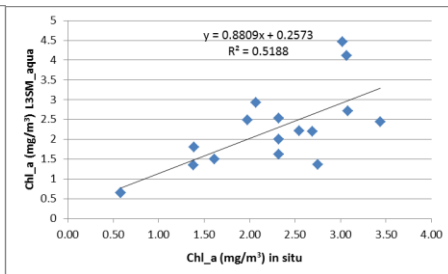
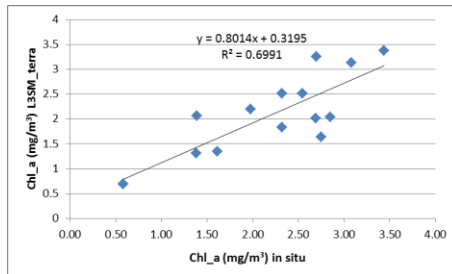
$$X = \log_{10} \left(\frac{\max(Rrs_{442}, Rrs_{488})}{Rrs_{554}} \right)$$

$$a_0 = 0.26294, a_1 = -2.64669, a_2 = 1.28364, a_3 = 1.08209, a_4 = -1.76828$$

$Rrs_{442}, Rrs_{488}, Rrs_{554}$ – значения спектральных яркостей в каналах MODIS с длинами волн 442, 488 и 554 нм

Продукт L3SMI (разрешение 4616 м) предоставляется Геологической службой США (USGS). Этот продукт генерируется с помощью алгоритма, представляющего собой комбинацию трехканальной модели OC3 [O'Reilly et al, 2019] и трехканального алгоритма, описанного в работе [Hu et al, 2019].

Результаты валидации продукта L3SMI и трехканального алгоритма ОСЗ на основе данных судовых измерений оз. Байкал (24-31 июля 2018 г. и 3-11 сентября 2019 г.)



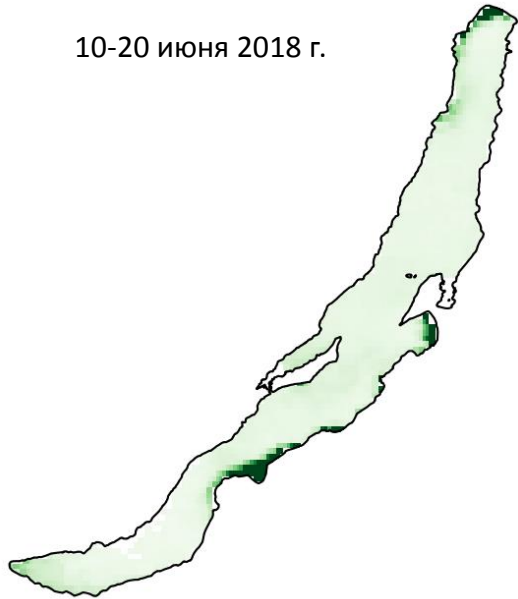
	R^2	MAE	Bias
L3SMI(Terra)	0.70	1.24	0.99
L3SMI(Aqua)	0.52	1.20	0.97
OC3(Terra)	0.64	1.39	0.75
OC3(Aqua)	0.70	1.32	0.79

$$MAE = 10^{\left(\frac{\sum_{i=1}^n \left| \log_{10}(\text{satellite}) - \log_{10}(\text{in situ}) \right|}{n} \right)}$$

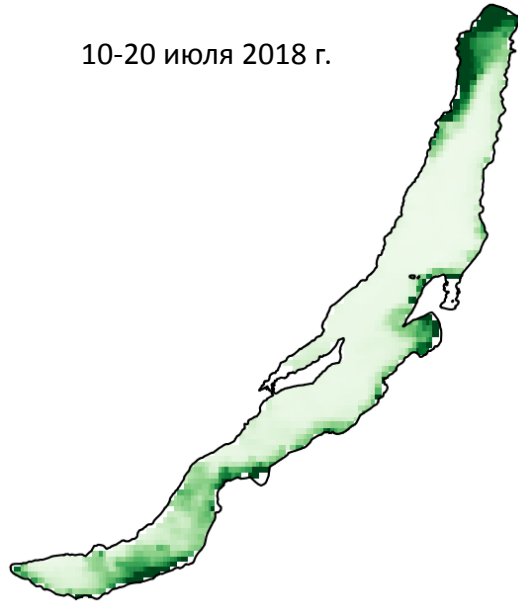
$$Bias = 10^{\left(\frac{\sum_{i=1}^n \log_{10}(\text{satellite}) - \sum_{i=1}^n \log_{10}(\text{in situ})}{n} \right)}$$

Примеры пространственного распределения средних значений хлорофилла «а» в поверхностном слое оз. Байкал по данным MODIS (алгоритм OC3), в мг/ м3

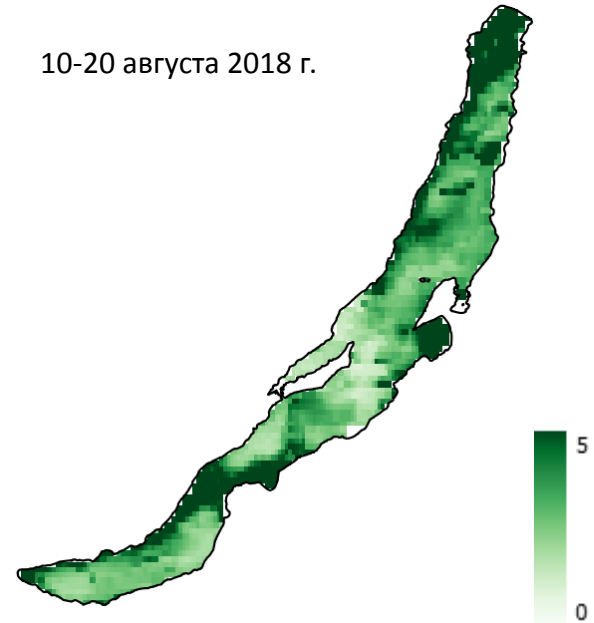
10-20 июня 2018 г.



10-20 июля 2018 г.



10-20 августа 2018 г.



Основные результаты работы

- Выполнен сравнительный анализ известных региональных моделей (APPEL, FAI, Kahru и Gitelson) оценки концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое водоемов на основе спутниковых данных и проведена их верификация на основе экспедиционных данных для акватории оз. Байкал.
- Проведена валидация продукта L3SMI, полученного на основе данных MODIS/(Terra+Aqua). Реализована трехканальная модель ОСЗ, которая позволила улучшить показатели продукта L3SMI. Проведен статистический анализ и получены значения основных статистических показателей (R^2 , MAE, Bias).
- Результаты статистического анализа позволяют сделать вывод о приемлемости модели ОСЗ для анализа пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое озера Байкал. В ближайшее время планируется верификация 4-, 5-, 6-канальных версий ОС-алгоритма.