

# О возможности спутникового мониторинга цветения цианобактерий в Балтийском море с использованием эмпирических ортогональных функций

Г.С. Моисеенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия, Профсоюзная ул. 84/32, E-mail: georgiy-moiseenko@yandex.ru

## Введение

В верхнем слое воды Балтийского моря в летний период регулярно наблюдается интенсивное цветение цианобактерий (Kahru et al, 2007). Некоторые виды цианобактерий выделяют токсины, которые представляют потенциальную опасность для здоровья человека. Поэтому вопросам мониторинга биомассы цианобактерий в последнее время уделяется большое внимание. Технологии спутникового мониторинга широко используются для оценок концентрации веществ в верхнем слое морской воды. Большинство из разработанных в настоящее время методов количественной оценки биомассы цианобактерий основаны на определении концентрации хлорофилла «а» и/или фикоцианина, пигмента, уникального для цианобактерий, или используются показатель рассеяния назад взвешенными частицами и концентрация хлорофилла (Копелевич и др, 2018). В алгоритмах оценки концентрации фикоцианина, как эмпирических, так и полуэмпирических, применяются различные комбинации коэффициентов яркости, рассчитанных по данным спутниковых спектрорадиометров (Shi et al, 2019). В некоторых работах (Wozniak et al, 2017) используются эмпирические ортогональные функции, рассчитанные на локальных наборах данных, для выявления связи характеристик фитопланктона с коэффициентами яркости, измеренными in situ. В представленной работе исследуется возможность мониторинга цветения цианобактерий в Балтийском море на основе оценок концентрации фикоцианина. В алгоритме оценки концентрации фикоцианина в верхнем слое морской воды применяются эмпирические ортогональные функции аналогично подходу, изложенному в (Моисеенко и др., 2020). Расчёт эмпирических ортогональных функций выполнен для массива спектров коэффициента яркости спектрорадиометра MERIS за 2011 год.

## Цель

Исследовать возможность мониторинга цветения цианобактерий в Балтийском море на основе оценок концентрации фикоцианина с использованием эмпирических ортогональных функций.

## Данные

В качестве исходных использовались данные спектрорадиометра MERIS уровня L2, 01.01.2011 – 31.12.2011, <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>. Из файлов данных экспортировались значения коэффициентов яркости для девяти длин волн (413 nm, 443 nm, 490 nm, 510 nm, 560 nm, 620 nm, 665 nm, 681 nm, 709 nm).

## Метод

Основные соотношения:

$R_k = \{R_k(\lambda_1), \dots, R_k(\lambda_r)\}$  – спектры коэффициентов яркости

$r = 9$  – количество длин волн

$\hat{R}_k = \{R_k(\lambda_1) - \bar{R}_k(\lambda_1), \dots, R_k(\lambda_r) - \bar{R}_k(\lambda_r)\}$  – вычитание среднего вектора

$P$  – матрица данных,  $n$  строк,  $r$  столбцов

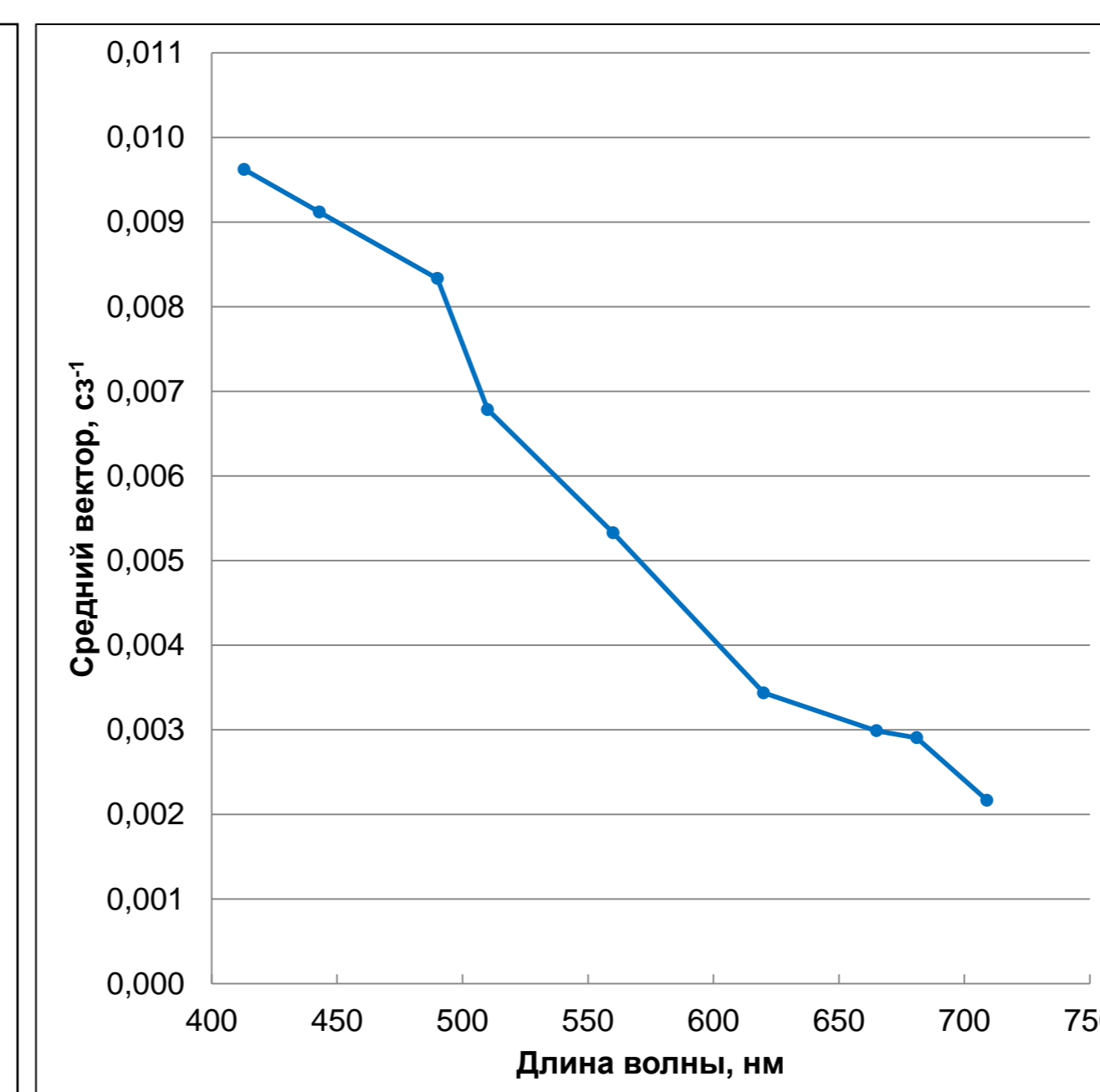
$K = P^T P / (n-1)$  – ковариационная матрица

$Kx = \mu x$  уравнение для собственных чисел и собственных векторов

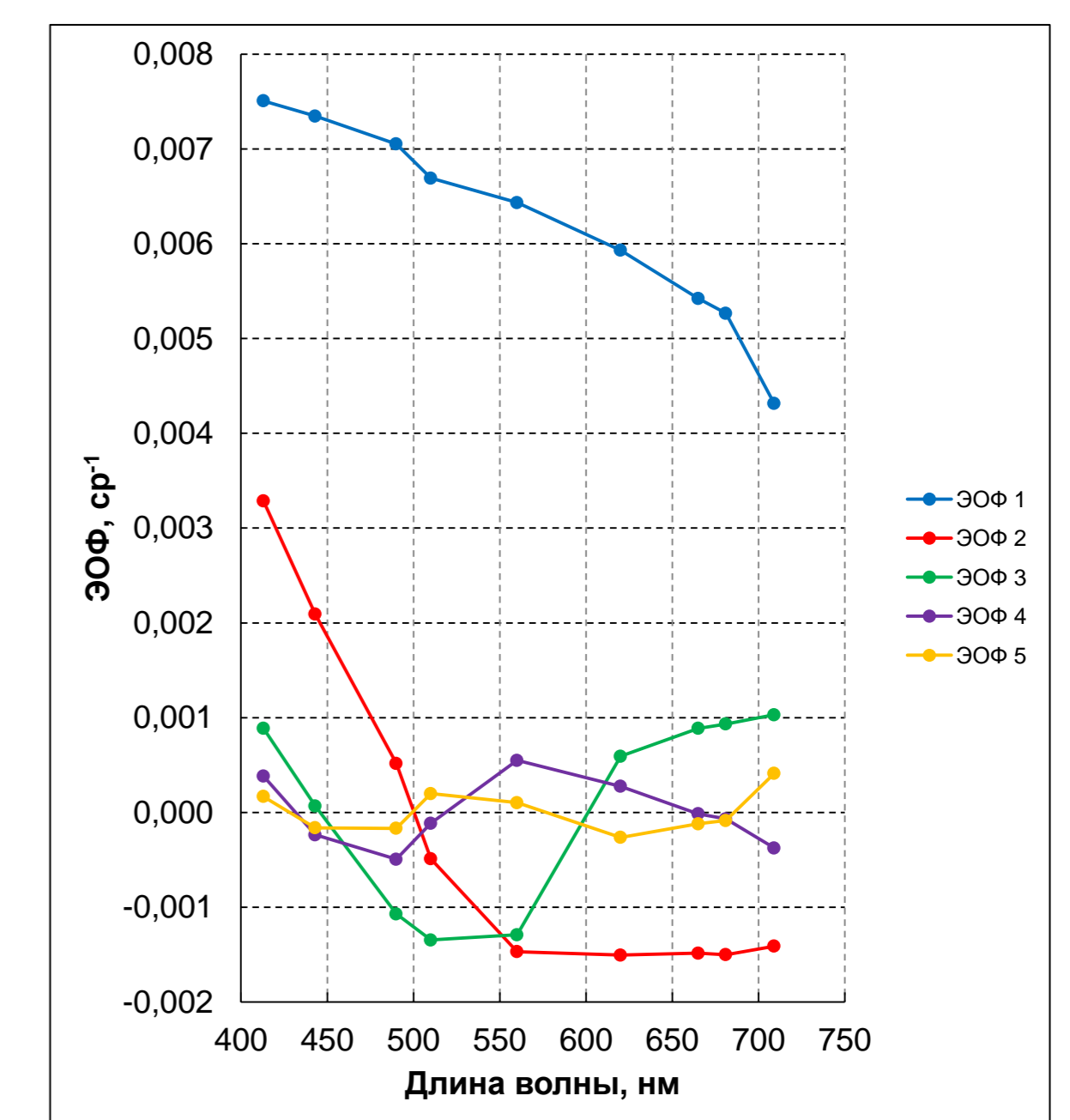
$x_i, x_i = \mu_i^2$  нормированные собственные векторы – эмпирические ортогональные функции

$\hat{R}_k = \sum_{i=1}^p c_{ki} x_i$  – разложение спектров в ряд используя эмпирические ортогональные функции в качестве базиса,  $p \leq r$ , и это разложение оптимально с точки зрения минимума среднеквадратического отклонения.

Использовалось уравнение линейной регрессии для оценки концентрации фикоцианина по значениям коэффициентов разложения. В качестве обучающей выборки для получения коэффициентов регрессии применялись результаты расчётов оценок концентрации фикоцианина по модели  $PC_{OLCI}$  (Wozniak et al, 2016).



Средний вектор

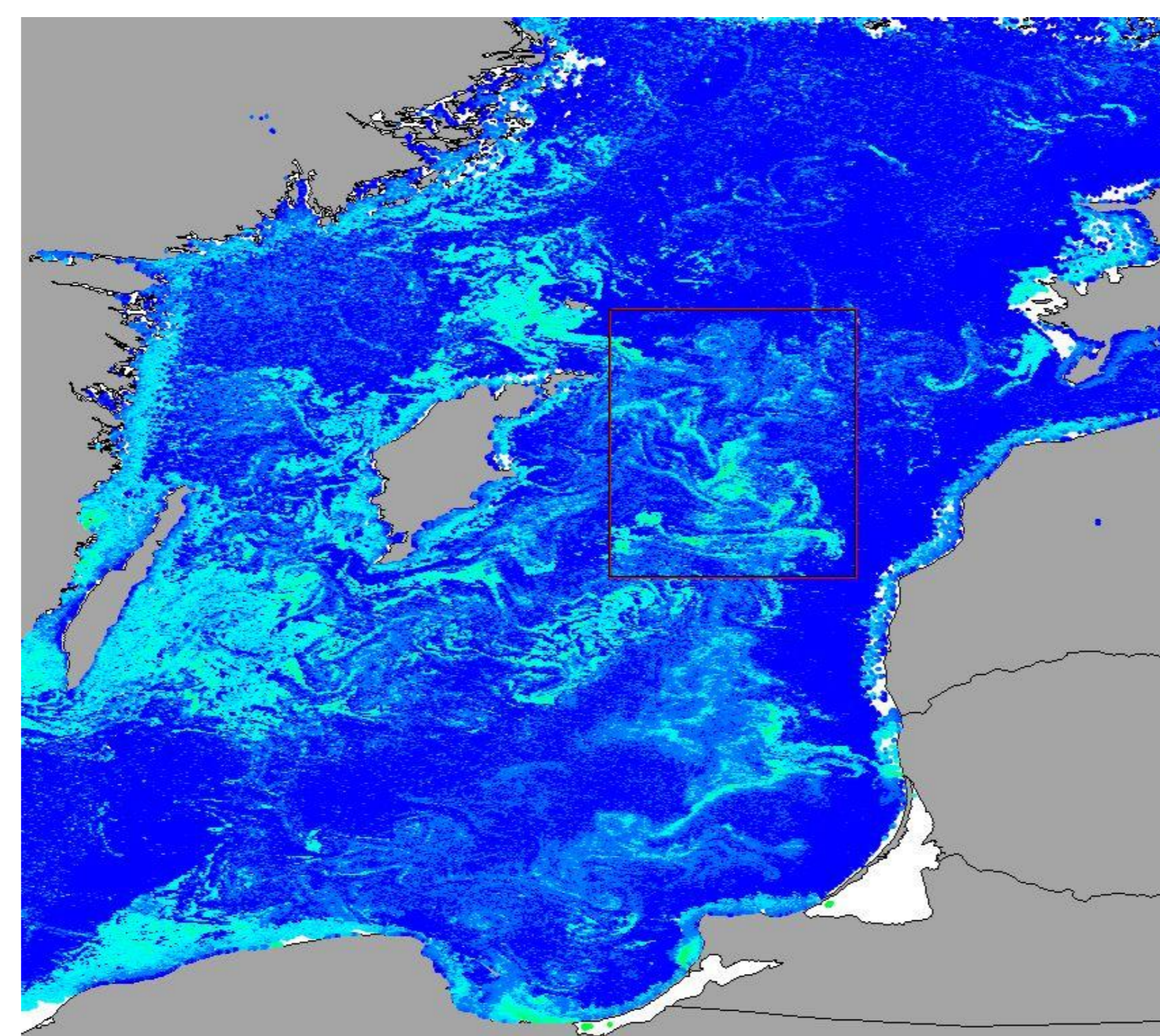


Первые пять эмпирических ортогональных функций

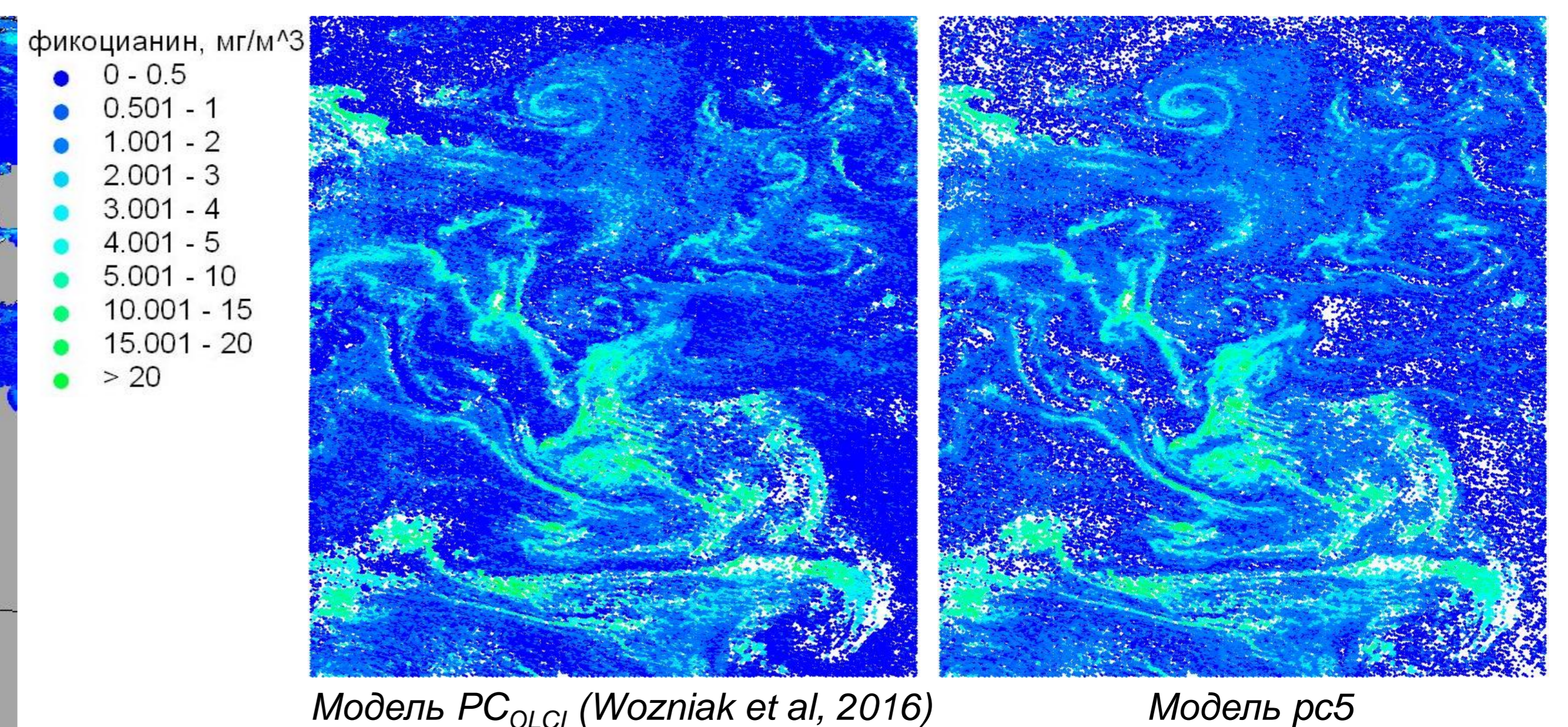
## Результаты



Цветение цианобактерий в Балтийском море 6 августа 2004 г. (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)

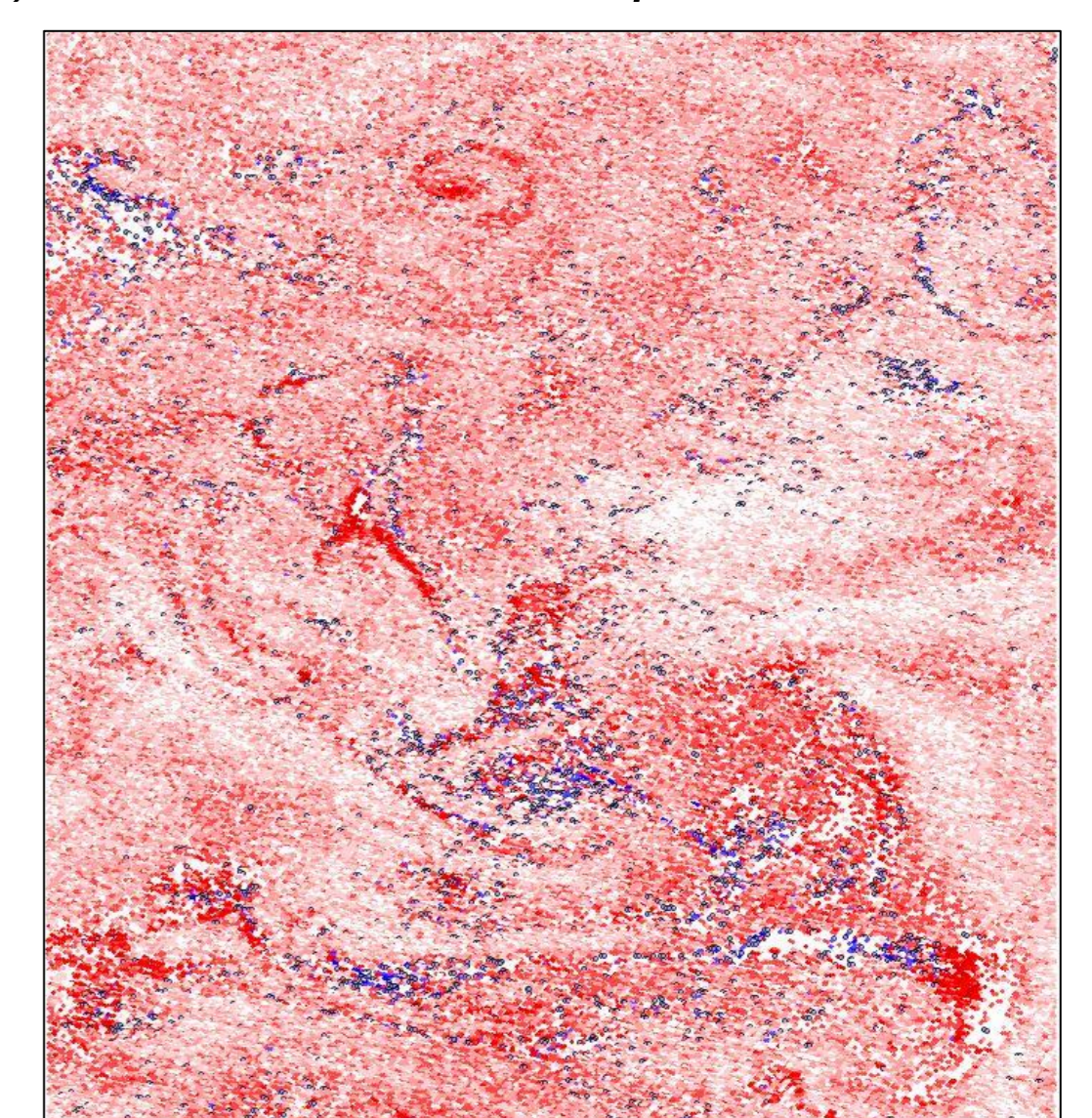


Пространственное распределение фикоцианина 6 августа 2004 г. по данным (Wozniak et al, 2016).



Модель  $PC_{OLCI}$  (Wozniak et al, 2016)

Модель  $pc5$



Распределение разности  $pc5 - PC_{OLCI}$

фикоцианин,  $mg/m^3$

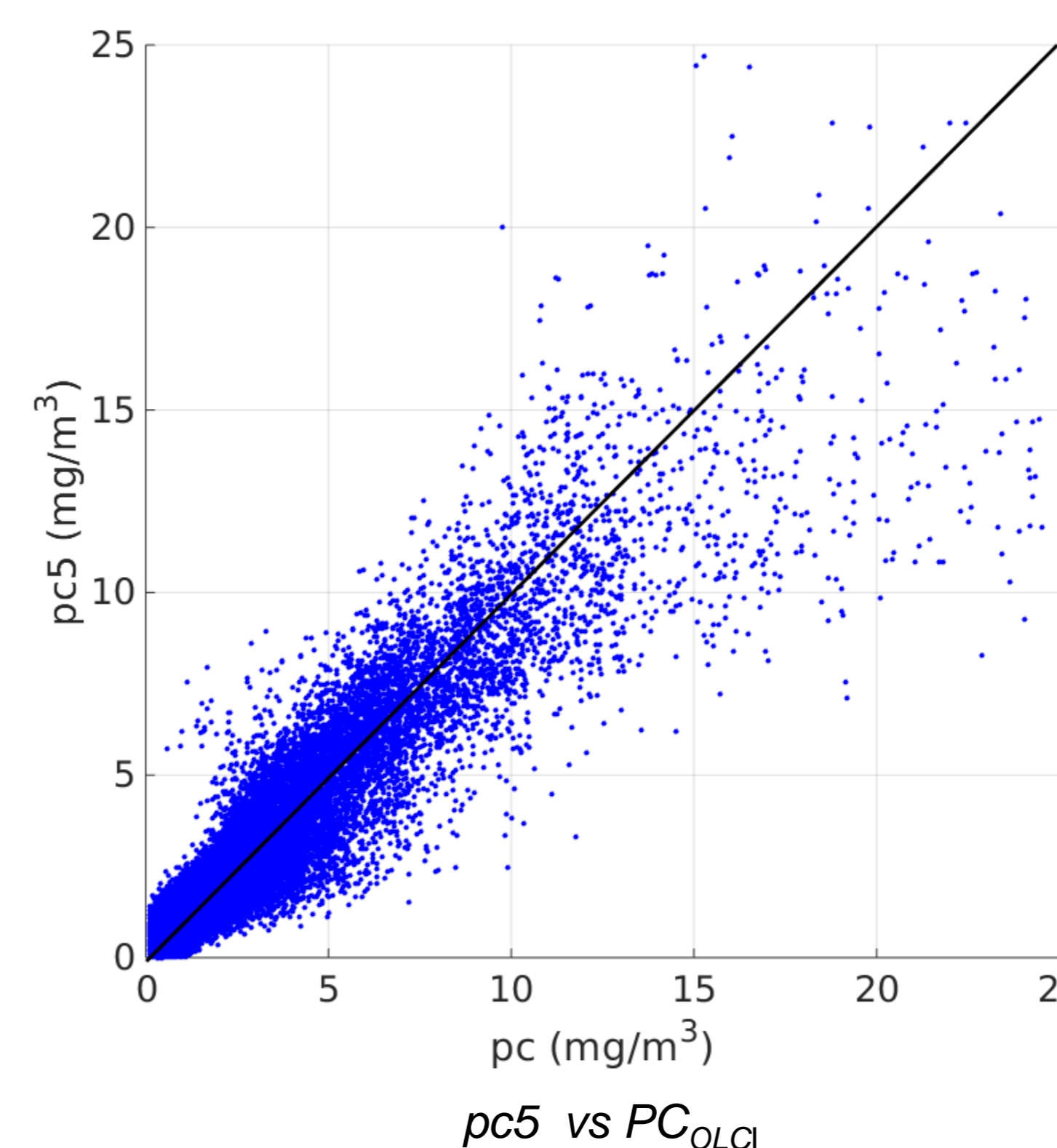
- 24.834 - -12.068
- 12.068 - -5.553
- 5.553 - -2.48
- 2.48 - -1.053
- 1.053 - -0.371
- 0.371 - -0.01
- 0.01 - 0.333
- 0.333 - 0.879
- 0.879 - 2.27
- 2.27 - 10.24

С помощью обучающей выборки получено уравнение регрессии, связывающее концентрацию фикоцианина (в  $mg/m^3$ ) в верхнем слое морской воды с коэффициентами разложения спектров коэффициента яркости излучения в ряд по эмпирическим ортогональным функциям:

$$pc5 = 3.69 + 9.66 \cdot c_1 - 6.0 \cdot c_2 + 4.34 \cdot c_3 - 3.51 \cdot c_4 + 2.95 \cdot c_5;$$

$$R^2 = 0.877, \quad RMSE = 0.665 \text{ (} mg/m^3 \text{)}, \quad N = 131611.$$

Для выделенной прямоугольной акватории в средней части Балтийского моря проведена оценка качества линейной модели. Следует отметить хорошее качественное совпадение результатов. Вместе с тем, в области больших концентраций наблюдается возрастание разброса значений между моделями  $pc5$  и  $PC_{OLCI}$ , что требует дополнительного исследования.



$pc5$  vs  $PC_{OLCI}$

## Заключение

С удовлетворительной точностью предложенная линейная модель оценки концентрации фикоцианина может применяться для мониторинга цветения цианобактерий в Балтийском море. Повышение точности модели требует дополнительного исследования.

### Признавательность

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) Ocean Color Data; 2012 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: data/10.5067/ENVISAT/MERIS/L2/OC/2012.

### Литература

- Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // Marine Ecology Progress Series. 2007. V. 343. P. 15-23
- Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. 140 с.
- Shi K., Zhang Y., Qin B., Zhou B. Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: present knowledge and future challenges // Science Bulletin. 2019. V. 64. P. 1540-1556.
- Wozniak M., Craig S.E., Kratzer S., Wojtasiewicz B., Darecki M., Jones C.T. A novel statistical approach for ocean colour estimation of inherent optical properties and cyanobacteria abundance in optically complex waters // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 4. P. 343-365.
- Моисеенко Г.С., Левашов С.Д. Применение эмпирических ортогональных функций при спутниковом мониторинге верхнего слоя морской воды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 42-49. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-42-49.
- Wozniak M., Bradtke K.M., Darecki M., and Krężel A. // Empirical Model for Phycocyanin Concentration Estimation as an Indicator of Cyanobacterial Bloom in the Optically Complex Coastal Waters of the Baltic Sea // Remote Sensing. 2016. V. 8. 212; doi:10.3390/rs8030212.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема "Мониторинг", госрегистрация № 01.20.0.2.00164).