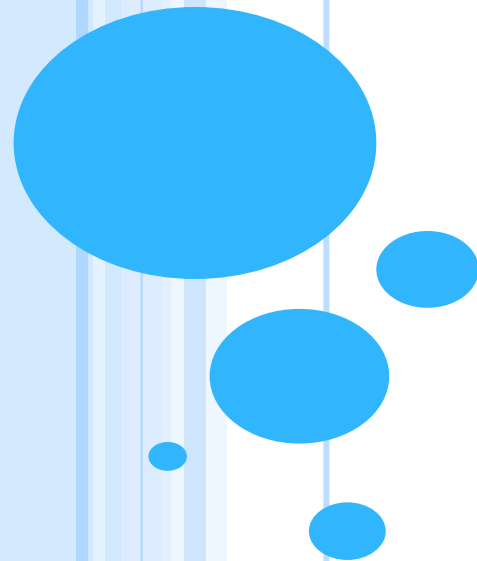


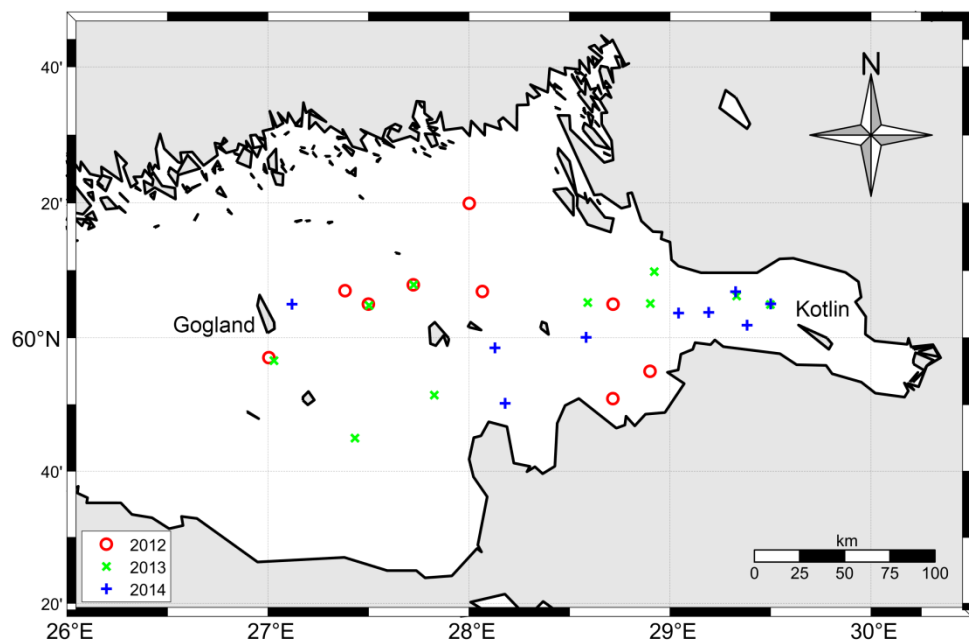
**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЦВЕТЕНИЯ ЦИАНОБАКТЕРИЙ В ВОСТОЧНОЙ  
ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В 2003-2022 ГГ. ПО ДАННЫМ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**ВАЗЮЛЯ С.В., САЛИНГ И.В.,  
ЛАНГЕ Е.К., ГЛУХОВЕЦ Д.И.**

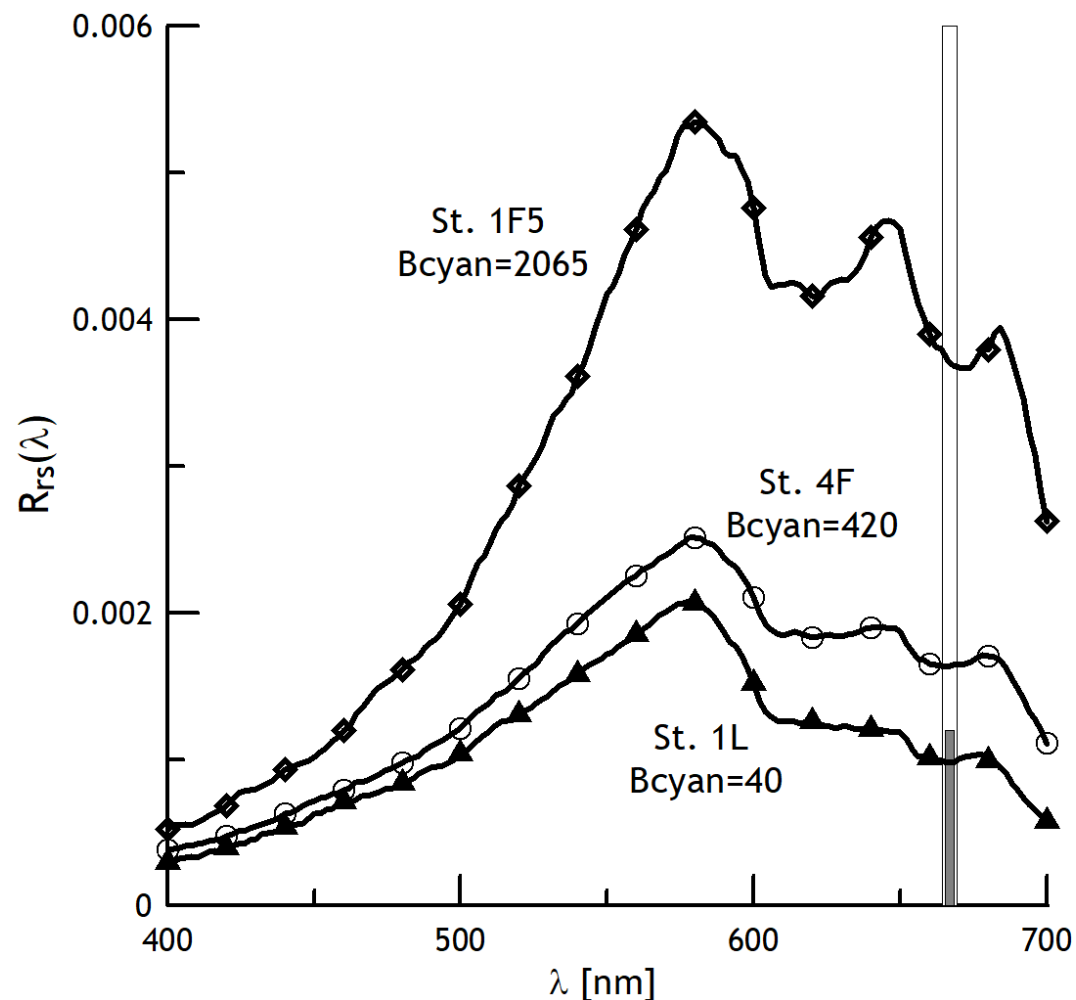


## ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ РЕГИОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА

- ПОЛУЧЕНЫ В ХОДЕ ЛЕТНИХ ЭКСПЕДИЦИЙ (КОНЕЦ ИЮЛЯ–НАЧАЛО АВГУСТА) НА ЯХТЕ CENTAURUS II В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В 2012–2014 ГГ.
- БЫЛИ ИСПОЛЬЗОВАНЫ ДАННЫЕ ДЛЯ 28 СТАНЦИЙ ДЛЯ КОТОРЫХ БИОМАССА ЦИАНОБАКТЕРИЙ ВСУАН ПРЕВЫШАЛА 20 МГ/М<sup>3</sup>.



РАСПОЛОЖЕНИЕ СТАНЦИЙ



ПРИМЕРЫ СПЕКТРОВ  $R_{RS}(\lambda)$ , ИЗМЕРЕННЫХ IN SITU В 2014 Г. СЕРЫЙ СТОЛБИК ПОКАЗЫВАЕТ ПОРОГОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ  $R_{RS}(667)$  ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТЕНИЯ ЦИАНОБАКТЕРИЙ ПО АЛГОРИТМУ (КАНРУ AND ELMGREN, 2014).

# СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ВСУАН

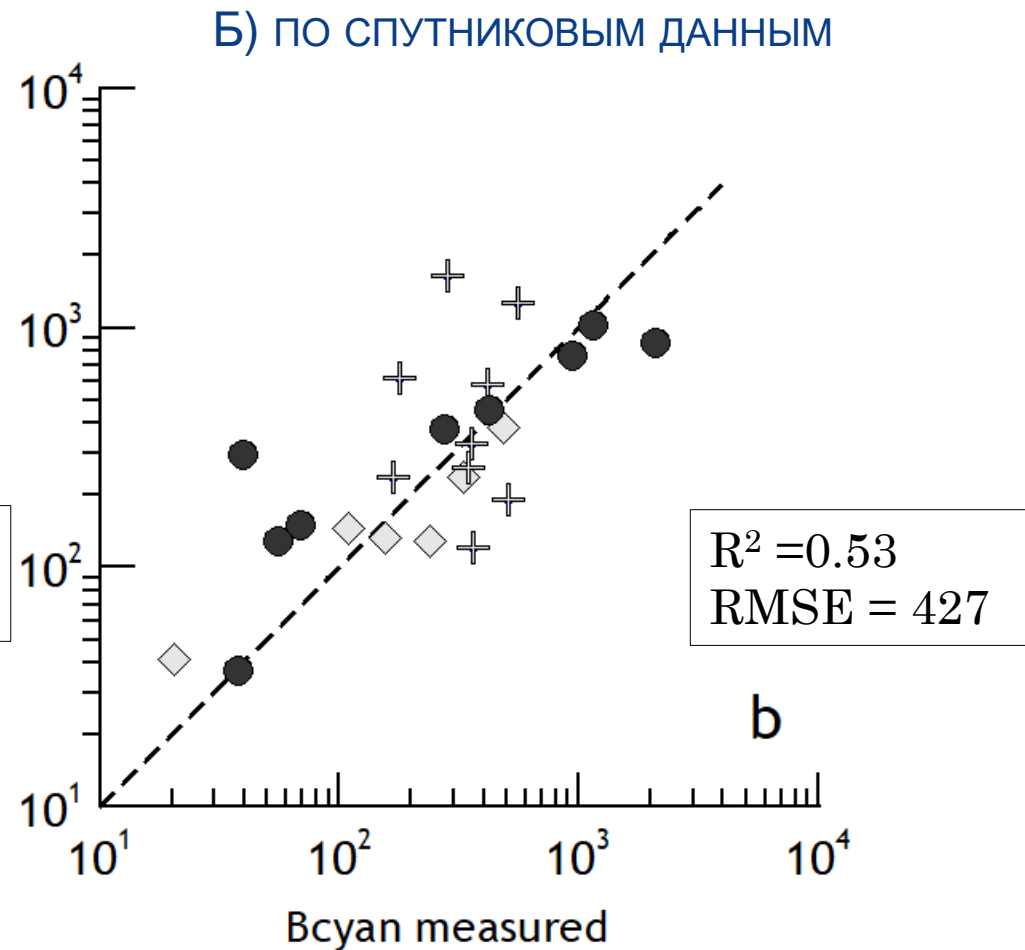
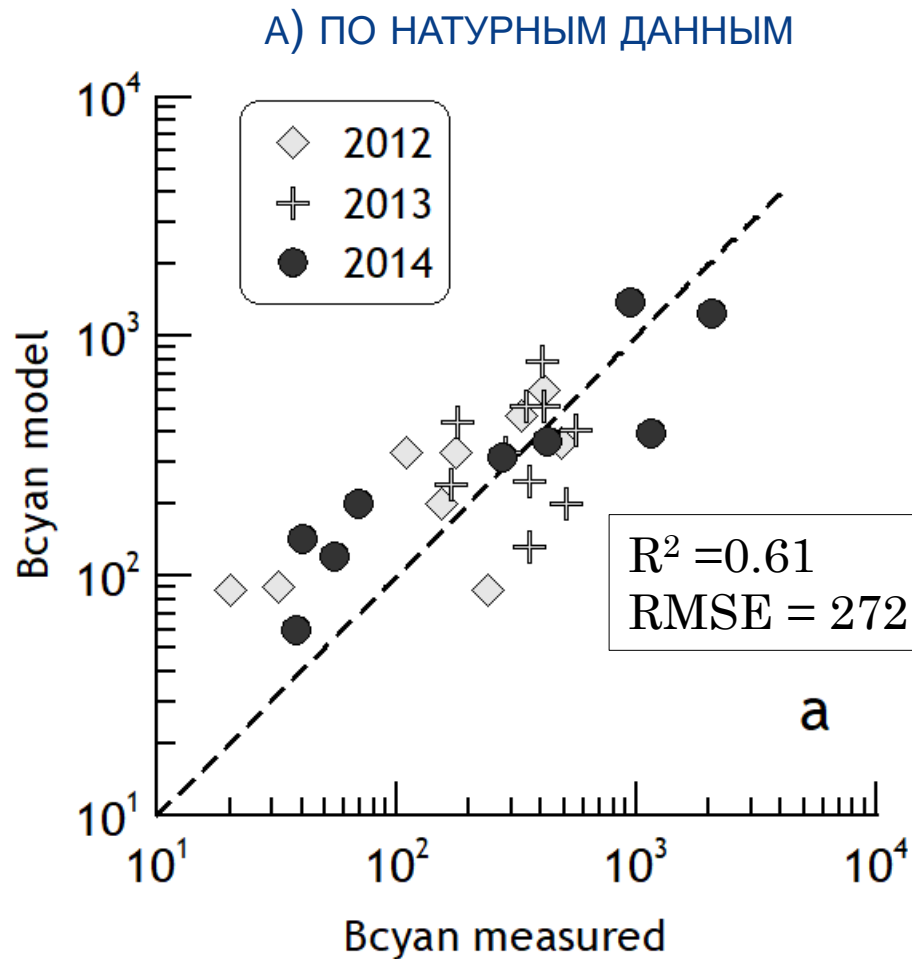
Algorithm	R <sup>2</sup>	RMSE [mg m <sup>-3</sup> ]	CV [%]	Ratio	MPD [%]
<b>Всуан = 64.6 b<sub>bp</sub> 10<sup>3</sup> - 263</b>	0.55	282	75	1.51	60
<b>Всуан = 92 Chl + 6</b>	0.50	304	81	1.12	52
<b>Multi-regression: Всуан = 45 b<sub>bp</sub> 10<sup>3</sup> +38.5 Chl - 227</b>	0.61	272	72	1.42	54

Коэффициент вариации  $CV = 100\% \cdot RMSE / \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^{meas} \right)$

Ratio = median  $\left( \frac{y_i^{mod}}{y_i^{meas}} \right)$ ,

MPD = median  $\left( 100\% \cdot \left| \frac{y_i^{mod} - y_i^{meas}}{y_i^{meas}} \right| \right)$



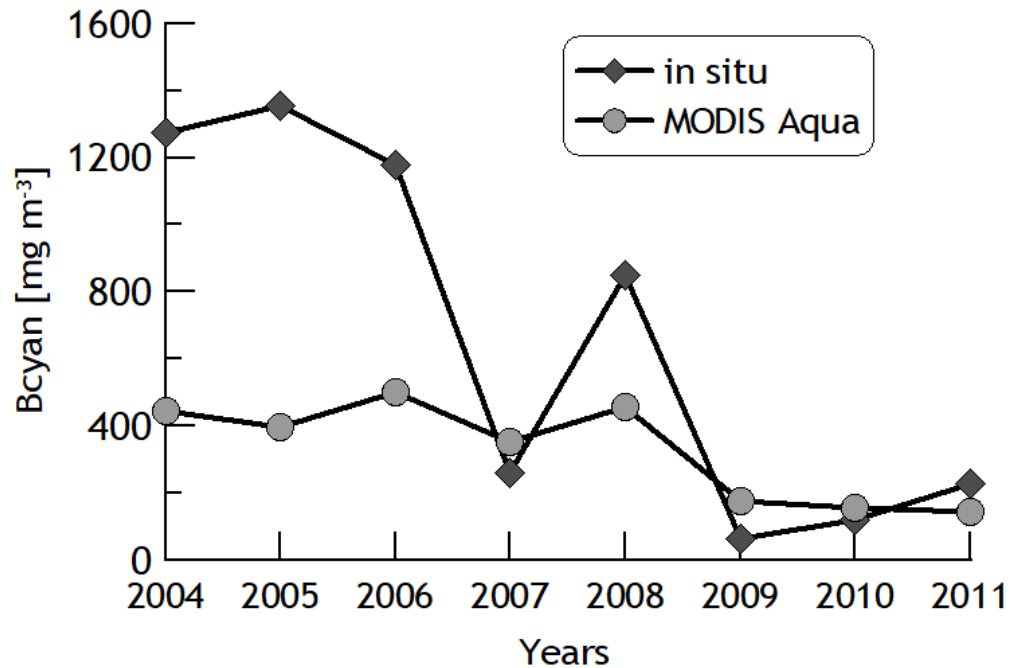


СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ВСУАН (МГ/М<sup>3</sup>), РАССЧИТАННЫХ (ВСУАН MODEL) И ИЗМЕРЕННЫХ (ВСУАН MEASURED) В 2012-2014 ГГ. ПУНКТИРНАЯ ЛИНИЯ - ИДЕАЛЬНОЕ СООТВЕТСТВИЕ.

А: Ratio = **1.4** (28 ст.), **0.9** (17 ст. Всуан > 200 mg m<sup>-3</sup>), **2.4** (остальные 11 ст.)  
 Б: Ratio = **0.87** (24 ст.), **0.75** (15 ст. Всуан > 200 mg m<sup>-3</sup>), **2.1** (остальные 9 ст.)



# ВАЛИДАЦИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ВСУАН ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

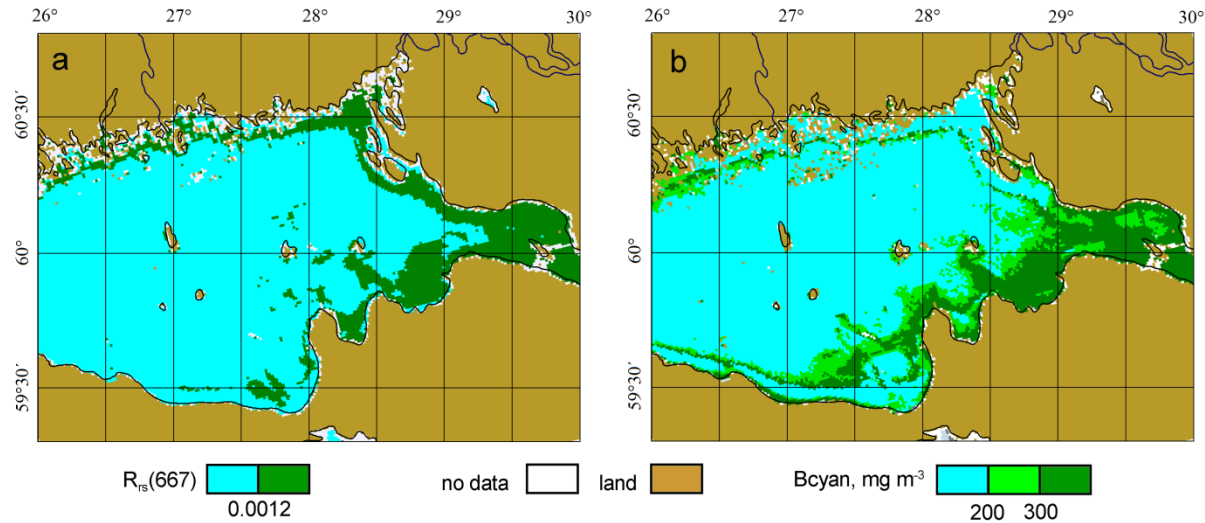


СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ВСУАН (МГ/М<sup>3</sup>) ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS-AQUA И ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАХИМОВ ET AL. (2014).

- ОЦЕНКИ ПО ДАННЫМ MODIS-AQUA УСРЕДНЯЛИСЬ ЗА ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕДИЦИИ (~ НЕДЕЛЯ), РЕГИОН ДЛЯ РАСЧЕТА СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ВСУАН БЫЛ УМЕНЬШЕН
- НАТУРНЫЕ ДАННЫЕ - УСРЕДНЕНИЕ ПО ПРИМЕРНО 20 СТАНЦИЯМ, ПРИ ОБРАБОТКЕ СПУТНИКОВЫХ УЧИТЫВАЕТСЯ ~2000 ПИКСЕЛЕЙ.
- УМЕНЬШЕНИЕ БИОМАССЫ СИНЕ-ЗЕЛЕННЫХ В 2009-2011 ГГ., ПО СРАВНЕНИЮ С 2004-2007 ГГ. СВЯЗАНО С ВСЕЛЕНИЕМ ПОЛИХЕТ MARENZELLERIA ARCTIA



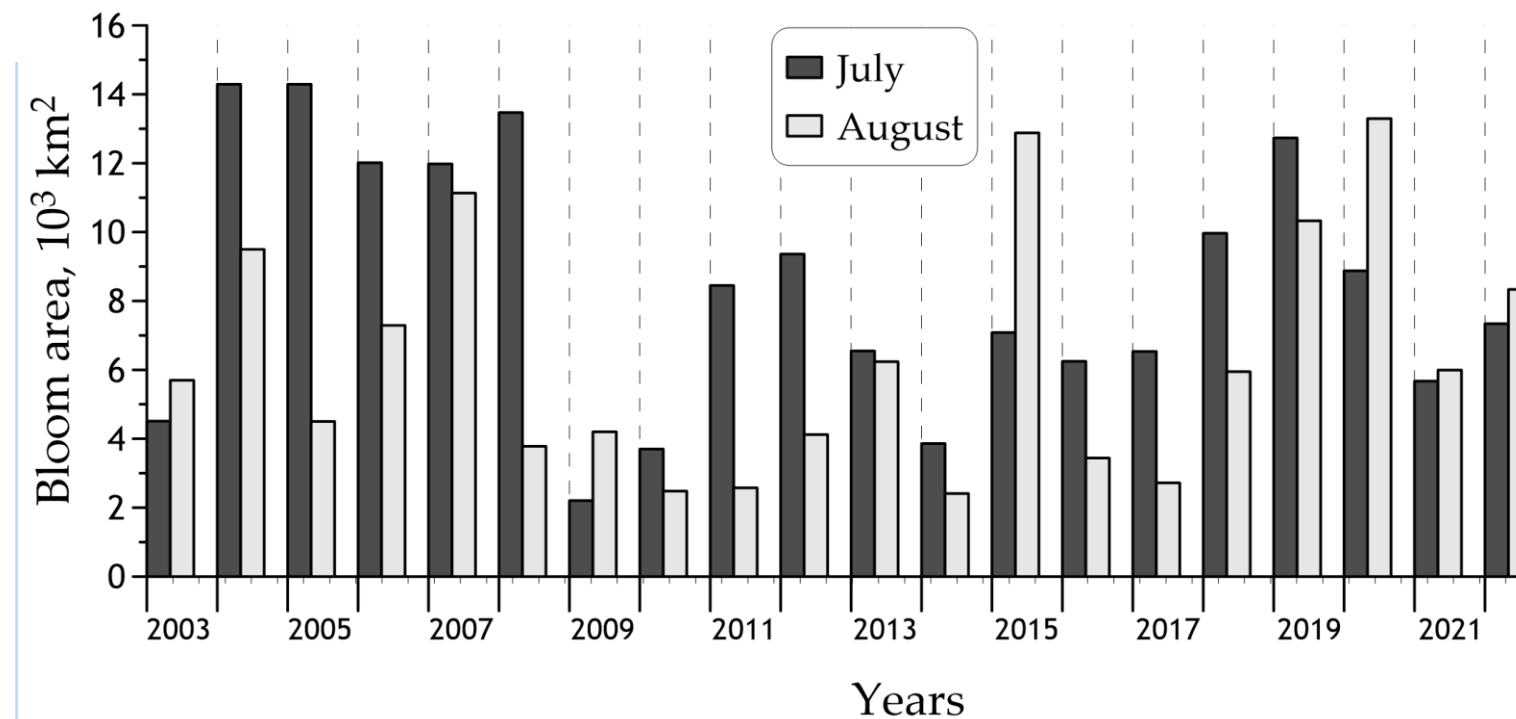
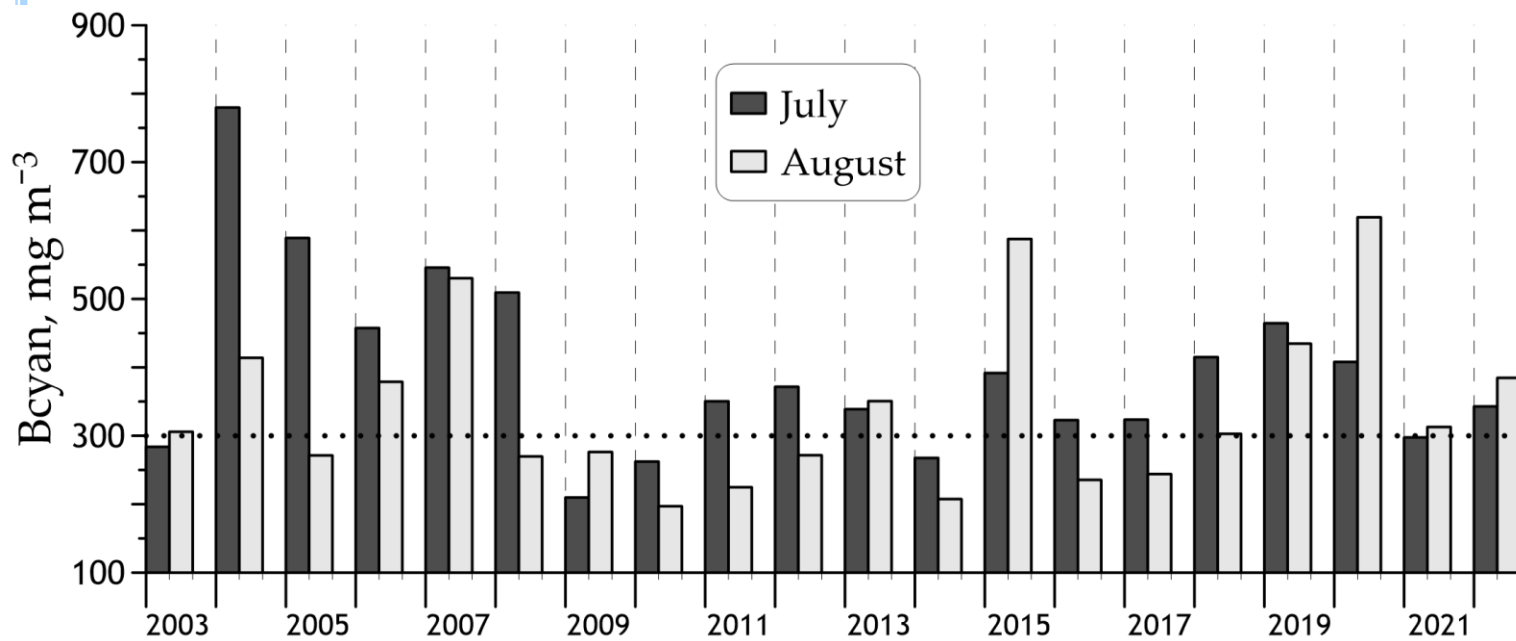
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ ВСУАН



СОПОСТАВЛЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ЦВЕТЕНИЯ 25 ИЮЛЯ 2014 Г.  
СОГЛАСНО АЛГОРИТМАМ КАНРУ (А) И ВЕЛИЧИНЕ ВСУАН (В).

- СОГЛАСНО БИОЛОГАМ ПОРОГОВАЯ ВЕЛИЧИНА ЦВЕТЕНИЯ ЦИАНОБАКТЕРИЙ ВСУАН = 200 МГ/М<sup>3</sup> (WASMUND, 1997).
- СОГЛАСНО АЛГОРИТМУ КАНРУ В СЛУЧАЕ MODIS-AQUA ПИКсель СЧИТАЕТСЯ «ЦВЕТУЩИМ» ЕСЛИ  $R_{rs}(667) > 0.0012$
- ЕСЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ВСУАН=200 МГ/М<sup>3</sup>, ТО ПЛОЩАДЬ ЦВЕТЕНИЯ ПО НАШЕМУ АЛГОРИТМУ **4380** КМ<sup>2</sup>, А ПО АЛГОРИТМУ КАНРУ **2574** КМ<sup>2</sup>
- ЕСЛИ СДВИНУТЬ ГРАНИЦУ ЦВЕТЕНИЯ К ВСУАН = 300 МГ/М<sup>3</sup>, ТО ПЛОЩАДЬ ЦВЕТЕНИЯ БУДЕТ **2579** КМ<sup>2</sup>
- В ДАЛЬНЕЙШЕМ ВСУАН = 300 МГ/М<sup>3</sup> МЫ ИСПОЛЬЗОВАЛИ, КАК ПОРОГОВОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТЕНИЯ ЦИАНОБАКТЕРИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ.

## МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦВЕТЕНИЯ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

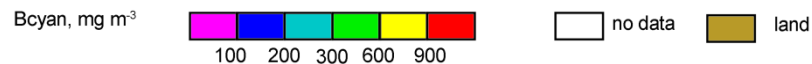
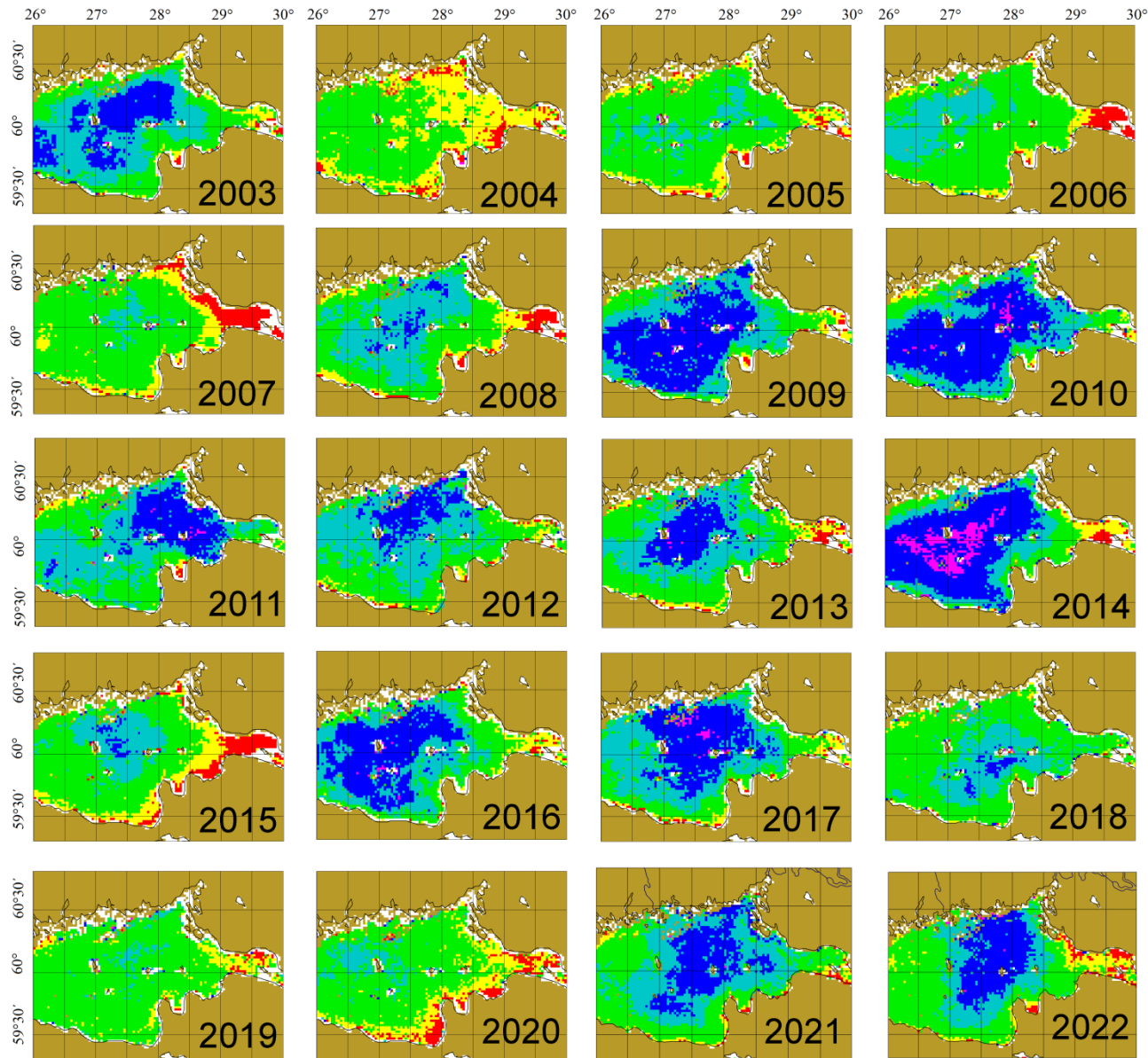


- ПРАКТИЧЕСКИ ВО ВСЕ ГОДЫ, ВЕЛИЧИНА ВСУАН И ПЛОЩАДЬ ЦВЕТЕНИЯ В ИЮЛЕ БЫЛА БОЛЬШЕ, ЧЕМ В АВГУСТЕ
- РЕКОРДНОЕ ЦВЕТЕНИЕ ЗА РАССМАТРИВАЕМЫЙ ПЕРИОД НАБЛЮДАЛОСЬ В ИЮЛЕ 2004 Г.  $\langle \text{ВСУАН} \rangle = 780 \text{ мг/м}^3$
- В ИЮЛЕ 2004, 2005 И 2008 Г. ОБЛАСТЬ ЦВЕТЕНИЯ ЗАНИМАЛА БОЛЕЕ 90%, В АВГУСТЕ 2015 И 2020 – 89 И 92%.
- МИНИМАЛЬНЫЕ ЦВЕТЕНИЯ В 2009, 2010 И 2014 Г. (МЕНЕЕ 30%).

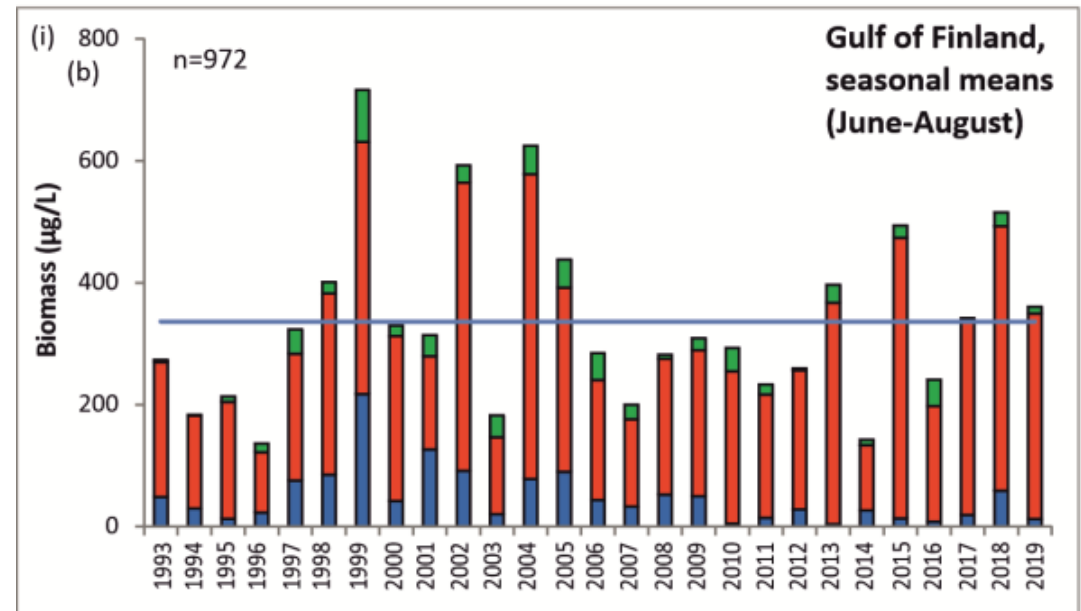




# СРЕДНЕСЕЗОННЫЕ (ИЮЛЬ-АВГУСТ) РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВСУАН В 2003–2022 ГГ.



## HELCOM BALTIC SEA ENVIRONMENT FACT SHEET 2020 (KOWNACKA ET AL., 2020)



- МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВСУАН НАБЛЮДАЛИСЬ В 2004, 2015, 2018
- 2004:  $\langle \text{ТСМ} \rangle = 598 \text{ мг/м}^3$  (ПО НАШИМ ОЦЕНКАМ),  $625 \text{ мг/м}^3$  (HELCOM)
- 2015:  $\langle \text{ТСМ} \rangle$  БЫЛА РАВНА 500 И 490  $\text{мг/м}^3$
- СРЕДНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТСМ ДЛЯ ПЕРИОДА 2003-2019: 368 И 330  $\text{мг/м}^3$ , ПО СПУТНИКОВЫМИ И НАТУРНЫМ ДАННЫМ СООТВЕТСТВЕННО



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Для исследования пространственной и временной изменчивости характеристик цветения цианобактерий в восточной части Финского залива на основе натуральных измерений в июле–августе 2012–2014 гг. был разработан региональный алгоритм оценки биомассы цианобактерий  $V_{cyan}$  по спутниковым данным (Vazyulya et al., 2023).
- Уравнение мульти-регрессии с величинами концентрации хлорофилла *a* и коэффициента рассеяния назад позволяет получить наилучшую корреляцию ( $R^2 = 0.61$ ) и наименьшие ошибки для определения  $V_{cyan}$  (RMSE = 272 мг м<sup>-3</sup>, медианная относительная ошибка 54%). Причем для станций с цветением цианобактерий относительные погрешности значительно меньше.
- Предложенный алгоритм позволяет определить как площадь цветения цианобактерий, так и его интенсивность. Принимая во внимание ошибки алгоритма, пороговое значение для обнаружения цветения было сдвинуто с значения 200 мг м<sup>-3</sup>, определенного биологами (Wasmund, 1997), на значение 300 мг м<sup>-3</sup>.
- Данные MODIS-Aqua о цвете океана позволили проанализировать пространственную и временную изменчивость цветения цианобактерий с 2003 по 2022 годы.
- Практически каждый год максимальные значения  $V_{cyan}$  (более 900 мг м<sup>-3</sup>) встречаются в устье Невы, в Капорском и Лужском заливах. В центральной части исследуемого региона наблюдается значительный разброс  $V_{cyan}$  от года к году: от минимальных значений в 2014 году до максимальных в 2004 году.
- Рекордное цветение наблюдалось в 2004 году:  $\langle V_{cyan} \rangle = 598$  мг м<sup>-3</sup>; 100% площади занято цветением; 43% - интенсивным цветением с  $V_{cyan} > 600$  мг м<sup>-3</sup>.
- Межгодовая изменчивость средней биомассы цианобактерий в регионе хорошо согласуется с измерениями *in situ* в Финском заливе (Kownacka et al., 2020), проведенными в рамках программы HELCOM COMBINE.
- Полученные результаты и алгоритм более подробно представлены в статье (Vazyulya et al., 2023), бесплатно доступной по адресу: <https://doi.org/10.3390/jmse11091746>



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Измерения плавающим спектрометриком в условиях цветения цианобактерий в Финском заливе

