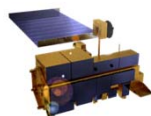


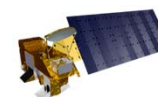


Министерство науки и высшего образования РФ  
Российская академия наук

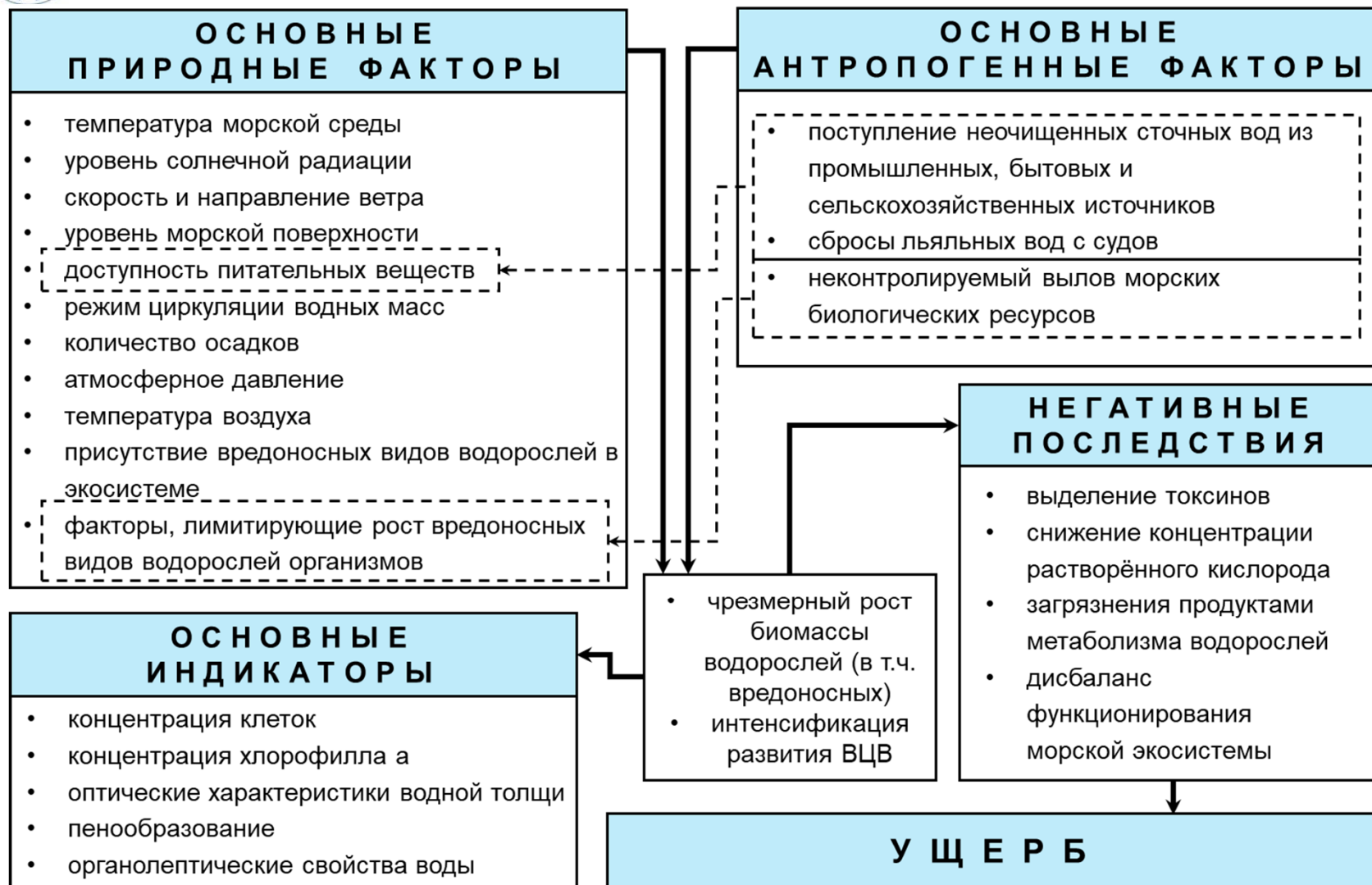
Научно-исследовательский институт аэрокосмического  
мониторинга «АЭРОКОСМОС»



**Исследование условий развития и оценка рисков  
интенсивных вредоносных цветений водорослей  
по длительным временным рядам  
спутниковых и модельных данных**



**Замшин В.В., Бондур В.Г., Четркова О.И.**



**Обобщенная схема основных факторов, индикаторов и негативных последствий вредоносного цветения водорослей (ВЦВ)**



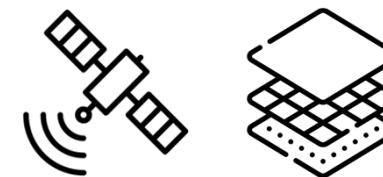
Интерес для исследования представляли как **потенциальные факторы развития ВЦВ** (температура воды, уровень фотосинтетически активной радиации, скорость и направление приповерхностного ветра и пр.), так и **индикаторы интенсивности протекания ВЦВ** (концентрация хлорофилла-а, оптические характеристики водной толщи и пр.).

**На основании этого в качестве исходных материалов были выбраны** длительные временные ряды (с момента начала наблюдений и до месяца регистраций исследуемых ВЦВ включительно) спутниковых и модельных данных следующих значимых параметров окружающей среды:

- температура морской поверхности (ТМП, модельные данные NOAA OISST (с 1981 г.));
- фотосинтетически активная радиация (ФАР, спутниковые данные AQUA/TERRA MODIS (с 2000 г.));
- концентрация хлорофилла-а (спутниковые данные AQUA/TERRA MODIS (с 2000 г.));
- солёность и высота морской поверхности (модельные данные HYCOM (с 1992 г.));
- скорость приповерхностного ветра (модельные данные NCEP CFSv2 (с 1979 г.)).

**Исследуемый тип взаимосвязи параметра окружающей среды с ВЦВ:**

- **Фактор интенсификации**
- **Индикатор**



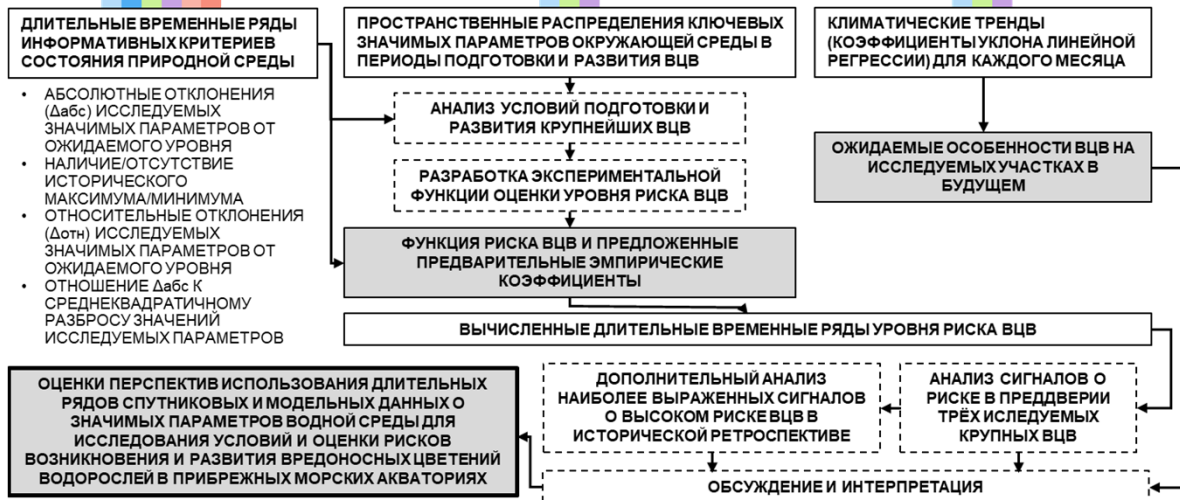
Исследование вышеупомянутых многолетних рядов спутниковых и модельных данных основано на **1) статистическом анализе** значений значимых параметров окружающей среды, а также на **2) эмпирическом моделировании** рисков ВЦВ.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ (6)

Спутниковая группировка	Aqua Terra	Группировки NOAA, MeTop	Группировки GOES, METEOSAT, GMS/MTSAT	Группировка Jason, данные in situ
Продукт / временной интервал	Level 3 data 2000-2022	NOAA CDR OISST 1981-2022	NCEP CFSv2 1979-2022	HYCOM 1992-2022
Значимый параметр водной среды	ФАР ХЛ-а	ТМР	Характеристики приповерхностного ветра	Аномалия высоты МП Солёность МП

Район	Событие	ФАР	ХЛ-а	ТМР	Характеристики приповерхностного ветра	Аномалия высоты МП	Солёность МП
Остров Чилоэ, Чили	ВЦВ (P. cf. Verruculosa, A. Catenella), гибель гидробионтов, 2016 г.	●	●	●	●	●	●
Полуостров Камчатка, Россия	ВЦВ (Kr. Selliformis, Pseudo-nitzschia sp.), гибель гидробионтов, 2020 г.	●	●	●	●	●	●
Остров Хоккайдо, Япония	ВЦВ (Kr. selliformis, Kr. mikimotoi), гибель гидробионтов, 2021 г.	●	●	●	●	●	●

## Пространственно-временные распределения значимых параметров водной среды, рассматриваемых в качестве потенциальных предвестников и индикаторов ВЦВ



ПОТОКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ С ДИФФЕРЕНЦИАЦИЕЙ ПО ТИПУ ИСТОЧНИКА ← ПОТОКИ ОБРАБОТАННЫХ ДАННЫХ

- ДАННЫЕ   
 - ДЕЙСТВИЯ   
 - КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Обобщённая схема проведения исследований

## 1. ИНФОРМАТИВНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЦВ

- абсолютное отклонение (**A**) исследуемого параметра окружающей среды от ожидаемого уровня (**1** и **2**);
- относительное отклонение (**R**) исследуемого параметра окружающей среды от ожидаемого уровня (**3**);
- отношение (**S**) абсолютного отклонения **A** к среднеквадратичному разбросу значений исследуемого параметра (**4** и **5**).

$$1 \quad P_{\text{ср.мес.}m} = \frac{\sum_{j=1}^{n_m} S_{j,m}}{n_m}$$

где  $m$  – сквозной порядковый номер месяца в многолетнем временном ряду наблюдений;  $n_m$  – количество пикселей в пределах исследуемой акватории, в которых было хотя бы одно спутниковое измерение в заданный месяц;  $S_{j,m}$  – среднемесячное значение исследуемого параметра в текущем пикселе ( $j$  – номер пикселя) в пределах исследуемой акватории на заданный месяц

$$2 \quad A = P_{\text{ср.мес.}m} - \overline{P_{M,Y}}$$

где  $\overline{P_{M,Y}}$  – ожидаемое значение исследуемого параметра (условно – климатическая норма), соответствующее текущему месяцу с порядковым номером  $M$  для года  $Y$  ( $M$  принимает значения от 1 до 12), вычисляемое как математическое ожидание ряда среднемесячных значений (в заданный месяц  $M$ ) этого параметра, зарегистрированных в пределах границ обрабатываемого участка в течение всех предшествующих лет

$$3 \quad R = A_m / P_{\text{ср.мес.}m} * 100\%$$

величина **A** часто использовалась для выявления короткопериодных аномалий исследуемых параметров, однако для более детального анализа использовались величины **R** и **S**.

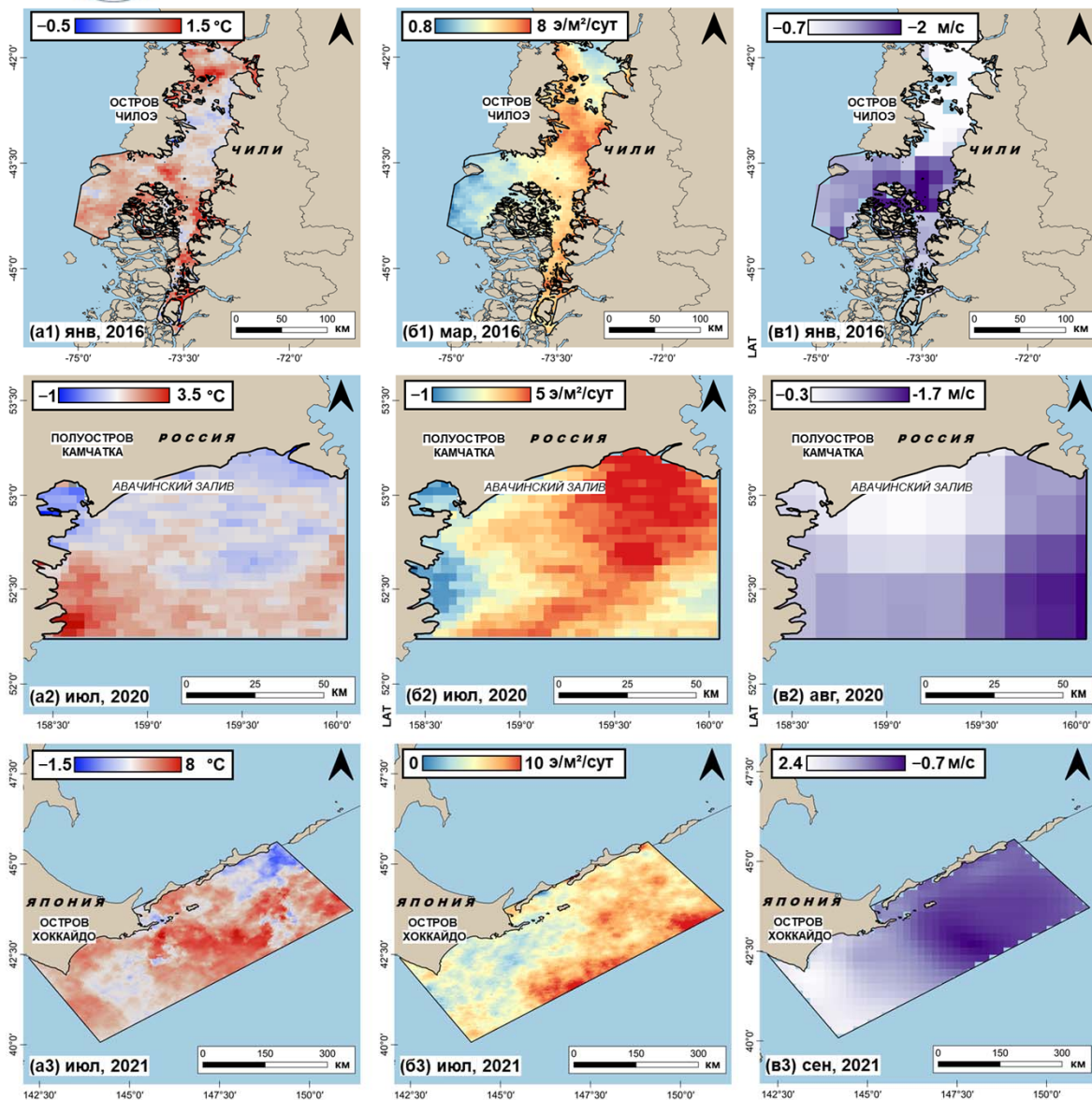
$$4 \quad \sigma_{M,Y} = \sqrt{\frac{\sum ((P_{\text{ср.мес.}m})_Y - (\overline{P_M})_Y)^2}{N}}$$

где  $N$  – число лет, вошедших в анализируемый временной ряд до наступления текущего года

$$5 \quad S = A_m / \sigma_{M,Y}$$

Перечисленные формулы поэтапно применялись для каждого из 6 типов исследуемых параметров для каждого из 3 участков акватории (всего 18 наборов данных). В качестве доп. критериев вычислялись и анализировались многолетние тренды исследуемых параметров (коэффициенты уклона линейной регрессии), а также исторические максимумы/минимумы этих параметров.

# РЕЗУЛЬТАТЫ



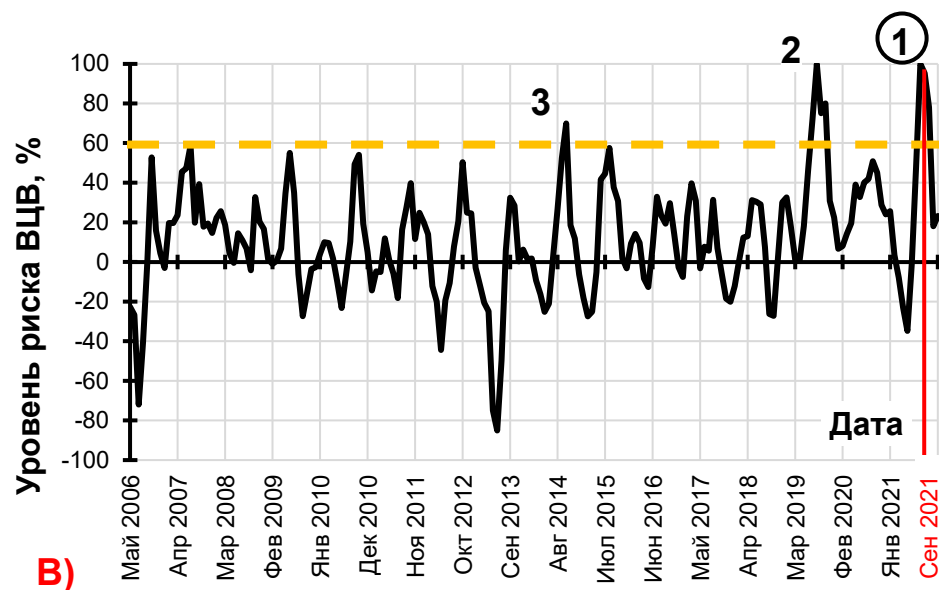
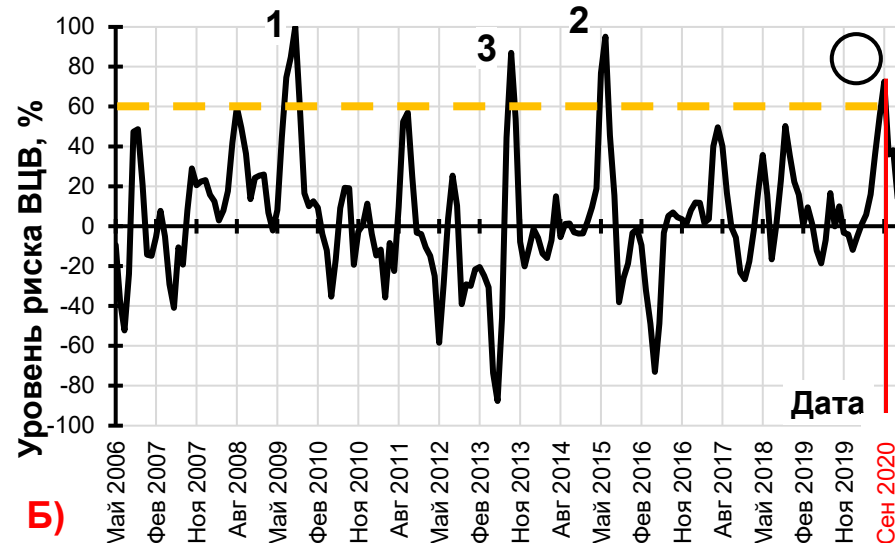
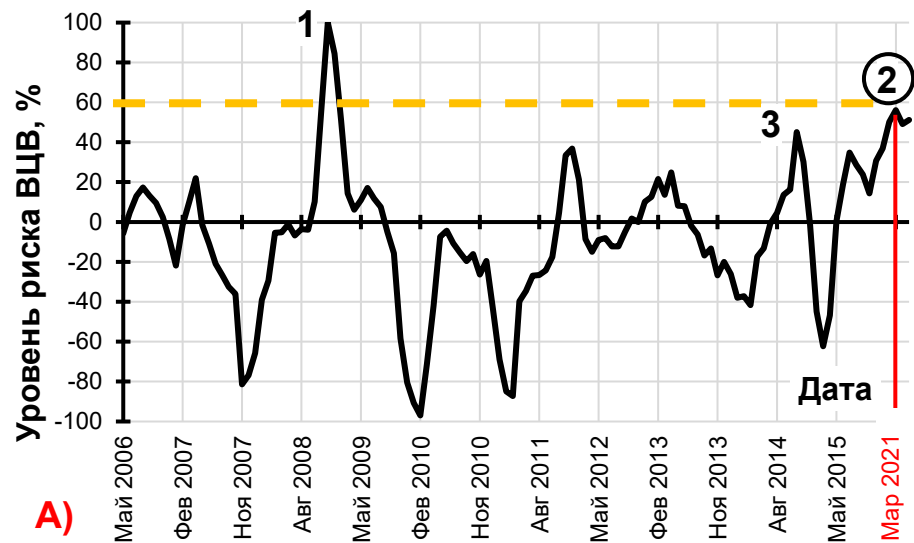
Примеры пространственных распределений отклонений среднемесячных абсолютных значений значимых параметров окружающей среды:

в акватории у о. Чилоэ для:  
 а1) ТМП за январь 2016 г.,  
 б1) ФАР за март 2016 г.,  
 в1) скорости приповерхностного ветра за январь 2016 г.

в акватории Авачинского залива для:  
 а2) ТМП за июль 2020 г.,  
 б2) ФАР за июль 2020 г.,  
 в2) скорости приповерхностного ветра за август 2020 г.

в акватории у о. Хоккайдо для:  
 а3) ТМП за июль 2021 г.,  
 б3) ФАР за июль 2021 г.,  
 в3) скорости приповерхностного ветра за сентябрь 2021 г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ



Динамика уровня риска ВЦВ, вычисленного согласно предложенной методологии:

А) в акватории у острова Чилоэ (2006-2016 гг.)

Б) в акватории Авачинского залива (2006-2020 гг.)

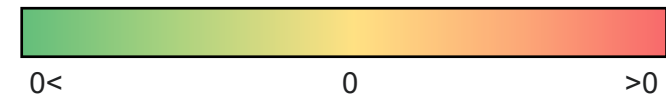
В) в акватории у о. Хоккайдо (2006-2021 гг.)





Температура морской поверхности (ТМП), °С / год												
Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
<b>Акватория</b>												
О. Чилоэ (Чили), 1981-2016	-0.0167	-0.0157	-0.0203	-0.007	-0.0028	0.0039	0.0073	0.0026	0.001	-0.0048	-0.0001	-0.0059
П-ов Камчатка (Россия), 1981-2020	0.0017	0.002	0.0009	0.0026	0.0193	0.0418	0.0537	0.0463	0.0196	0.0076	0.0076	0.0027
О. Хоккайдо (Япония), 1981-2021	0.0074	-0.0032	-0.007	0.0039	0.0209	0.0332	0.0496	0.0407	0.0368	0.022	0.0227	0.0169
Фотосинтетически активная радиация (ФАР), э/м <sup>2</sup> /сут / год												
Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
<b>Акватория</b>												
О. Чилоэ (Чили), 2000-2016	0.5518	0.162	0.2624	-0.0186	-0.0565	0.0172	-0.0235	-0.1209	0.2002	0.2342	0.0332	-0.0111
П-ов Камчатка (Россия), 2000-2020	-0.0166	-0.0255	0.0154	0.0304	0.0039	0.0462	0.0093	-0.0354	-0.0749	0.0554	-0.0126	0.0006
О. Хоккайдо (Япония), 2000-2021	0.014	-0.0649	-0.0925	0.0279	0.1031	-0.0008	0.1493	-0.0462	0.163	-0.027	-0.0164	-0.001
Скорость приповерхностного ветра, м/с / год												
Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
<b>Акватория</b>												
О. Чилоэ (Чили), 1979-2016	-0.0126	-0.0093	-0.0124	-0.0094	-0.0214	0.0164	0.0153	0.0029	-0.022	-0.0033	-0.01	0.0013
П-ов Камчатка (Россия), 1979-2020	0.0271	0.0377	0.0262	0.0143	0.0018	0.0144	0.0155	0.0241	0.0325	0.0287	0.0433	0.0398
О. Хоккайдо (Япония), 1979-2021	0.0005	0.0188	0.003	0.0045	0.0087	0.0025	-0.0065	-0.0034	-0.0027	-0.0046	-0.0117	0.0212

Скорость изменения значимых параметров по фактору времени (год)



**Многолетние тренды (коэффициенты уклонов линейной регрессии) исследуемых значимых параметров водной среды ТМП, ФАР, скорости приповерхностного ветра для каждого месяца, зарегистрированные для акваторий у острова Чилоэ (Чили), у полуострова Камчатка (Россия) и у острова Хоккайдо (Япония)**



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплексного анализа и сопоставления особенностей многолетней динамики исследованных параметров окружающей среды с динамикой ВЦВ на трёх тестовых участках были предложены подход и эмпирическая функция, позволяющие оценивать уровень риска возникновения таких явлений и выявлять их предвестники.

С использованием предложенных подхода и эмпирической функции были выявлены предвестники 10-и ВЦВ, 9 из которых подтвердились по данным натурных наблюдений.

Результаты могут использоваться для прогнозирования и исследования условий возникновения ВЦВ, представляя собой одно из перспективных направлений мониторинга этих опасных явлений, в том числе в прибрежных водах Камчатки.

Работа выполнена при поддержке государственного задания по теме FNEE-2023-0001.



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

По результатам проведённого исследования  
опубликована статья  
(доступна по ссылке <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/22/5308>):

Bondur, V.; Chvertkova, O.; Zamshin, V. Studying Conditions of Intense Harmful Algal Blooms Based on Long-Term Satellite Data. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 5308. <https://doi.org/10.3390/rs15225308>