



Многолетняя динамика концентрации хлорофилла "а" в антарктических водах по данным спутникового мониторинга

Бакуева Я.И. [✉], Кубряков А.А., Кубрякова Е.А.

¹Морской Гидрофизический Институт РАН, г. Севастополь, Российская Федерация

[✉]yasyalegiprova@gmail.com

Актуальность

- **Высокий биоресурсный потенциал Антарктики** требует изучения основ функционирования ее экосистем, ключевым элементом которых является фитопланктон.
- **«Парадокс Южного океана»:** Несмотря на обилие макро-биогенов (нитраты, фосфаты), биомасса фитопланктона низка. Основные лимитирующие факторы – **железо и освещенность**.
- **Гидродинамика – ключевой регулятор:** Процессы перемешивания, апвеллинга и адвекции напрямую влияют на поступление лимитирующих веществ (Fe) к фотической зоне и формируют пространственную неоднородность полей Хл.
- **Плато Кергелен** – один из наиболее продуктивных районов Антарктики, где взаимодействие течений с топографией создает зоны устойчивого апвеллинга, являющиеся «оазисами» продуктивности.
- **Пробел в имеющейся литературе:** Существующие исследования часто основаны на спутниковых данных, которые не отражают вертикальную структуру (глубинные максимумы Хл) и имеют пробелы в зимний период. Влияние изменчивости гидродинамики на **межгодовые колебания** продуктивности изучено недостаточно.



Цель :

Оценить вклад различных параметров гидродинамики в межгодовую изменчивость концентрации хлорофилла «а» в районе плато Кергелен

Задачи :

1. Проанализировать пространственно-временную изменчивость Хл по спутниковым данным (2002-2019 гг.).
2. Исследовать взаимосвязь аномалий Хл с ключевыми физическими параметрами:
 - Температура поверхности моря
 - Скорость и компоненты ветра
 - Скорость геострофических течений
3. Определить временные лаги максимальной корреляции между Хл и параметрами гидродинамики.



Данные и методы

• **Период исследования:** 2002 – 2019 гг.

• **Данные:**

Хл и температура: 8дневные измерения MODIS-Aqua за 2002-2019 гг

Ветер: данные реанализа U,V компонент ветра ERA5 (6-часовые)

(<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=download#manage-licences>);

Геострофические течения: AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>);

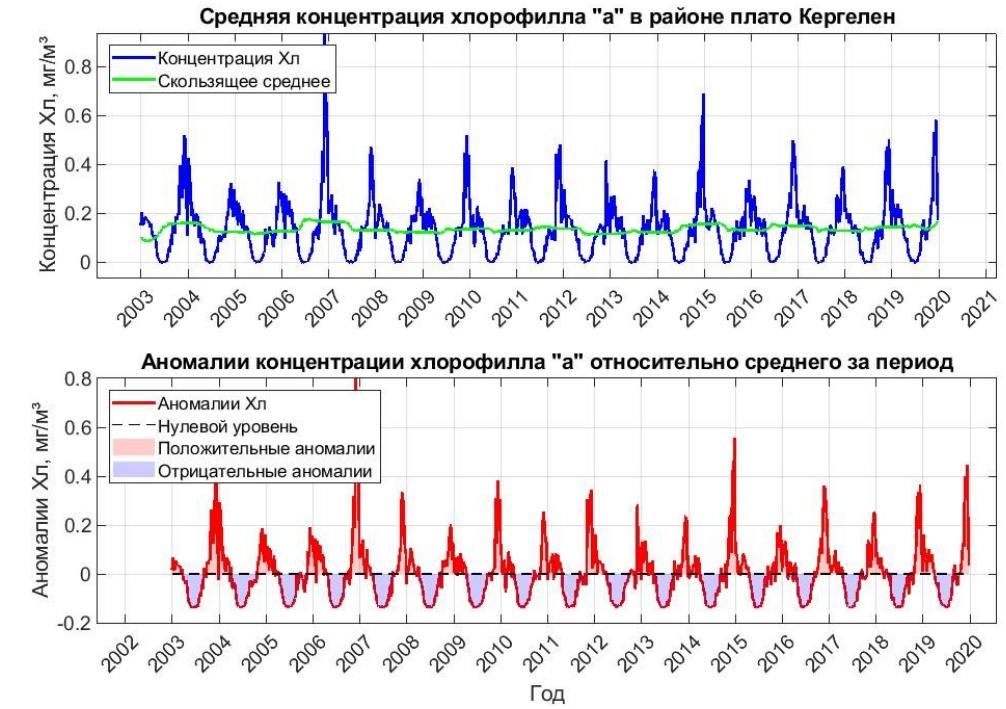
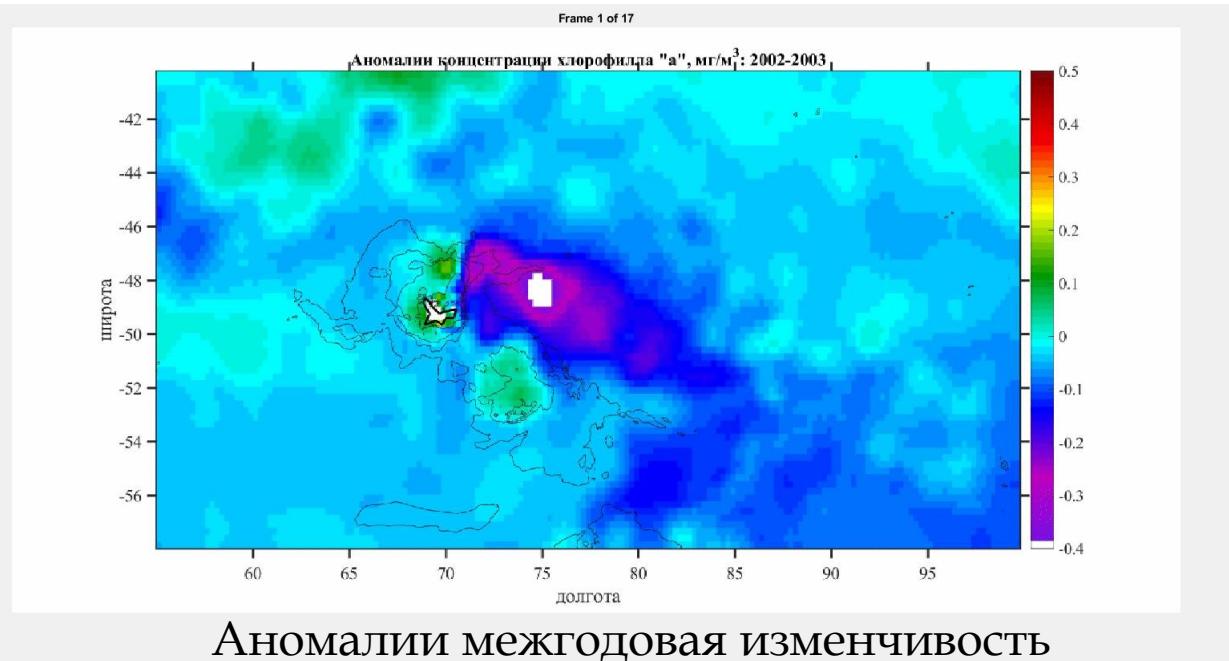
Батиметрия: GEBCO | General Bathymetric Chart of the Oceans

(<https://www.gebco.net>)

• **Методы анализа:**

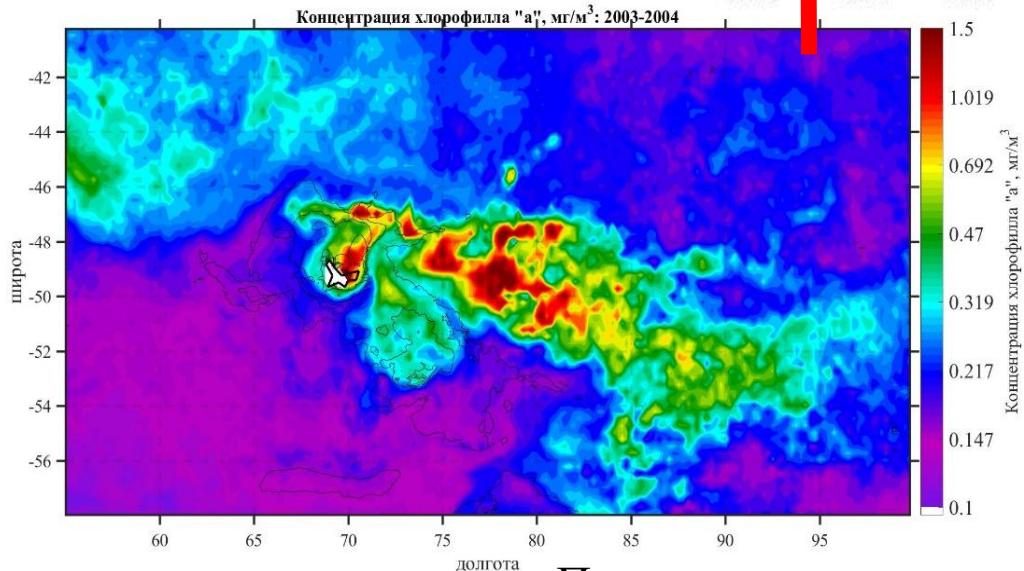
- Концентрация Хл рассчитывалась алгоритмом OC3M для MODIS и OC4 для SeaWiFS
- Расчет среднегодовых и сезонных аномалий.
- Кросс-корреляционный анализ для определения силы связи и временных лагов (от -15 до +15 месяцев/дней).

Межгодовая изменчивость Хл

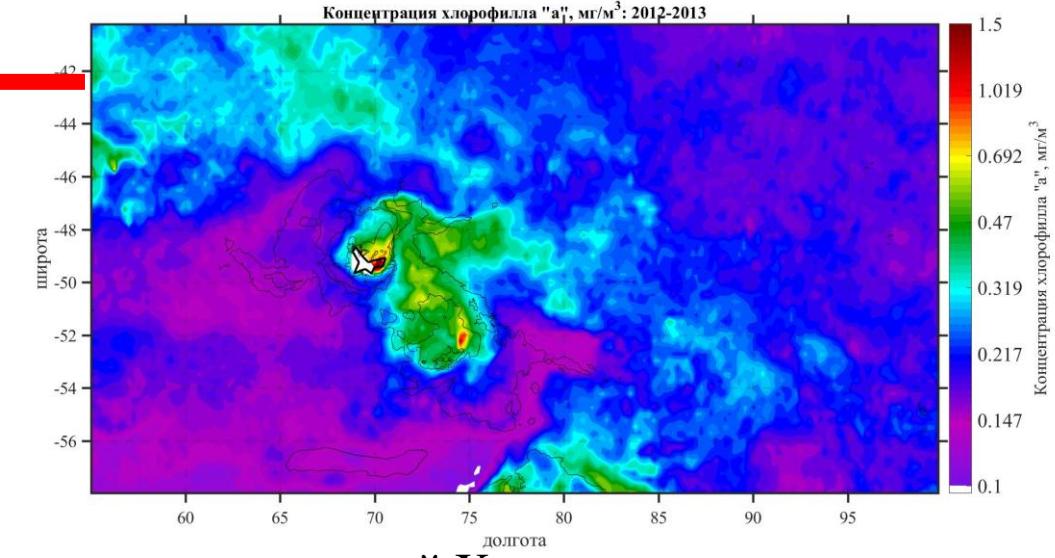


- Выявлена значительная межгодовая изменчивость в распределении Хл.
- Области повышенной продуктивности четко привязаны к мелководным частям плато и зонам влияния АЦТ.
- Максимальные значения Хл зафиксированы в северо-восточной части плато, где отмечается интенсивное взаимодействие течений с топографией дна.

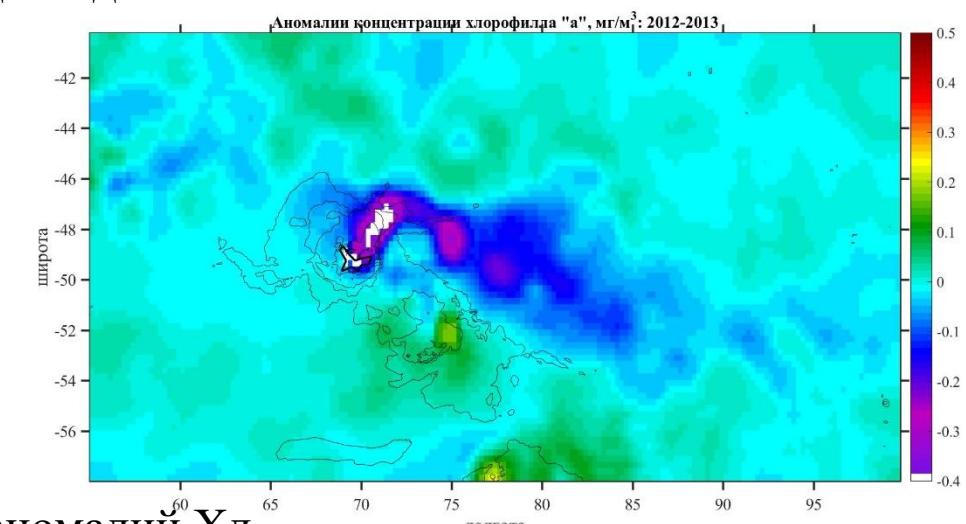
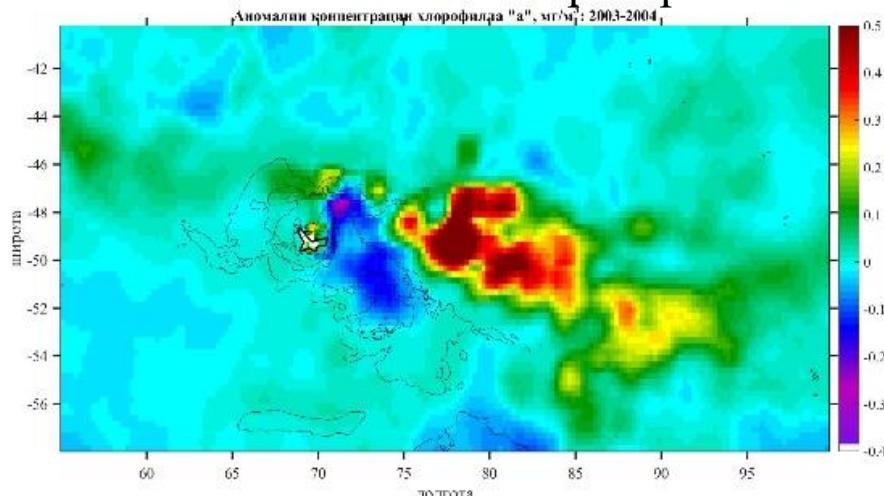
2003-2004



2012-2013

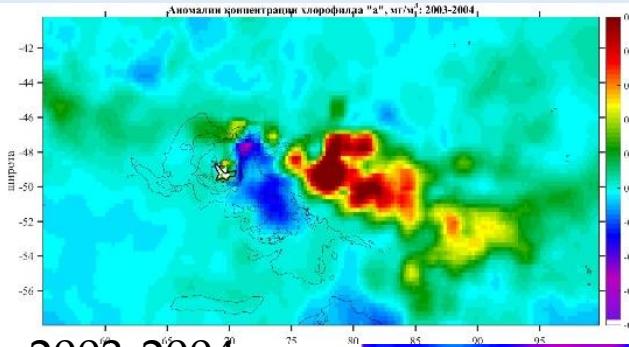


Пространственное распределение среднегодовых значений Хл

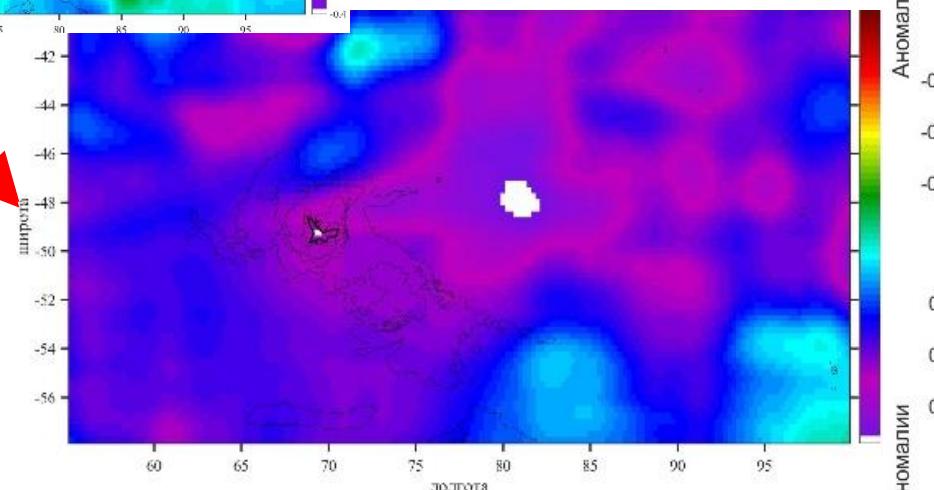


Пространственное распределение аномалий Хл

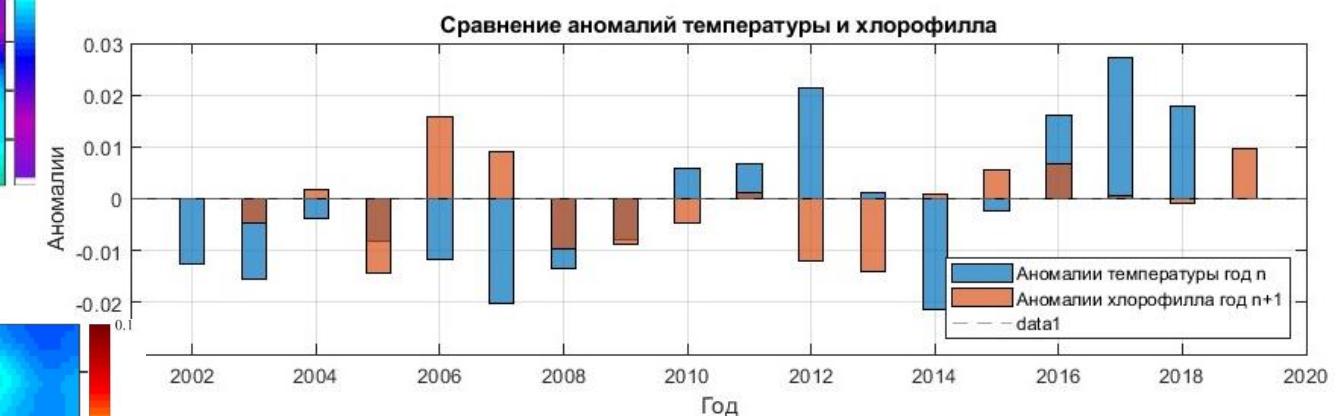
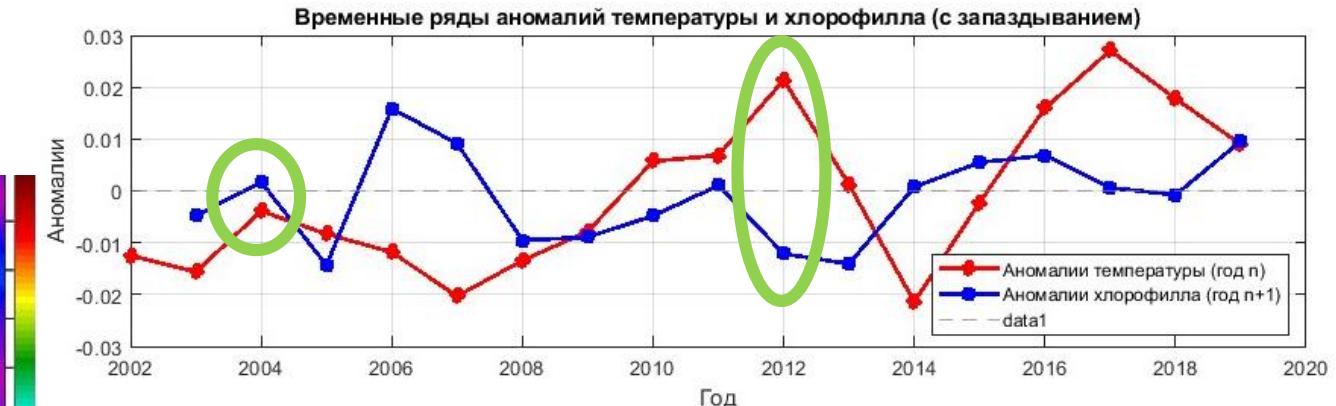
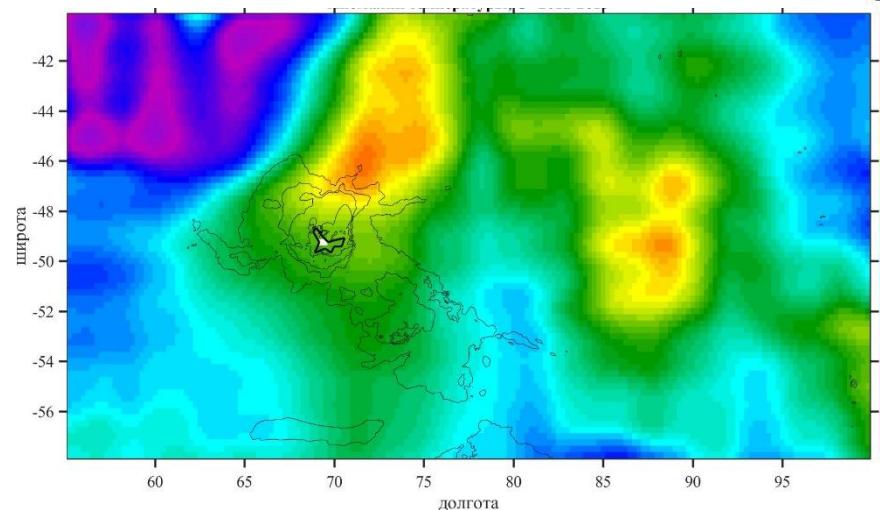
Температура



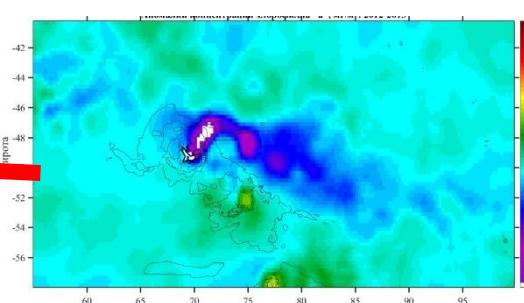
2002-2003



2011-2012

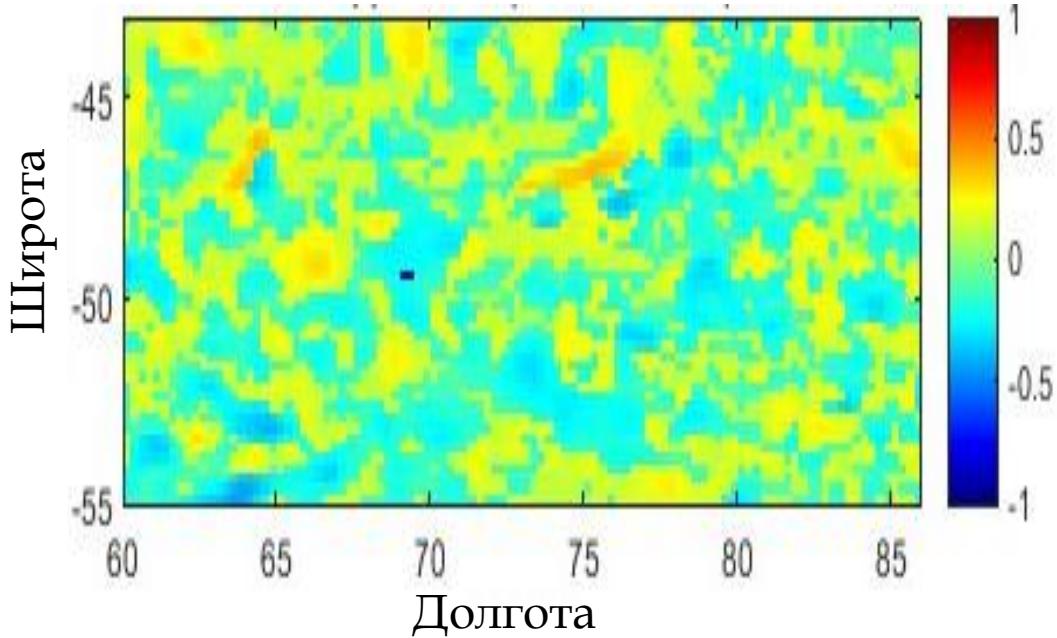


2012-2013

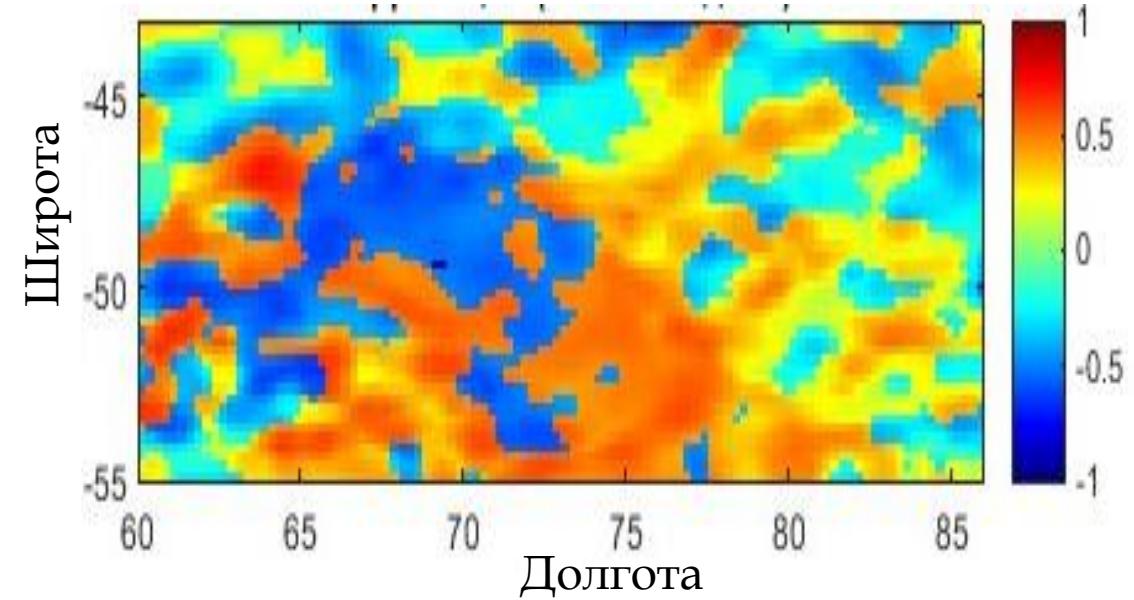


Кросс-корреляция: температура-Хл

Корреляция (окно сглаживания: 30 дней)



Корреляция (окно сглаживания: 365 дней)

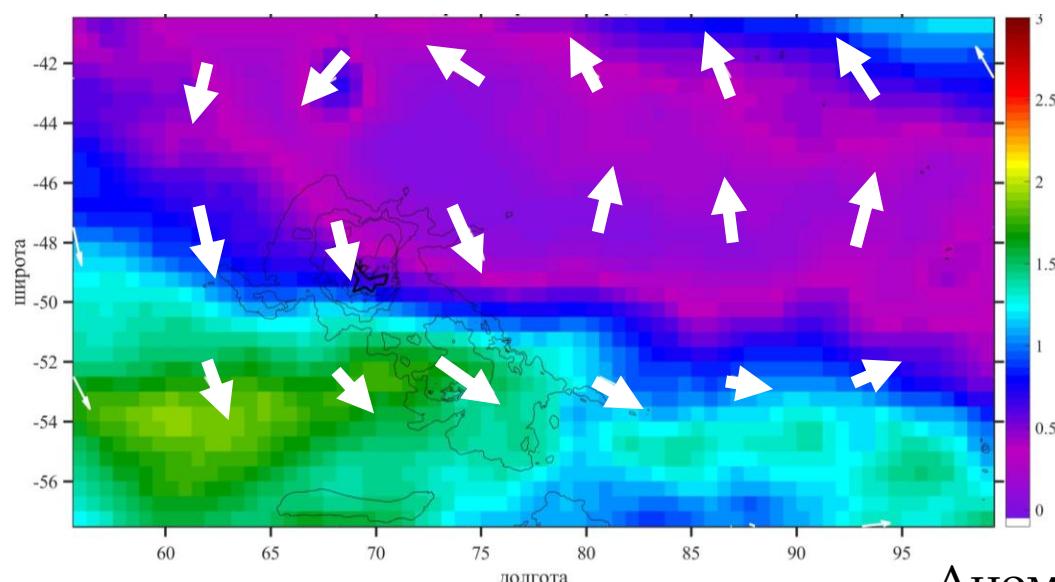


- Пространственная неоднородность** корреляции связана с:
 - Топографией дна (влияние плато на циркуляцию)
 - Различными механизмами поступления биогенных элементов
 - Вихревой динамикой
- Зависимость от масштаба времени:**
 - Краткосрочные связи (30 дней) более изменчивы
 - Долгосрочные тренды (365 дней) выявляют устойчивые пространственные паттерны

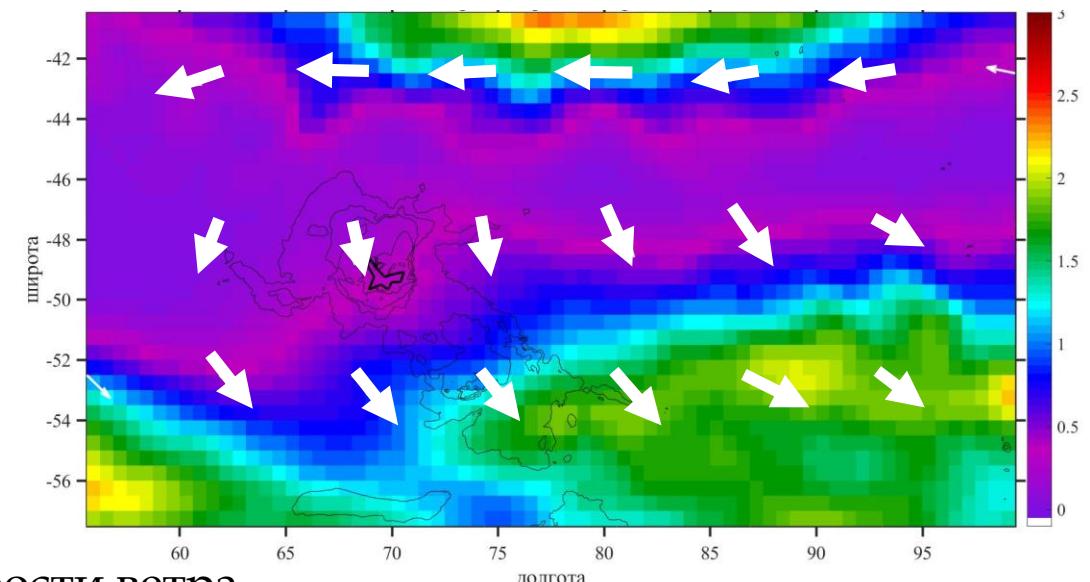
Ветер

Нормализованные аномалии (для сравнения)

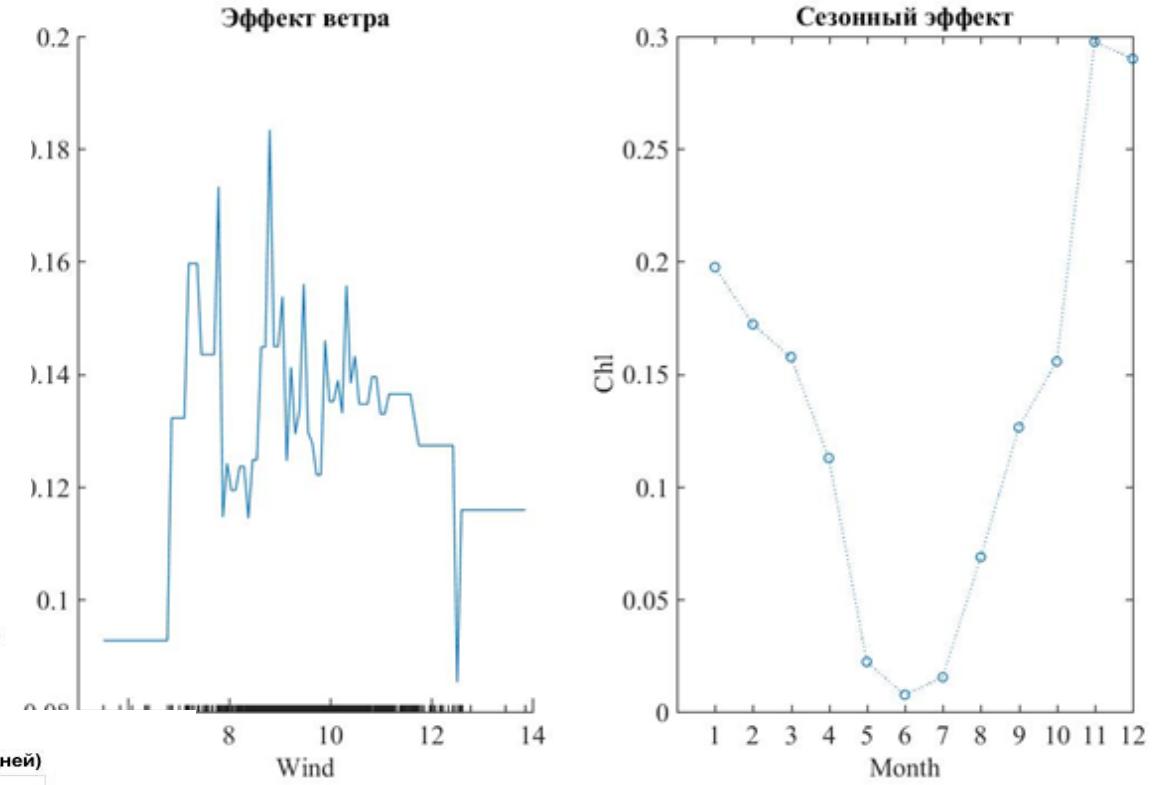
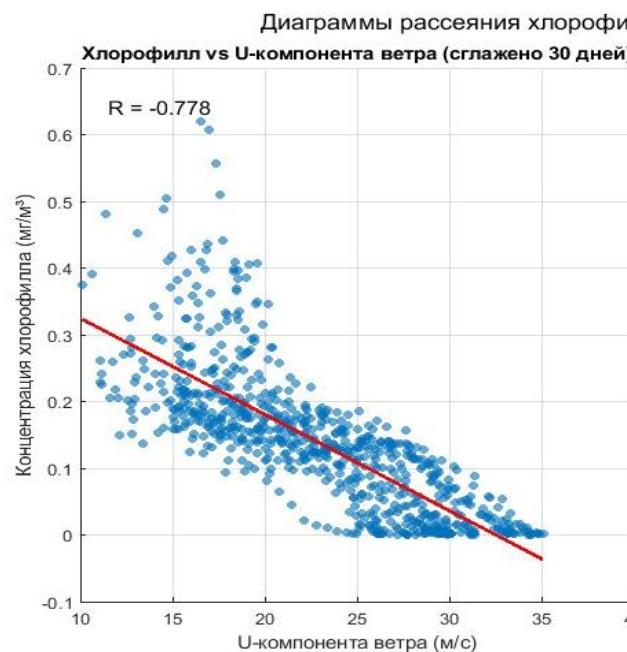
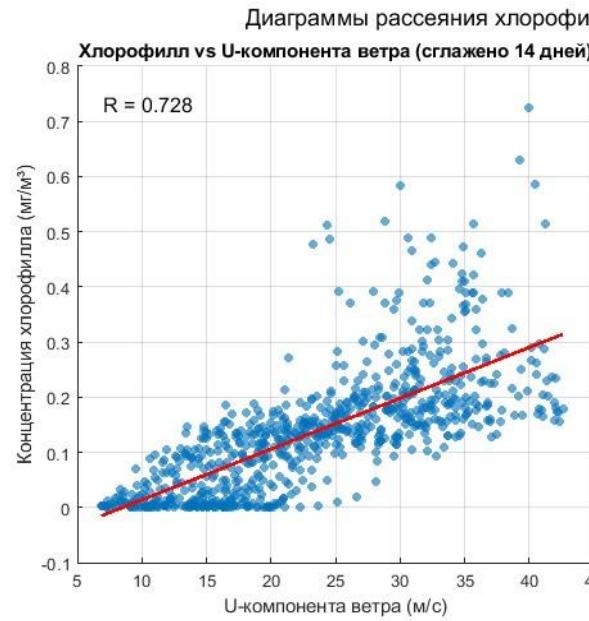
2003-2004



2015-2016

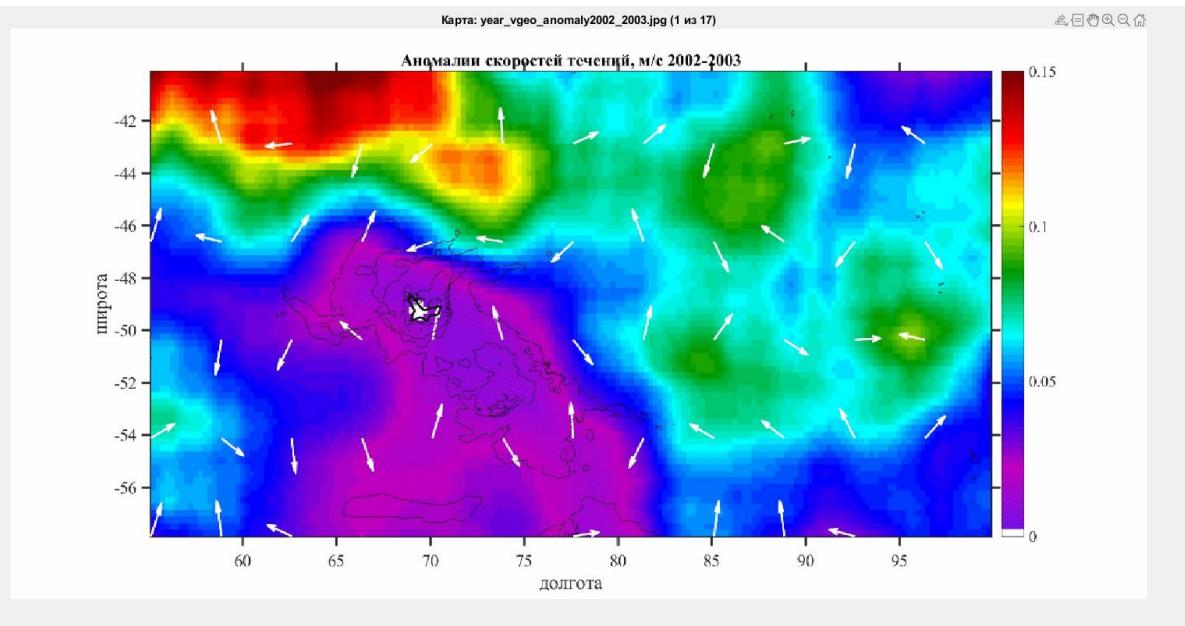


Аномалии скорости ветра



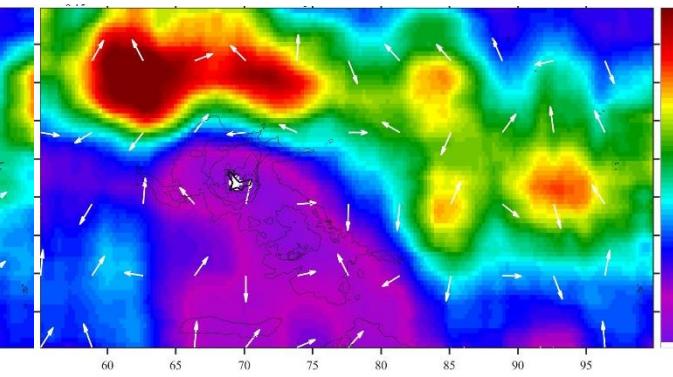
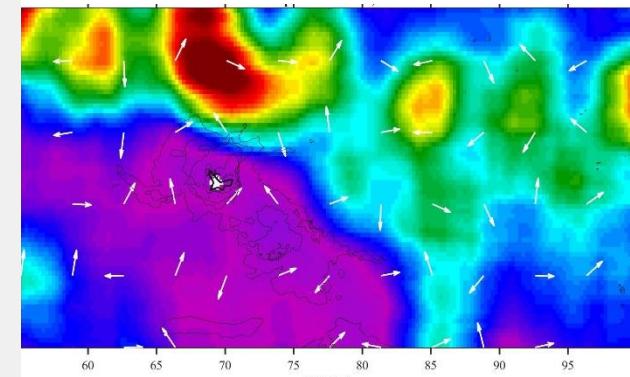
Ветер влияет на хлорофилл по-разному в зависимости от временного масштаба и компоненты. U-ветер – главный драйвер, причём на коротких временах он стимулирует рост, а на долгих – снижает концентрацию. V-ветер практически не влияет.

Влияние геострофических течений

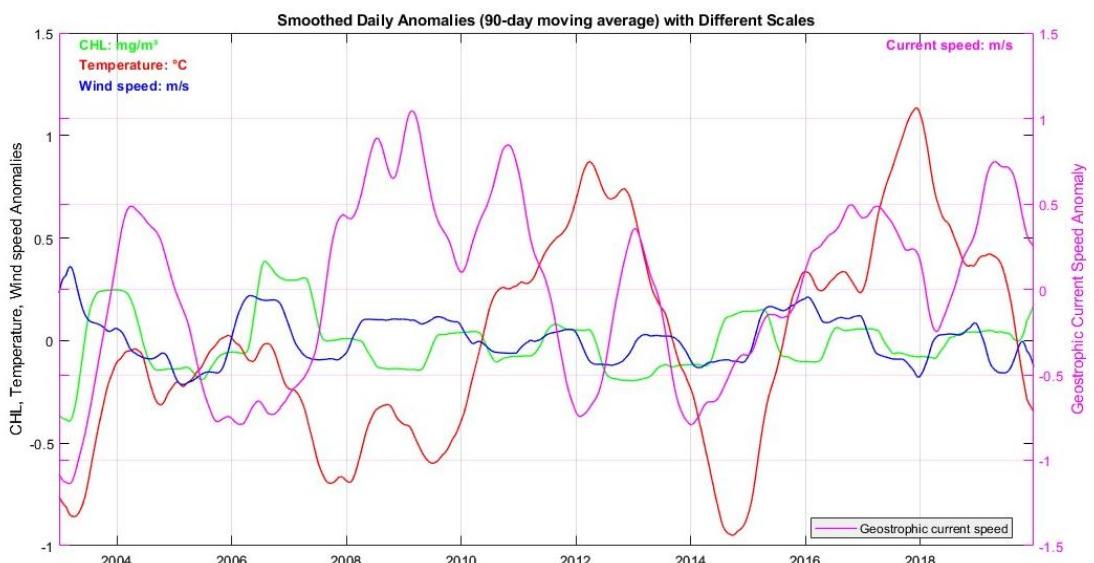


2003-2004

2015-2016

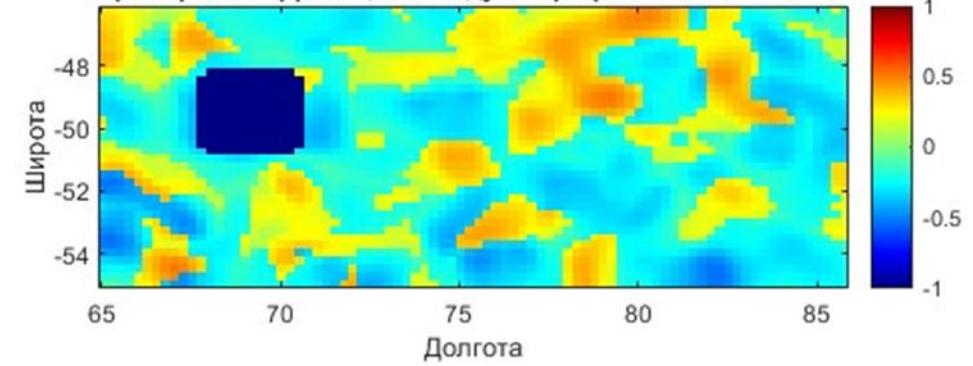


Аномалии геострофических течений

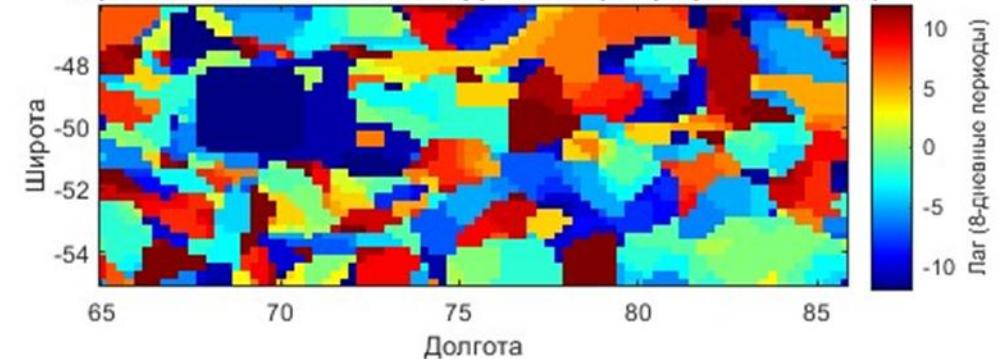


Межгодовой ход аномалий всех показателей

Карта кросс-корреляции между хлорофиллом и течениями



Карта лагов максимальной корреляции (хлорофилл-течения)



Заключение

- **Температура:** Выявлена устойчивая **обратная корреляция** между температурой поверхности моря и концентрацией Хл (~70% акватории). Похолодание способствует вертикальному перемешиванию и поступлению биогенов, стимулируя рост фитопланктона.
- **Ветер:** Обнаружена **положительная корреляция** между скоростью ветра и Хл, особенно с зональной (запад-восток) компонентой.
- Усиление ветра приводит к увеличению вертикального перемешивания и апвеллинга, поднимая биогены к поверхности. Максимальная положительная корреляция наблюдается с лагом в ~2 месяца.
- Сильный ветер (>12 м/с) может оказывать негативный эффект из-за чрезмерного перемешивания и механического стресса для фитопланктона.

Наиболее благоприятные условия для увеличения Хл складываются при сочетании отрицательных температурных аномалий предыдущего года и отрицательных аномалий зональной компоненты скорости ветра.



Спасибо за внимание!