

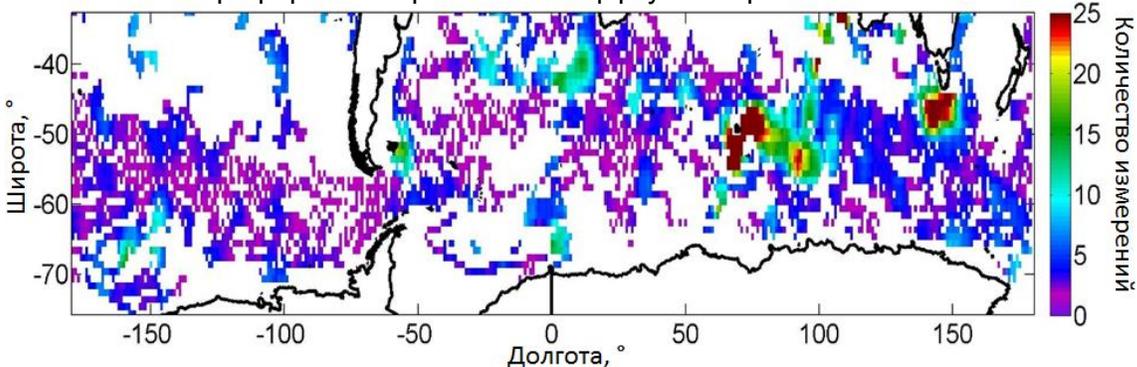
# Пространственная и вертикальная изменчивость распределения концентрации хлорофилла "а" в Южном океане по данным спутниковых измерений и буев Био-Арго

Кубрякова Е.А.<sup>1,2</sup>, Бакуева Я.И.<sup>1</sup>, Кубряков А.А.<sup>1</sup>

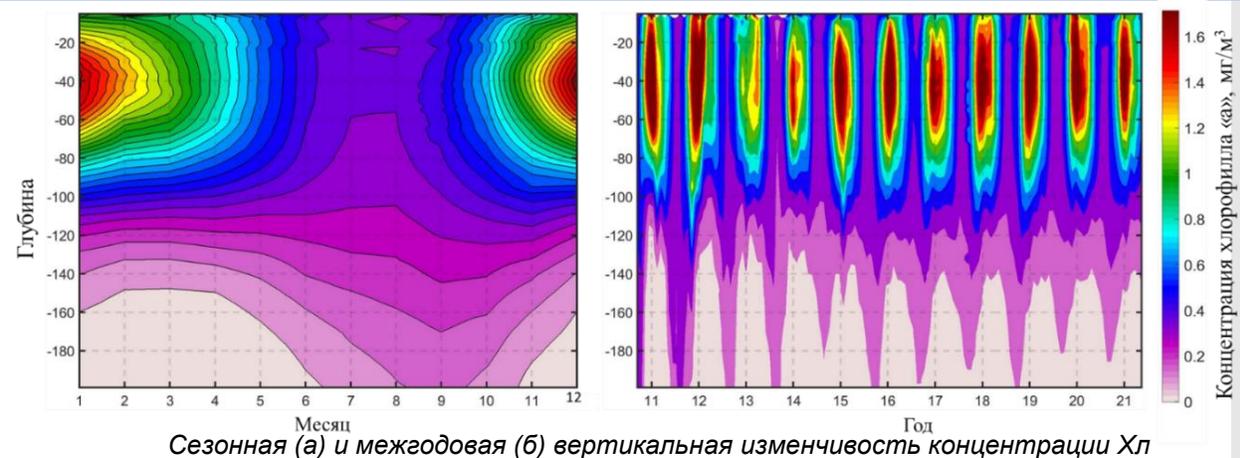
<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь,

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
yasya1egupova@gmail.com

- На основе измерений 119 буев Био-Арго за 2010-2021 гг. проведено исследование особенностей пространственно-временной изменчивости вертикального распределения концентрации хлорофилла «а» (Хл) в различных районах Южного океана, даны оценки положения глубины подповерхностного максимума и его сезонной изменчивости. В верхнем слое (0-50 м) в период антарктического лета высокие значения Хл сосредоточены в трех областях интенсивного выноса льда от берегов Антарктиды (море Уэдделла, море Амундсена и восточная часть Индоокеанского сектора) (январь-март). В слое 50-100 м максимумы наблюдаются в период антарктической весны (октябрь-декабрь) в зоне циклонического сдвига на южной периферии Антарктического Циркумполярного Течения.

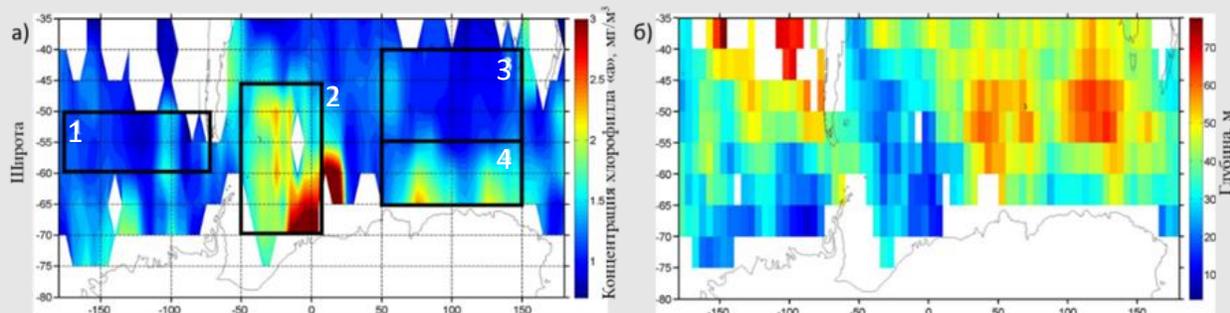


Распределение количества измерений буев Био-Арго в Юном океане за 2010-2021гг



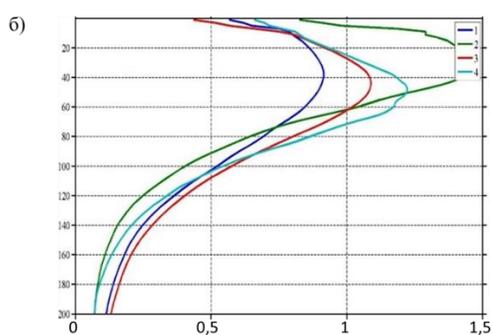
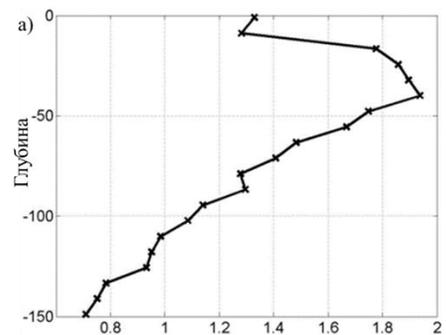
Сезонная (а) и межгодовая (б) вертикальная изменчивость концентрации Хл

- Основной особенностью среднего вертикального распределения Хл является наличие выраженного подповерхностного максимума на глубинах 20-60 м. Образование этого подповерхностного максимума имеет сезонный характер. Хорошо видно также, что в это время вертикальное перемешивание приводит к перераспределению Хл (т.е. снижению Хл в верхних слоях и росту в глубинных слоях до 200 м). Межгодовая изменчивость Хл демонстрирует, что такой сезонный ход достаточно характерен для Южного океана и наблюдается стабильно в течение десятилетнего периода 2011-2021 гг



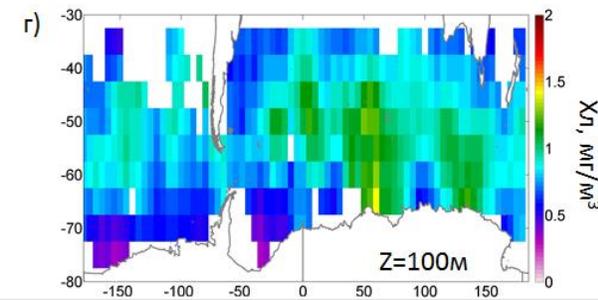
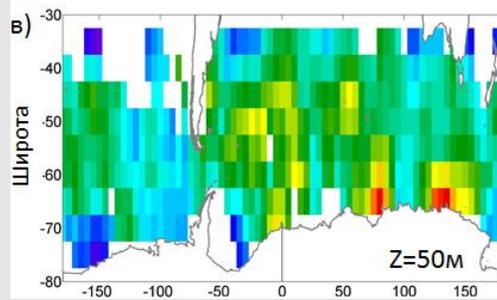
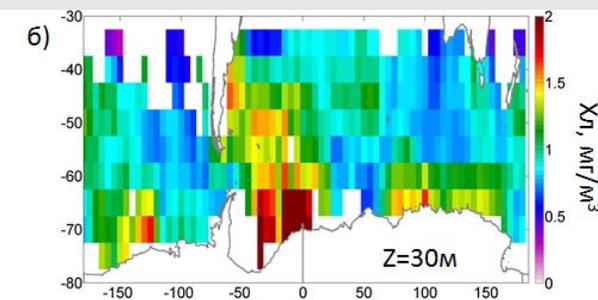
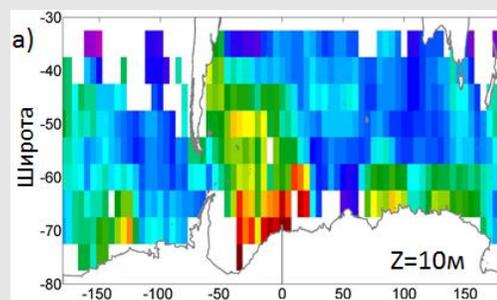
Карты распределения величины ПМХ, осредненной за 2010-2018 гг. и распределения средних значений глубины подповерхностного пика Хл

- Интенсивность и положение подповерхностного максимума Хл (ПМХ) имеют существенную пространственную изменчивость. Для оценки её среднего распределения в каждой ячейке массива, осредненного за все время, рассчитывалась положения максимума Хл и его величина (далее интенсивность ПМХ).
- Величина ПМХ (2-3 мг/м<sup>3</sup>) максимальна в Атлантическом секторе Антарктики (район 2), еще один район с высокими значениями ПМХ находится в Индийском секторе Южного океана в прикромочной зоне (район 4). Наиболее бедными районами являются центральная часть Индийского и Тихоокеанского секторов Южного океана (районы 1 и 3).



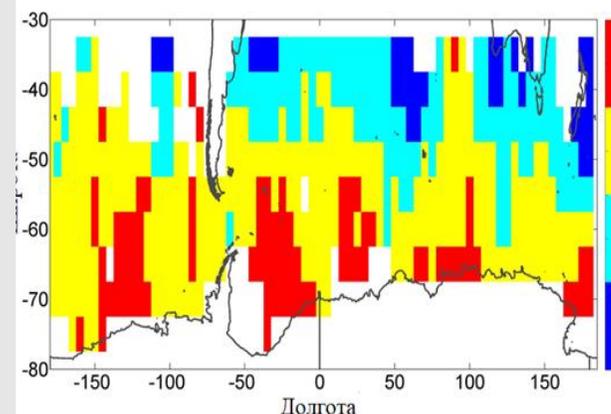
Связь между положением ПХМ и его интенсивностью, показывает, что для глубин более 50 м рост продуктивности приводит к уменьшению глубины ПХМ, т. е. чем продуктивнее воды, тем ближе к поверхности находится пик Хл.

Связь между глубиной ПХМ и максимальной величиной Хл в ПХМ (а); усредненный по времени вертикальный профиль Хл для выбранных районов 1-4 (б).



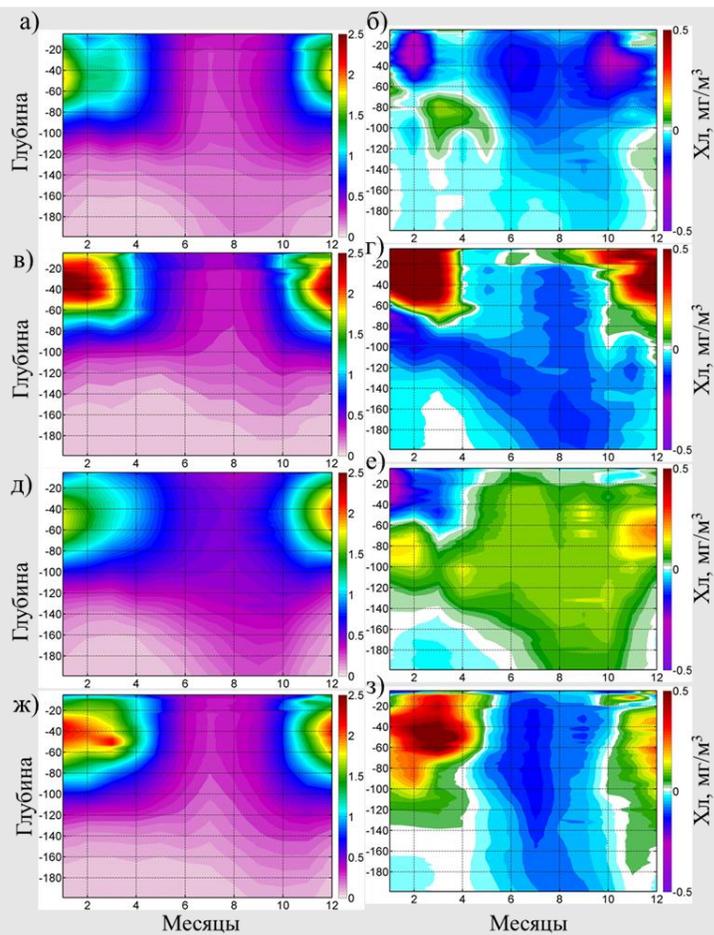
Пространственное распределение средней концентрации Хл на глубине 10 м (а), 30 м (б), 50 м (в) и 100 м (г)

Особенности профиля Хл определяют изменчивость её пространственного распределения на разных горизонтах (рис. 5). Для анализа этих особенностей были выбраны горизонты: 10 м – поверхностный слой; 30 м – глубина пика ПХМ в атлантическом секторе; 50 м – глубина пика ПХМ в районах 1, 3 и 4; 100 м – нижняя часть ПХМ.



Месяц наступления пика Хл на горизонте 20 м по данным буев Био-Арго

Характерной чертой изменчивости времени наступления сезонного пика является его более раннее наступление в низких широтах (в ноябре-декабре) и более позднее в высоких (январь-февраль). Наиболее позднее цветение фиксируется в прикромочной зоне (в феврале). Такие особенности отмечались в ряде работ и по спутниковым измерениям [1, 2] и связаны с разницей во времени прогрева вод и развитием устойчивой стратификации.

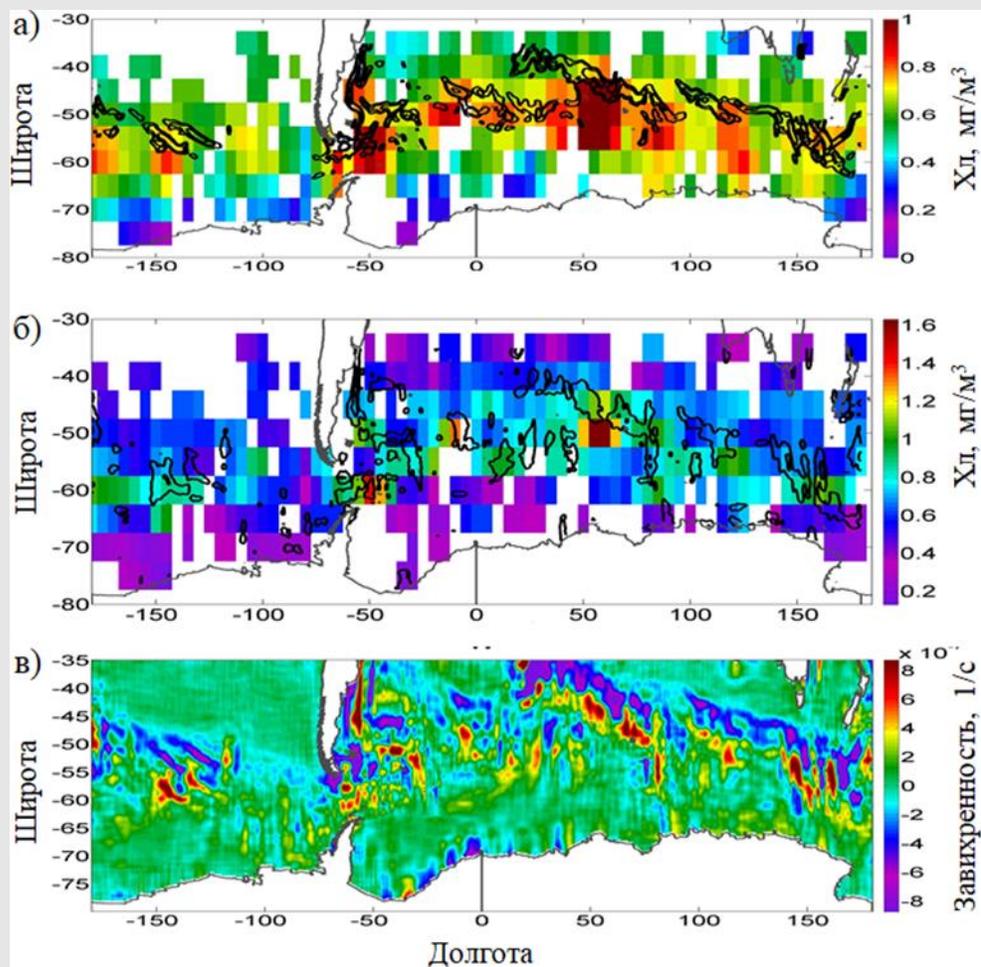


Сезонная изменчивость вертикального распределения Хл (слева) и её аномалия (справа) от среднего профиля Хл для всего Южного океана: а, б) район 1 – Тихоокеанский сектор Южного океана; в, г) район 2 – Атлантический сектор Южного океана; д, е) район 3 – центральная часть Индоокеанского сектора Южного океана; ж, з) район 4 – южная часть Индоокеанского сектора Южного океана

Отмечается схожесть сезонной динамики во всех районах. В осенний период в сентябре-октябре начинается рост Хл в подповерхностном максимуме, занимающим глубины 10-100 м. Цветение в основном продолжается вплоть до апреля, а затем Хл резко уменьшается из-за роста толщины ВКС. Количественно – изменчивость Хл заметно отличается, с более высокими значениями в районах 2 и 4. При этом, в относительно богатых районах 2 и 4 Хл значимо более резко уменьшается в летний период по сравнению с районом 3, где в это время наблюдаются значения  $>0.5 \text{ мг/м}^3$

## Заключение

- На основе результатов измерений 119 буев Био-Арго проведено исследование особенностей пространственно-временной изменчивости вертикального распределения Хл в различных районах Южного океана. Отмечены значительные различия пространственного распределения Хл в верхнем (0-50 м) и нижнем (50-100 м) слое в разные сезоны.
- Особенности распределения высоких значений Хл в верхнем слое 0-50 м в трех областях наиболее интенсивного выноса таящего льда от Антарктиды, расположенных на западной периферии локальных минимумов давления в Южном океане, могут указывать на определяющее влияние тающего льда, как основного источника биогенных элементов, на летнюю динамику Хл.
- Особенности распределения высоких значений Хл в октябре-декабре в глубинных слоях (50-100 м) в центральной части океана, вдали от прикромочной зоны, при том, что области высоких значений Хл повторяют структуру АЦТ и расположены на его южной периферии позволяют предположить, что основной источник биогенных элементов в этом сезоне расположен в глубинных слоях и связан с вертикальным подъемом в зоне циклонического сдвига течений АЦТ.
- В районах с высокими значениями Хл в верхнем слое (Атлантический сектор и прикромочная зона Индоокеанского сектора), подповерхностный максимум находится ближе к поверхности (на глубинах 20-30 м), а в глубинных слоях Хл резко снижается. В этих районах наблюдаются высокие амплитуды сезонного хода, с резким пиком Хл в летний период и уменьшением зимой. В то же время в центральной части Тихоокеанского и Индоокеанского секторов распределение Хл более равномерно по глубине и по сезонам. Подповерхностный пик заглублен (до 50-70 м), а значения Хл ниже среднего в верхнем слое и выше среднего в глубинных слоях. Кроме этого, сезонный ход средней по слою Хл значительно менее выражен. Такие особенности могут быть частично связаны с влиянием Хл на снижение освещенности (эффект "самозатенения"), а также с вышеописанными различиями в механизмах поступления биогенных элементов. Эти факторы приводят к более равномерному распределению Хл в Южном океане.



*Среднее распределение Хл в слое 0-200 м в весенний период с наложенными контурами пиковых скоростей течений (а) и высоких значений завихренности течений (б) по данным альтиметров; поле завихренности течений по данным альтиметрии (в)*

Возникающий крупномасштабный подъем вод, а также вертикальные движения вод в вихрях, образованных в результате бароклинной неустойчивости потока, по-видимому выступают основной причиной роста Хл в осенний период в нижних слоях центральной части Южного океана. Восходящие движения способствуют вовлечению биогенных элементов в фотический слой, и кроме этого способствует уменьшению толщины ВКС. Оба этих процесса могут играть важную роль в увеличении Хл в этих районах, особенно в глубинных слоях (ниже 50м).

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Обработка массива измерений Био-Арго выполнена при поддержке государственного задания FNNN-2024-0017, исследование изменчивости вертикального распределения Хл при поддержке гранта Российского научного фонда 21-77-10059.