



Восточные ворота в Арктику
открываются шире:
последствия климатических
изменений для биогенного
переноса в высокие широты и
биопродуктивности Чукотского
моря

Международная научно-деловая конференция POLAR-2026
Санкт-Петербург, ААНИИ 19-20 мая 2026 г.

Зуенко Юрий Иванович (ТИНРО, Владивосток)
Курносова Анна Сергеевна (ТИНРО, Владивосток)
Малышева Александра Сергеевна (ВНИРО, Москва)

zuenko_yury@hotmail.com

Биопродуктивность полярных морей. Особый случай Чукотского моря

Полярные моря сами по себе низкопродуктивны из-за отсутствия плотностной стратификации. Лишь в короткий период таяния льдов развивается стратификация, способная удерживать клетки фитопланктона в фотическом слое. Но запас биогенных элементов в тонком распреснённом слое быстро истощается, поэтому в процессе летнего «цветения» продуцируется небольшое количество нового органического вещества. Даже небольшой приток биогенов извне может заметно повысить биопродуктивность.

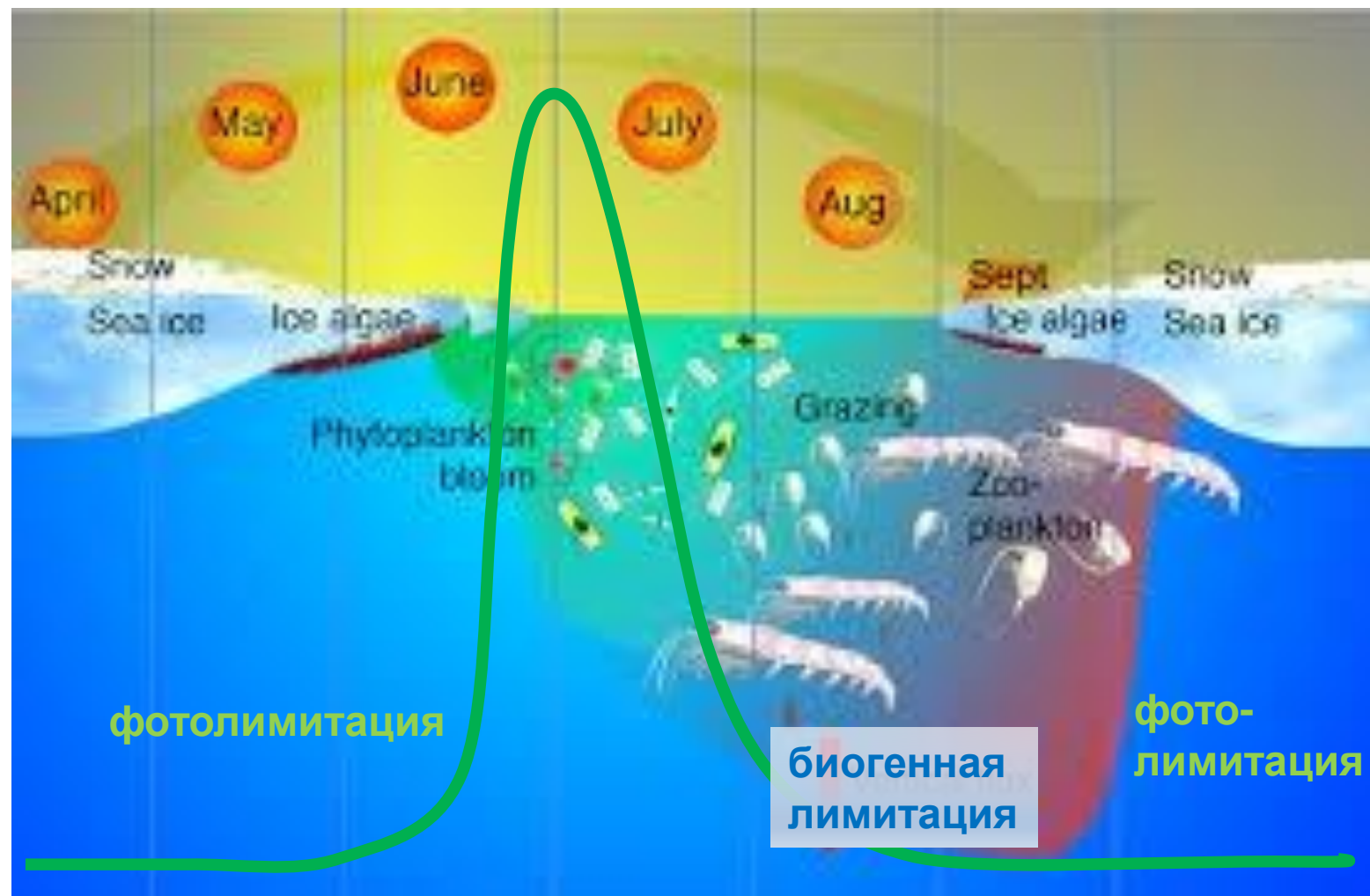


Схема годового цикла обилия фитопланктона, типичная для полярных морей

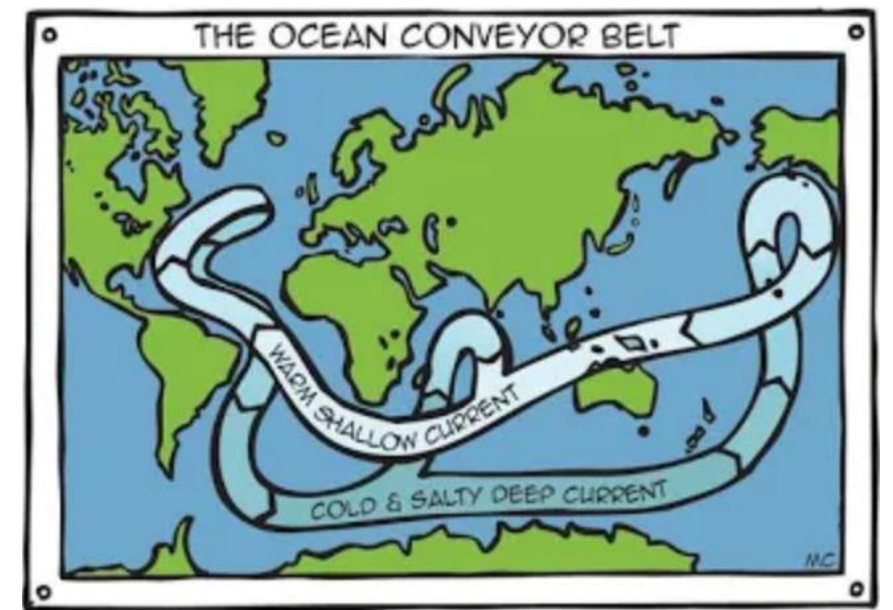


Схема глобального Океанского конвейера

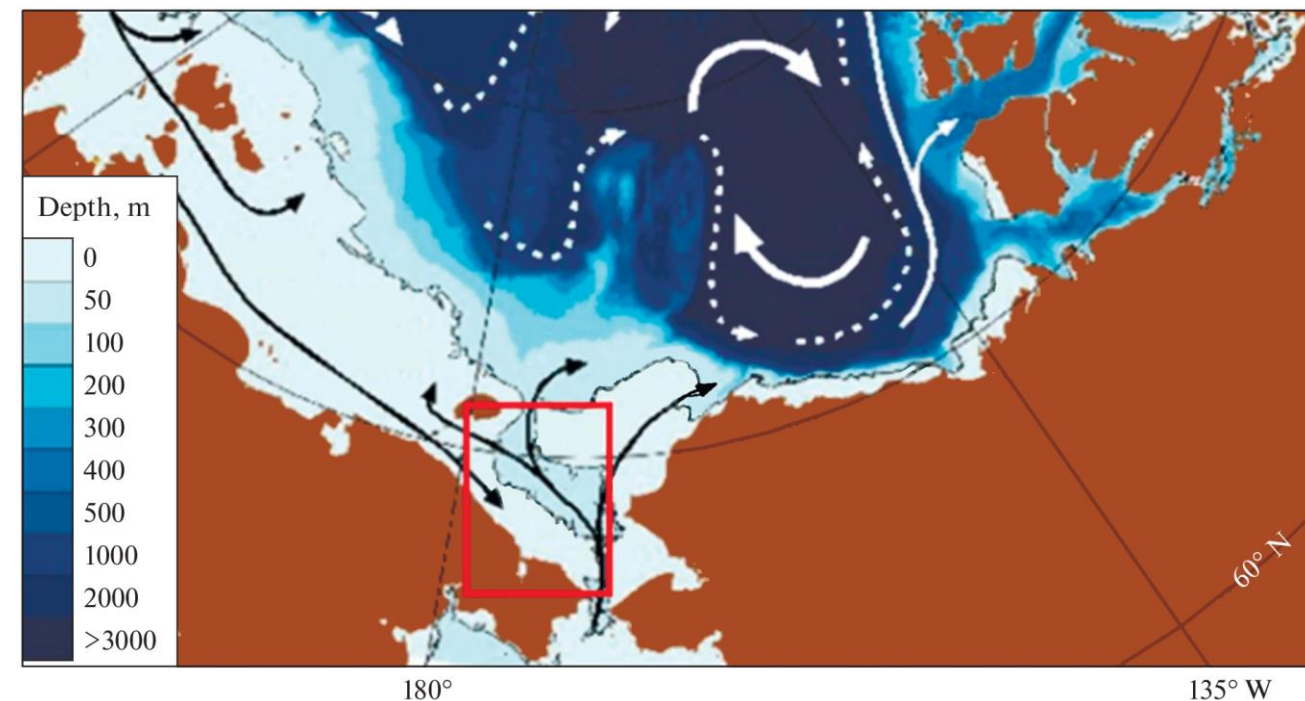
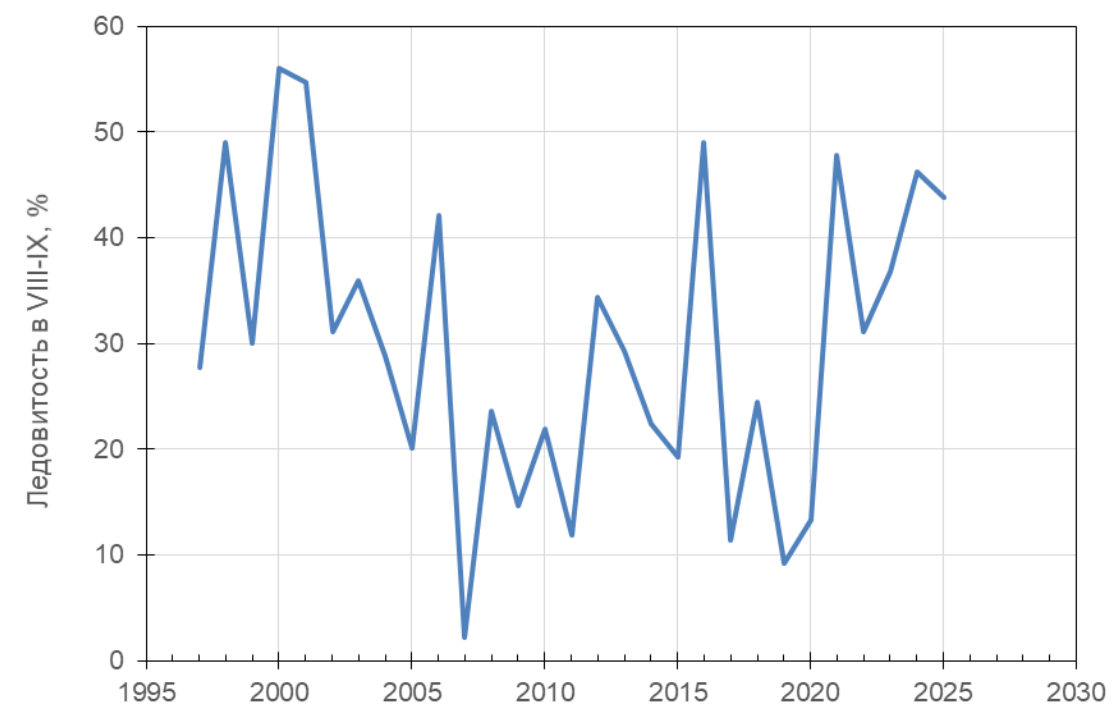


Схема течений в восточном секторе Арктики.
Выделен район исследования

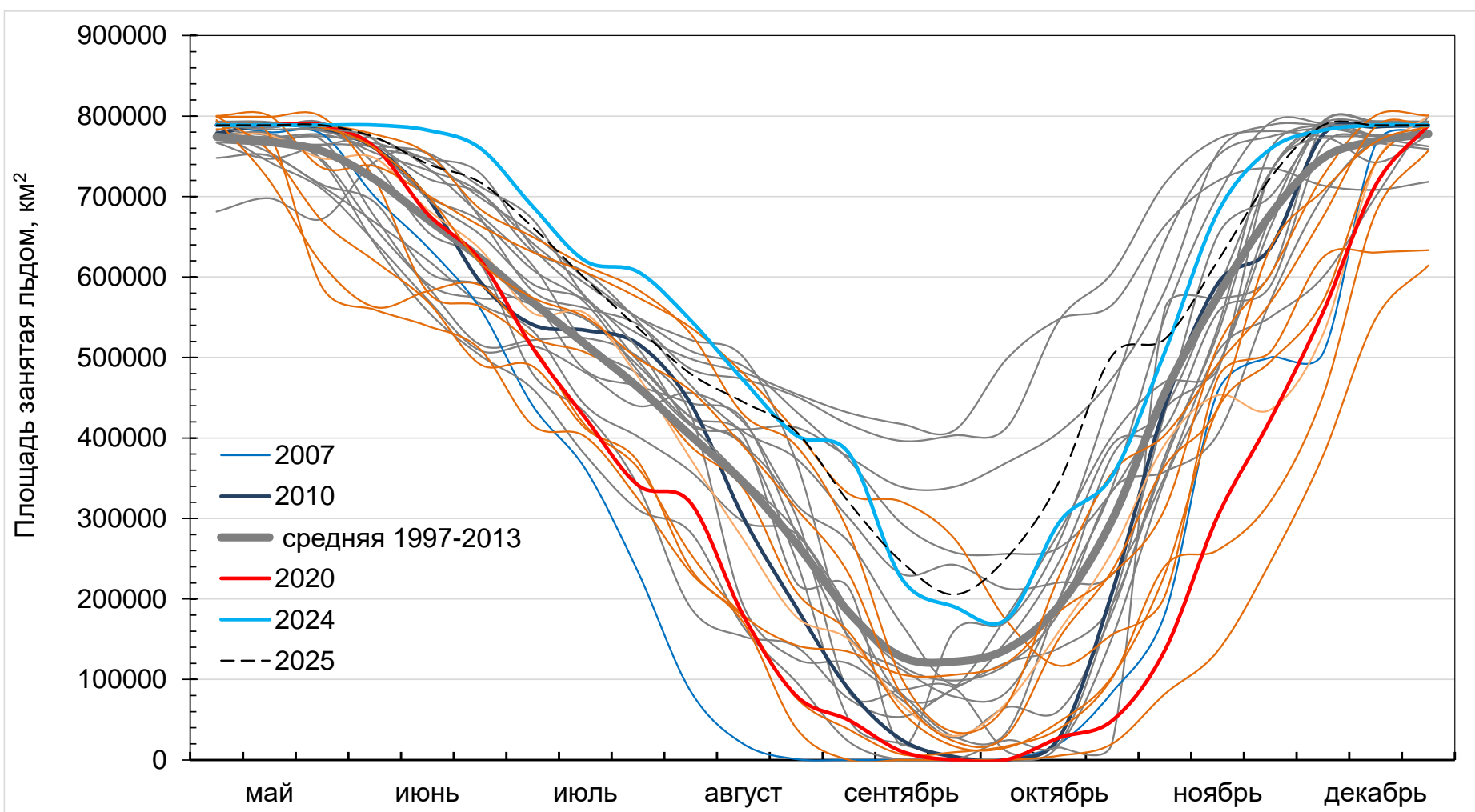
Чукотское море получает такой приток извне через Берингов пролив из Берингова моря, воды которого очень богаты биогенными элементами, так как находятся в конце глобального конвейера на котором глубинные воды накапливают продукты деструкции органики по пути через все океаны планеты

Климатические изменения в Чукотском море

Современные быстрые изменения климата в Чукотском море касаются прежде всего ледяного покрова: в последние годы летом оно на короткое время полностью освобождается от льда, что приводит к росту солёности и ослаблению плотностной стратификации. Адвекция берингоморских вод через Берингов пролив усиливается вследствие перестройки атмосферной циркуляции и течений в северной части Берингова моря.

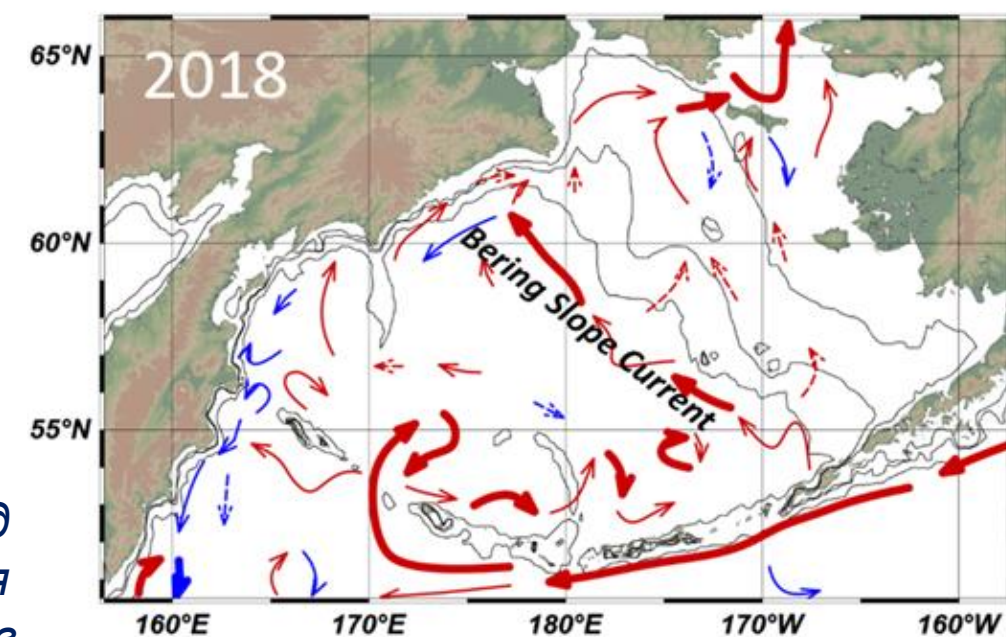
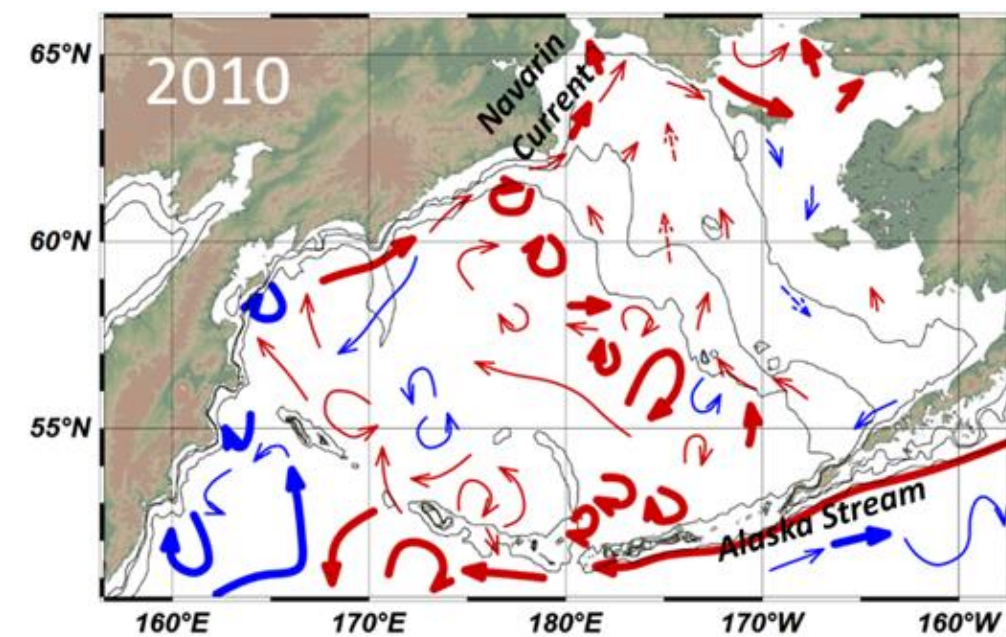


Межгодовые изменения средней за август-сентябрь ледовитости Чукотского моря



Сезонный ход ледовитости Чукотского моря в 1997-2025 гг. по спутниковым данным NOAA (NSIDC Sea Ice Index, Version 3)

Типичные схемы циркуляции вод на поверхности Берингова моря до 2014 г. и в конце 2010-х годов





Цель исследования:

определить где и в каком объёме в разные годы утилизируются биогенные элементы, поступающие в Чукотское море через Берингов пролив

1. Кратко о методе количественной оценки биогенных потоков в адвективной системе
2. Изменения концентрации биогенов (на примере фосфора) в потоке из Берингова пролива на северо-восток
3. Локализация высокопродуктивных зон в Чукотском море, формируемых привнесёнными извне биогенными веществами, в зависимости от стратификации вод
4. Перестройка экосистемы юго-восточной части Чукотского моря, подверженной адвекции берингоморских вод, в условиях потепления и усиления адвекции

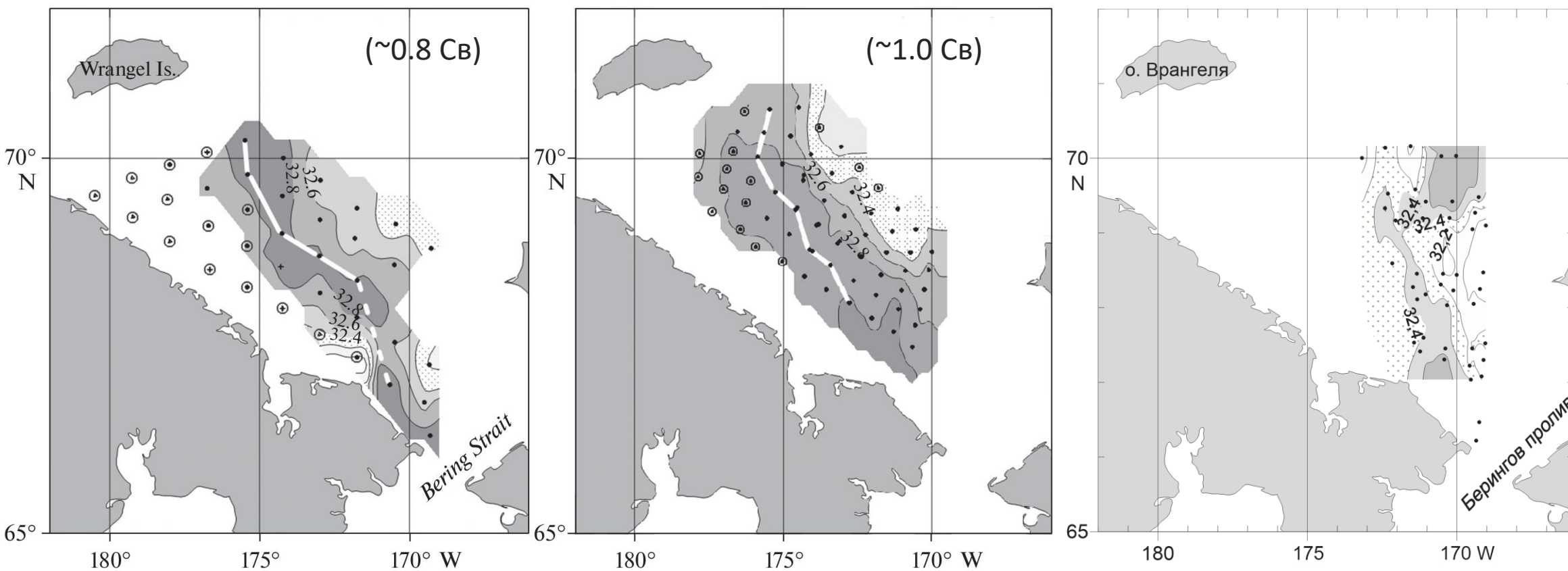
Материалы для анализа

Гидрохимические данные получены в экспедициях ТИНРО летом 2010, 2020 и 2024 гг. Поток берингово-морских вод на северо-запад наблюдается в поверхностном (ПСА) и подповерхностном (ППСА) слоях

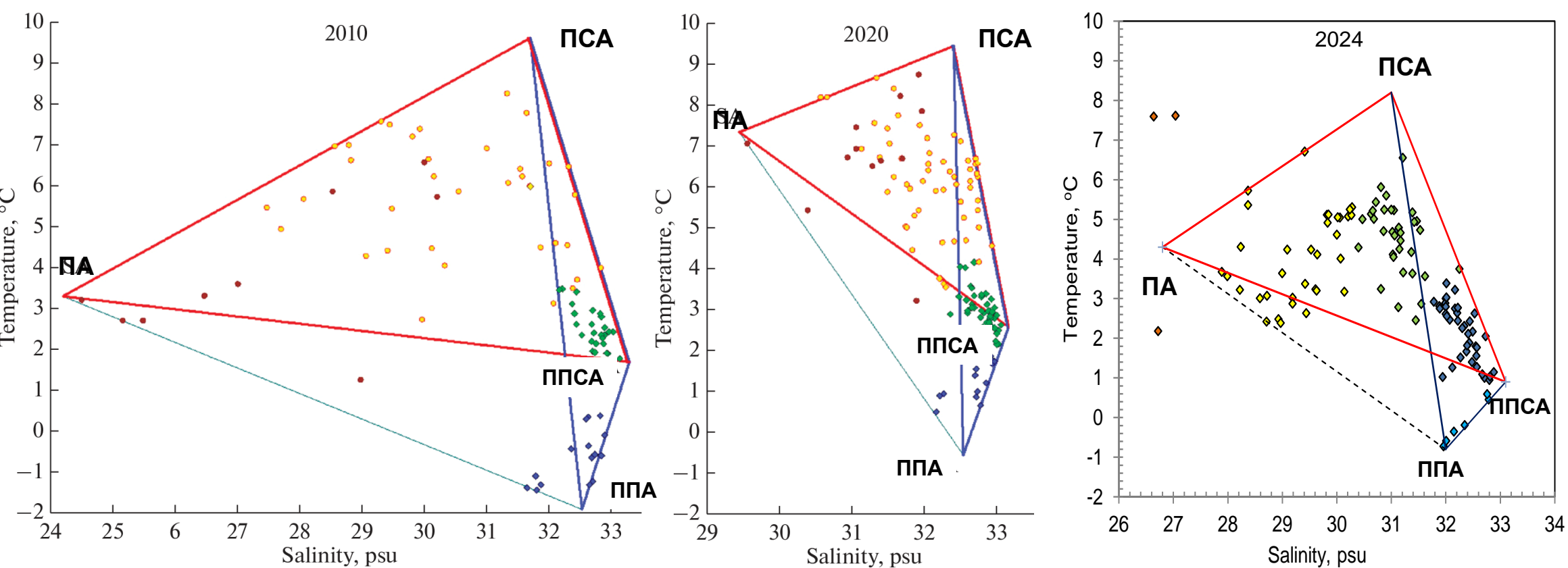
7-16 сентября, 2010

26 августа – 5 сентября, 2020

31 августа – 8 сентября, 2024



Распределение средней по подповерхностному слою солёности в разные годы. Белые линии – условные разрезы вдоль стрежня потока берингово-морских вод



TS-диаграммы рассеяния средних по слоям показателей на станциях съёмки. Показаны треугольники смешения для поверхностного и подповерхностного слоёв и TS-индексы водных масс

Кратко о методе на примере фосфора

Баланс минерального фосфора (DIP) в адвективном потоке складывается из консервативной компоненты dC_p (связанный с перемешиванием с окружающими водами) и неконсервативной компоненты dP (потребление при продукции или поступление при деструкции органического вещества).

$$\longrightarrow dC = dC_p - dP$$

dC – изменение концентрации неорганического фосфора
 dC_p – потенциальное изменение концентрации фосфора, обусловленное смешением
 dP – продукция/деструкция ОВ

Между станциями в потоке:

dC измеряем как изменение средней в слое (водной массе) концентрации;
 dC_p рассчитываем как изменения потенциальной концентрации, пропорциональные изменениям температуры и солёности слоя (водной массы);
 dP определяем как остаточный член уравнения.

Например, изменения температуры, солёности и потенциальной концентрации фосфора между станциями потока в подповерхностном

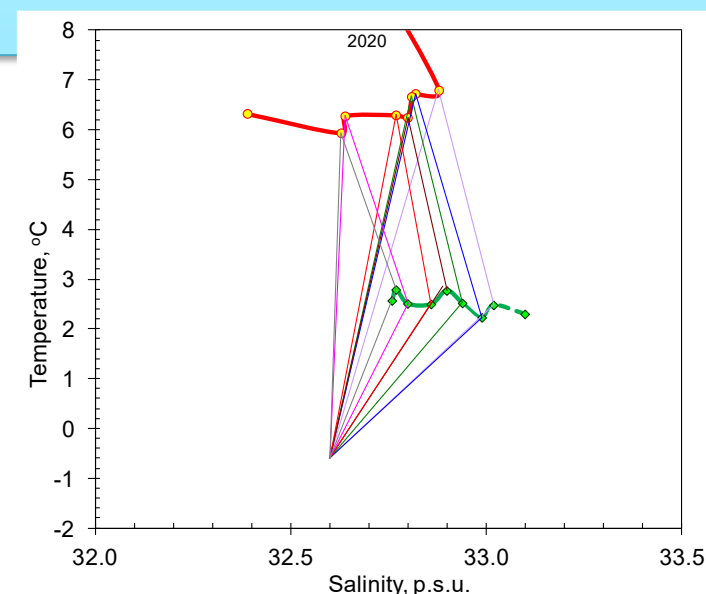
$$\begin{cases} dT_{ПП} = dR_{П} (T_{П} - T_{ПП}) + dR_{ППА} (T_{ППА} - T_{ПП}) \\ dS_{ПП} = dR_{П} (S_{П} - S_{ПП}) + dR_{ППА} (S_{ППА} - S_{ПП}) \\ dC_{pПП} = dR_{П} (C_{pП} - C_{pПП}) + dR_{ППА} (C_{pППА} - C_{pПП}) \end{cases}$$

Аналогично для поверхностного слоя:

$$dC_{pП} = dR_{ПП} (C_{pПП} - C_{pП}) + dR_{ПА} (C_{pПА} - C_{pП})$$

$T_{П}, S_{П}, C_{pП}$ – величины этих параметров в поверхностном слое потока перед прохождением дистанции между станциями;
 $T_{ПП}, S_{ПП}, C_{pПП}$ – величины этих параметров в подповерхностном слое потока перед прохождением той же дистанции;
 $T_{ППА}, S_{ППА}, C_{pППА}$ – величины этих параметров в окружающей подповерхностной арктической водной массе (ППА);
 $\bullet R_{П}, R_{ППА}$ – примеси поверхностных вод и ППА в составе подповерхностного слоя после прохождения той же дистанции, находятся по треугольнику смешения для каждой пары станций «графическим» методом

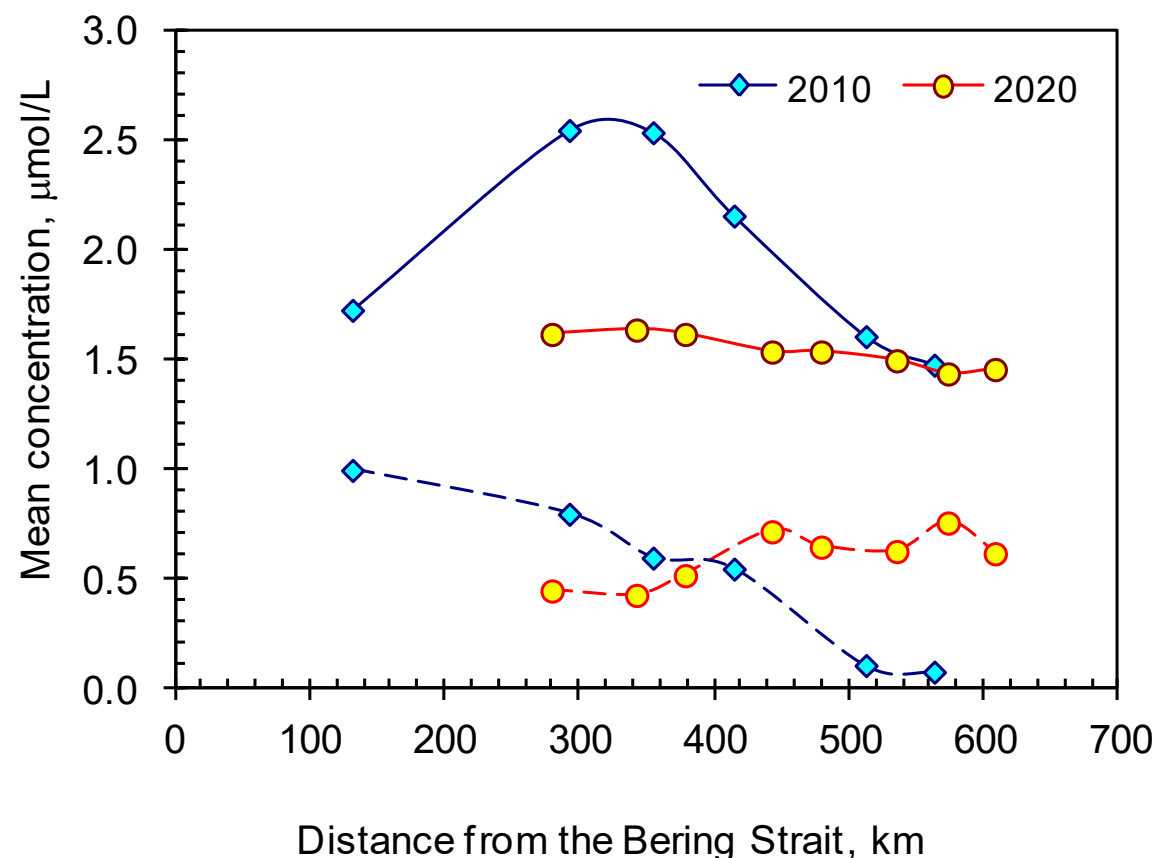
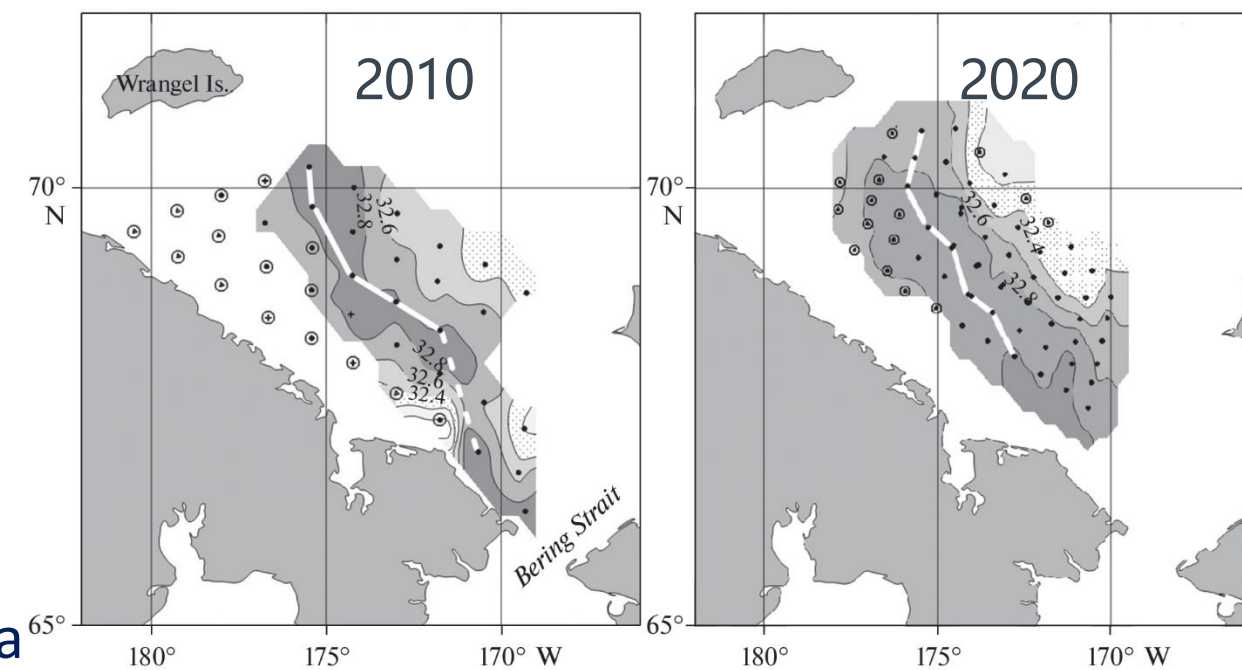
Дополнительно оценивали наличие процессов продукции либо деструкции органического вещества приближённым методом АОУ (apparent oxygen utilization) по префициту либо дефициту растворённого кислорода



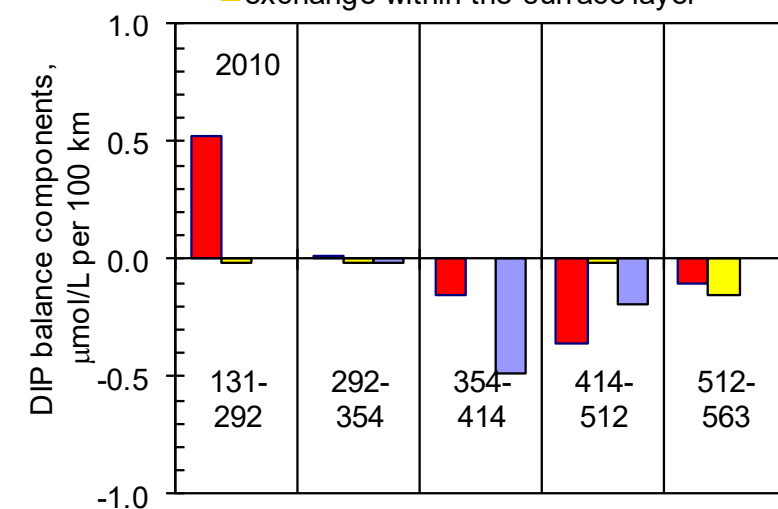
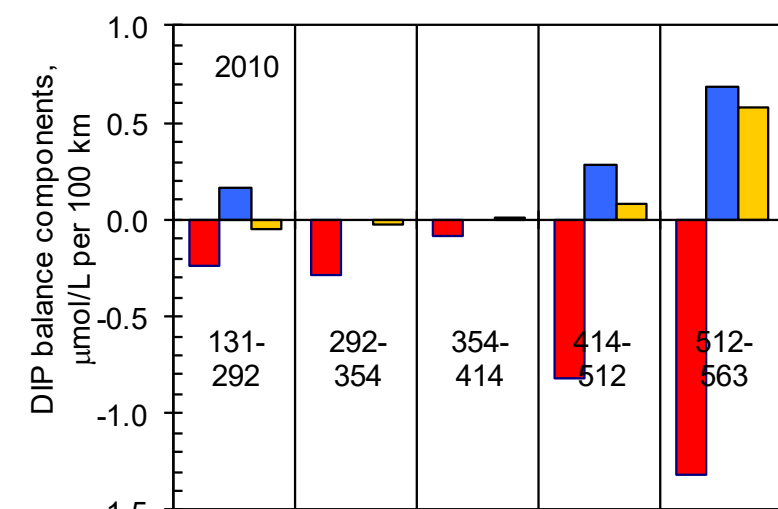
Изменение концентрации фосфора по потоку берингоморских вод

По мере удаления от Берингова пролива концентрация фосфора в потоке меняется разнонаправленно под действием физических и биогеохимических процессов.

В 2010 г., в условиях умеренной адвекции, вблизи пролива потреблялся фосфор из поверхностного слоя, при этом его концентрация в нижележащем слое возрастала из-за деструкции новообразованного органического вещества. На удалении 400-600 км от пролива потребление фосфора возобновилась благодаря его перетоку из подповерхностного слоя. По-видимому, такая ситуация была типичной для ледовитых лет (до 2013)



Изменения средних по подповерхностному (сплошные линии) и поверхностному (пунктир) слоям концентраций минерального фосфора в потоке берингоморских вод на северо-восток от Берингова пролива

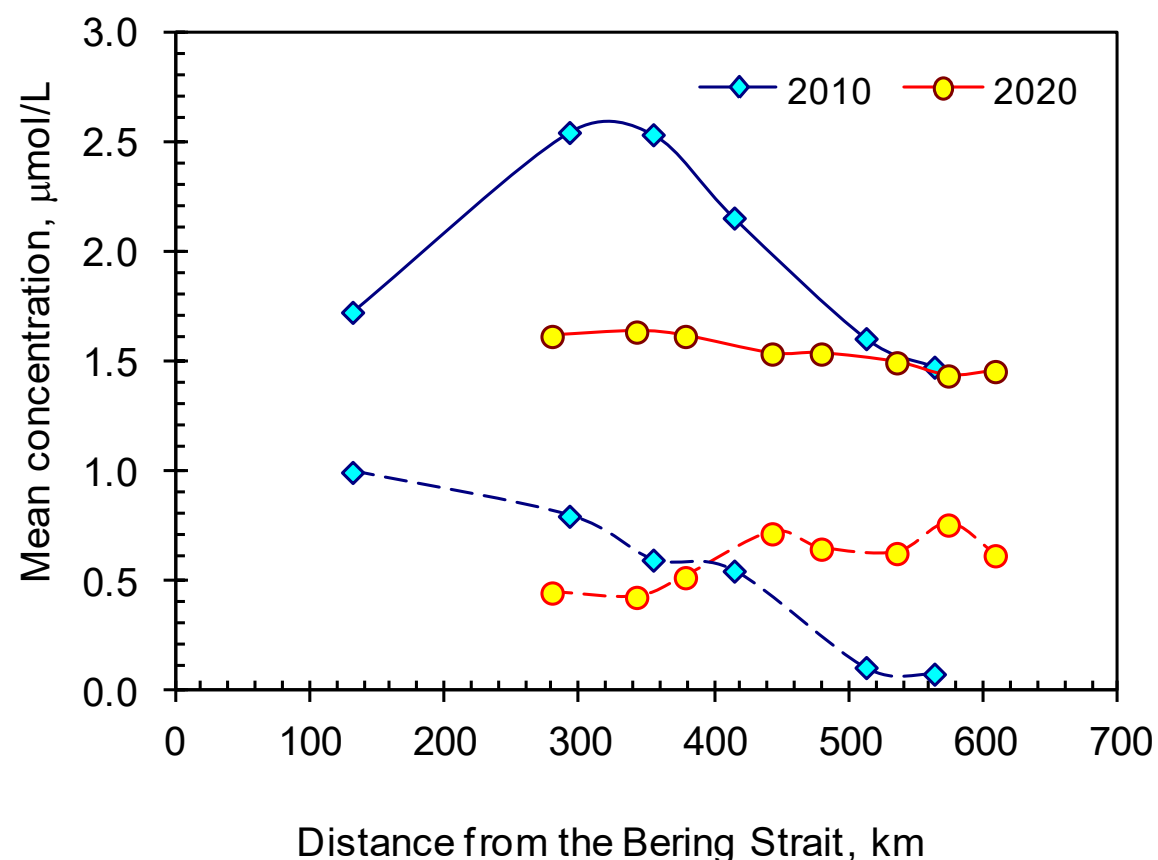
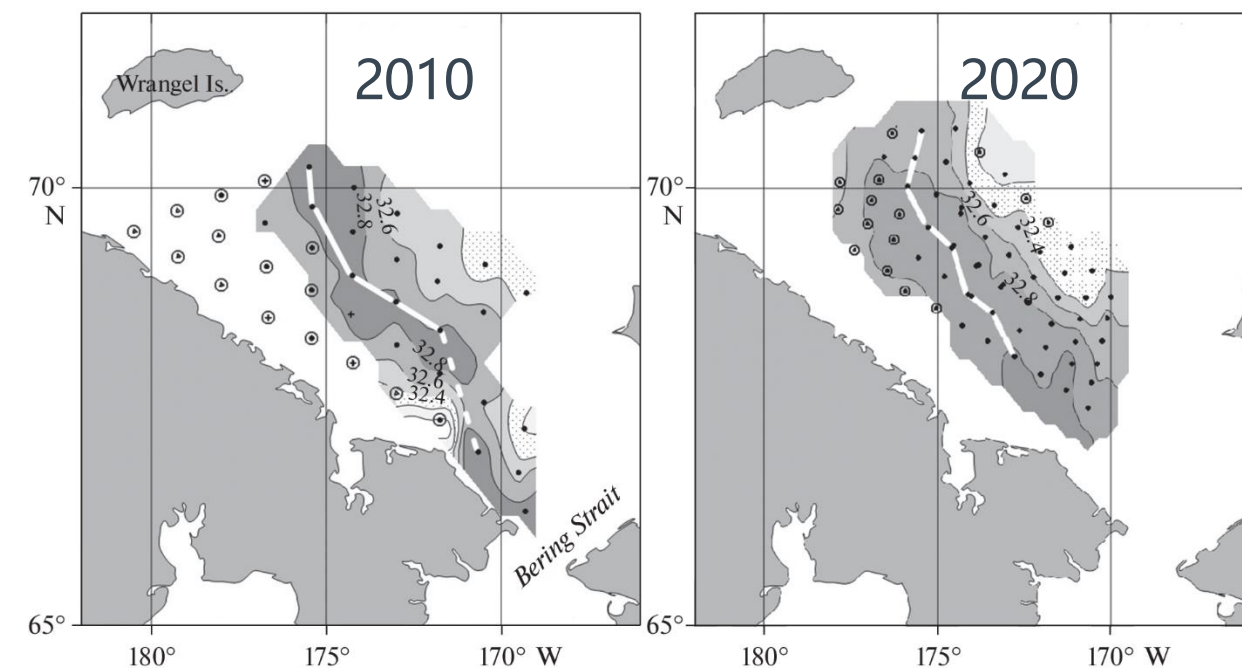


Компоненты баланса фосфора в поверхностном и подповерхностном слоях потока берингоморских вод в 2010 г.

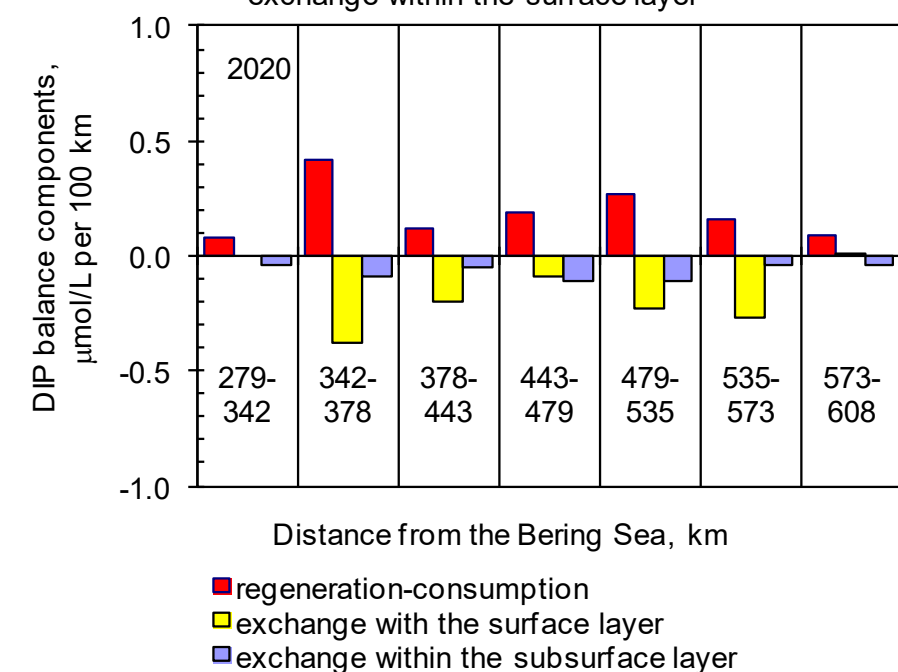
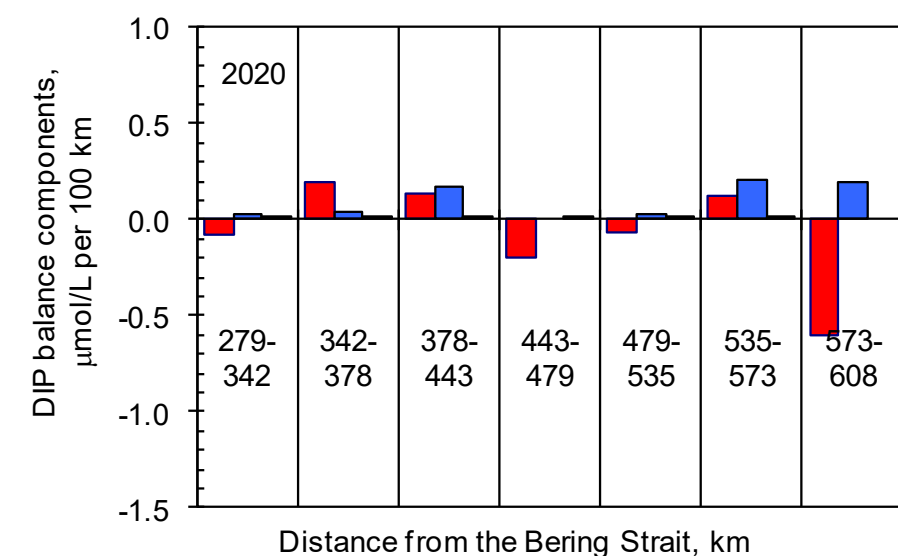
Изменение концентрации фосфора по потоку берингоморских вод

По мере удаления от Берингова пролива концентрация фосфора в потоке меняется разнонаправленно под действием физических и биогеохимических процессов.

В 2020 г. после прохождения пролива фосфор не потреблялся ни в поверхностном, ни в подповерхностном слоях, признаки фотосинтеза в поверхностном слое появились лишь в ≈ 400 и ≈ 600 км от пролива. Такая ситуация рассматривается как типичная для условий мощного потока через пролив.



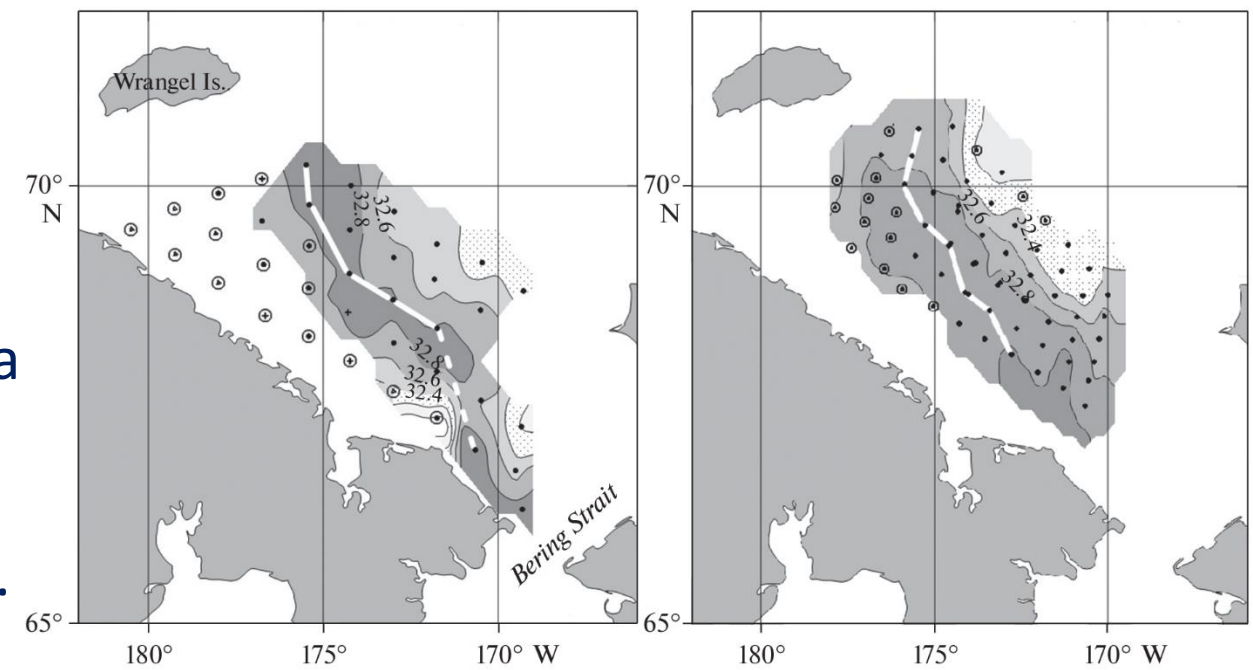
Изменения средних по подповерхностному (сплошные линии) и поверхностному (пунктир) слоям концентраций минерального фосфора в потоке берингоморских вод на северо-восток от Берингова пролива



Компоненты баланса фосфора в поверхностном и подповерхностном слоях потока берингоморских вод в 2020 г.

Баланс кислорода в потоке берингоморских вод

АОУ демонстрирует те же паттерны: в 2010 г. два максимума префицита кислорода – вблизи пролива и за 400-600 км от него, первый вблизи поверхности моря, второй – в пикноклине. В 2020 г. префицит на всём протяжении потока.



2010: умеренная адвекция (~0.8 Sv)

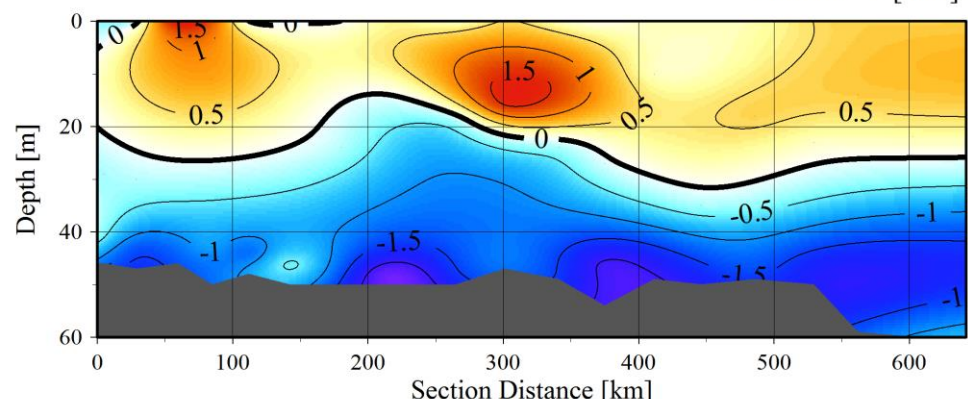
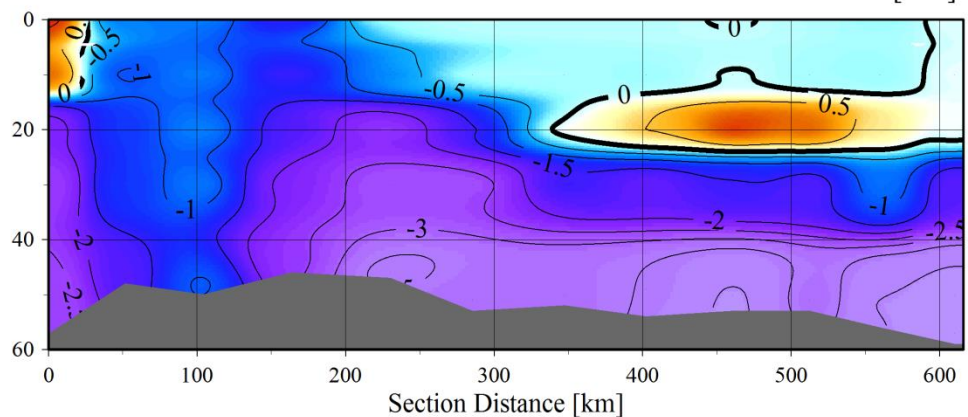
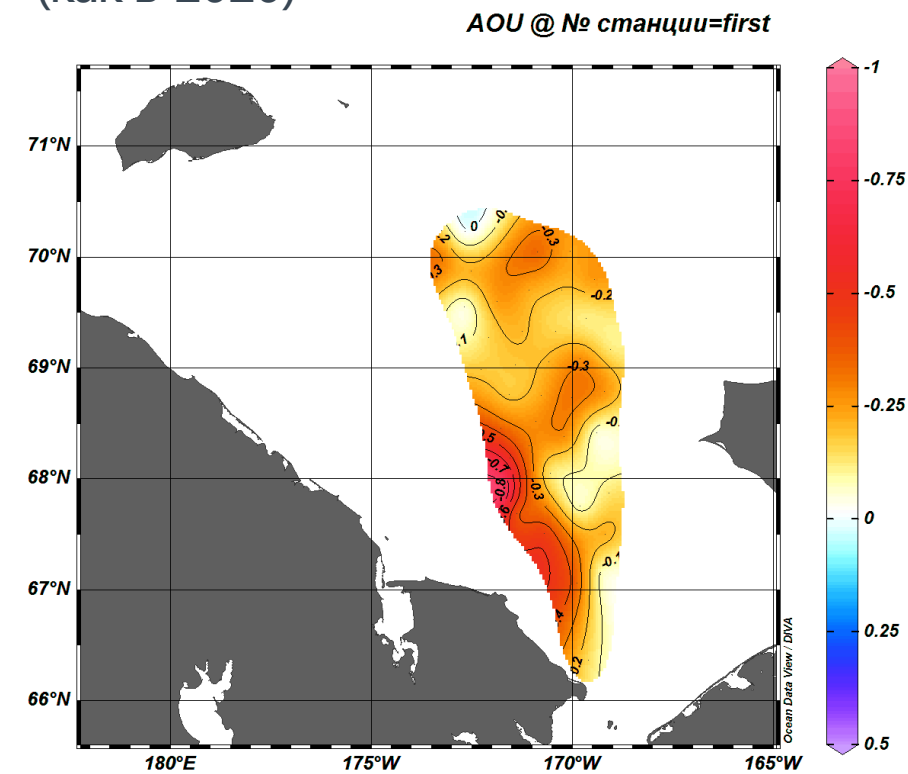
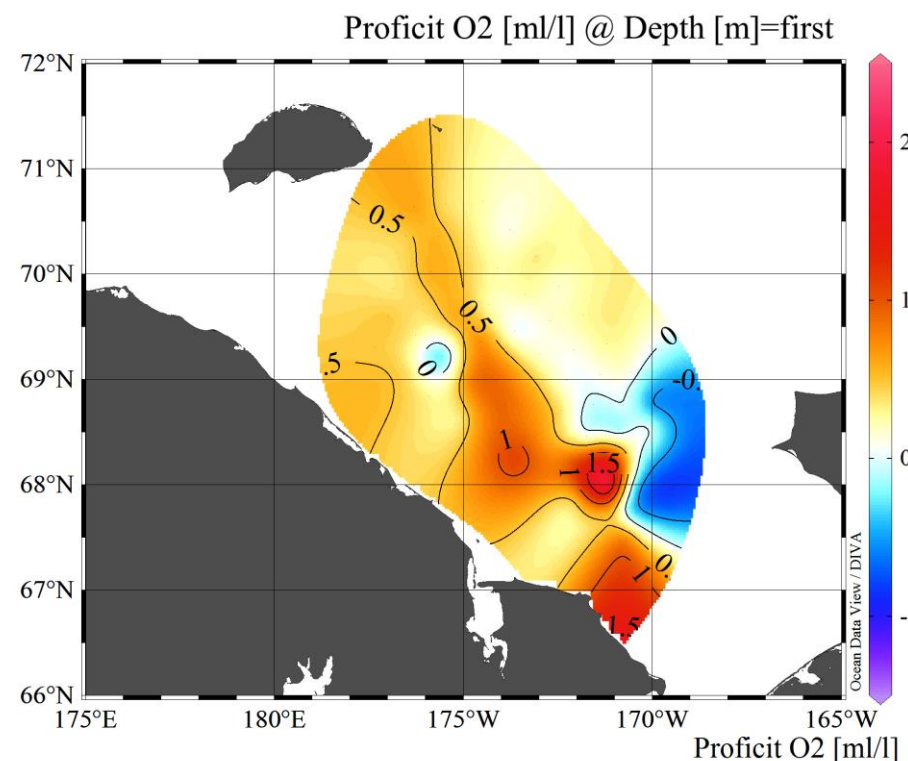
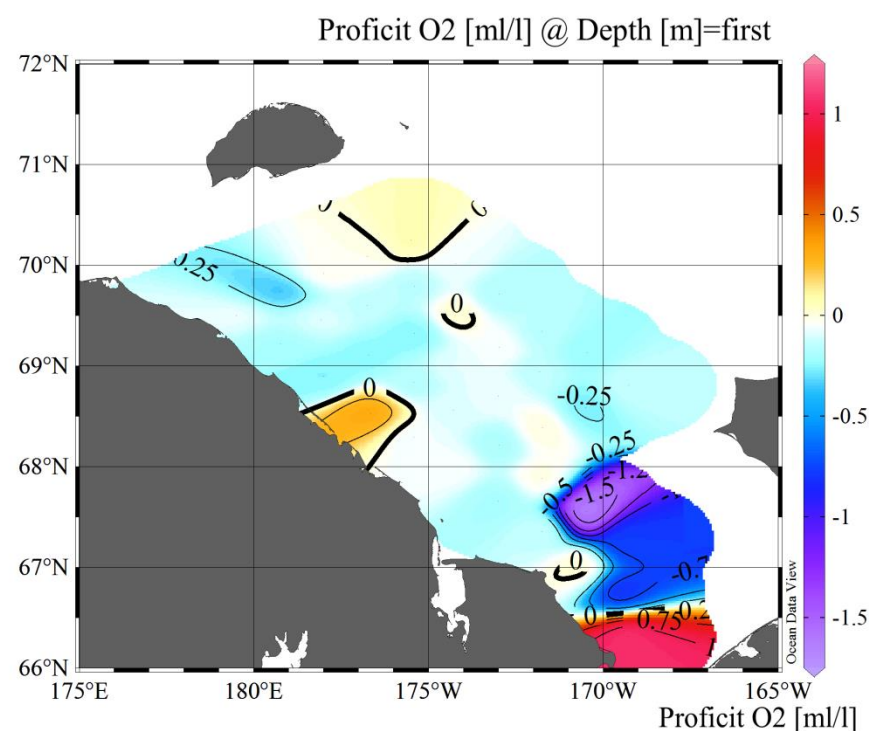
По АОУ: Продуцирование органического вещества вблизи Берингова пролива с выделением кислорода, затем перерыв и новый всплеск продукции близ о. Врангеля

2020: мощная адвекция (>1.0 Sv)

Вялое продуцирование органического вещества вблизи пролива, с небольшим префицитом кислорода, усиление продукции через 400-700 км от пролива

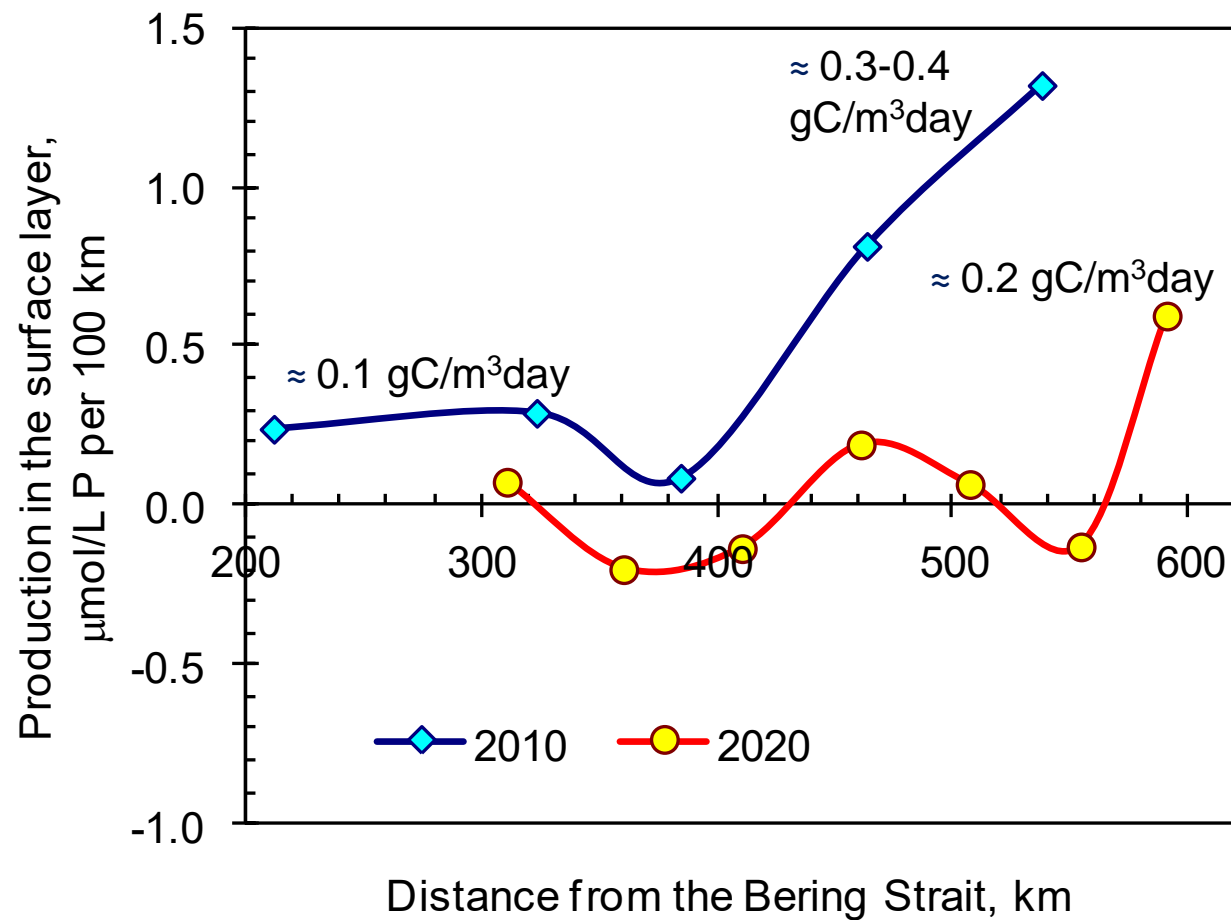
2024 (об адвекции нет данных)

Активное продуцирование вблизи пролива (как в 2010), с последующим ослаблением, но сохранением префицита кислорода (как в 2020)

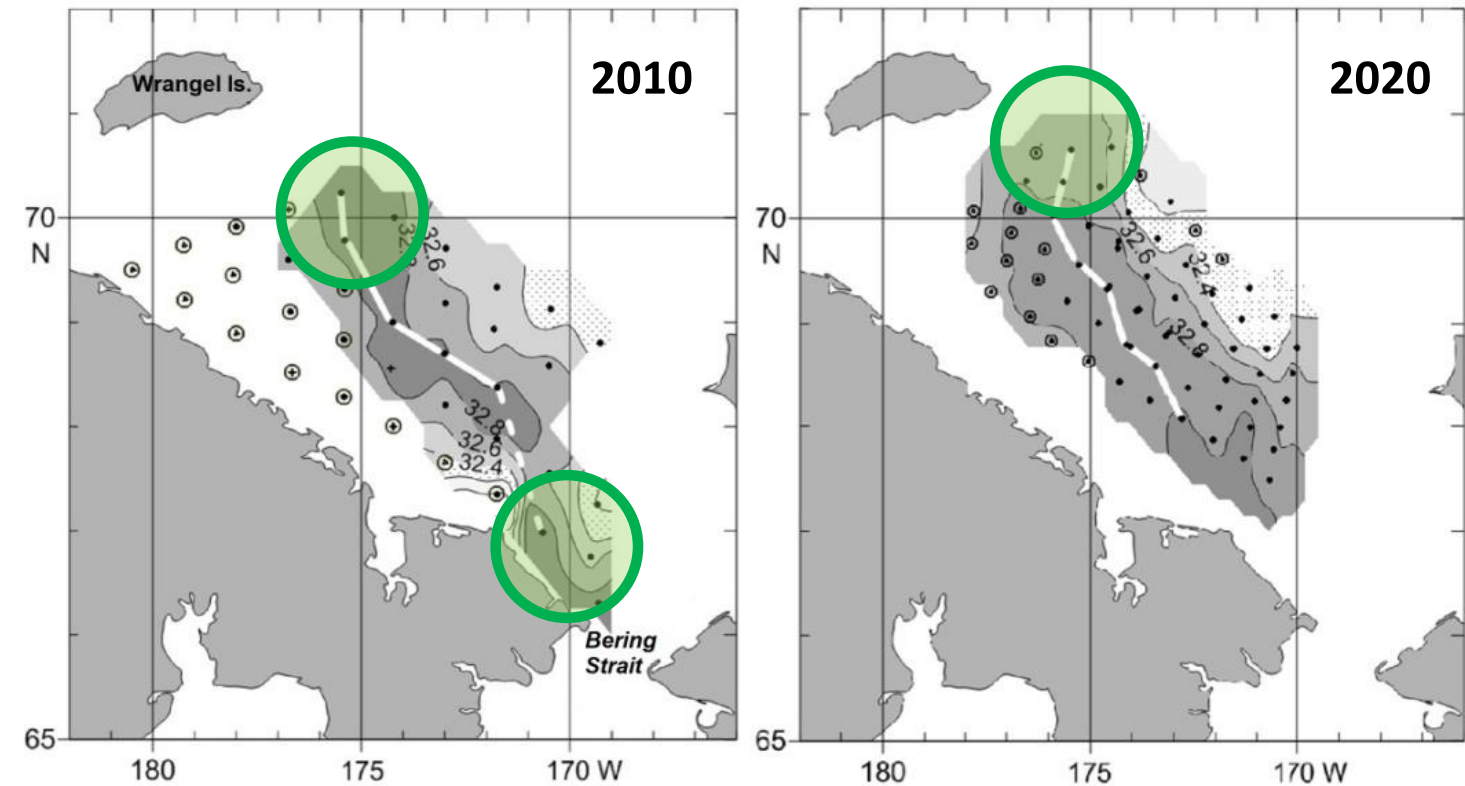


Распределение префицита кислорода на поверхности моря и по глубине на разрезах вдоль потока берингоморских вод в

Локализация высокопродуктивных зон



Оценки первичной продукции по потреблению фосфора в потоке из Берингова пролива в Чукотское море и положение локальных максимумов продукции



Судя по потреблению фосфора и префициту кислорода, в 2010 г. новое органическое вещество продуцировалось вблизи Берингова пролива и за 400-600 км от него, при этом вблизи расходовался запас фосфора в из поверхностного слоя, а дальше – из подповерхностного слоя.

В 2020 г. существенное продуцирование органического вещества началось лишь через 600 км после выхода потока из пролива, а запас биогенов из подповерхностного слоя вообще не расходовался и транспортировался дальше – в центральную Арктику

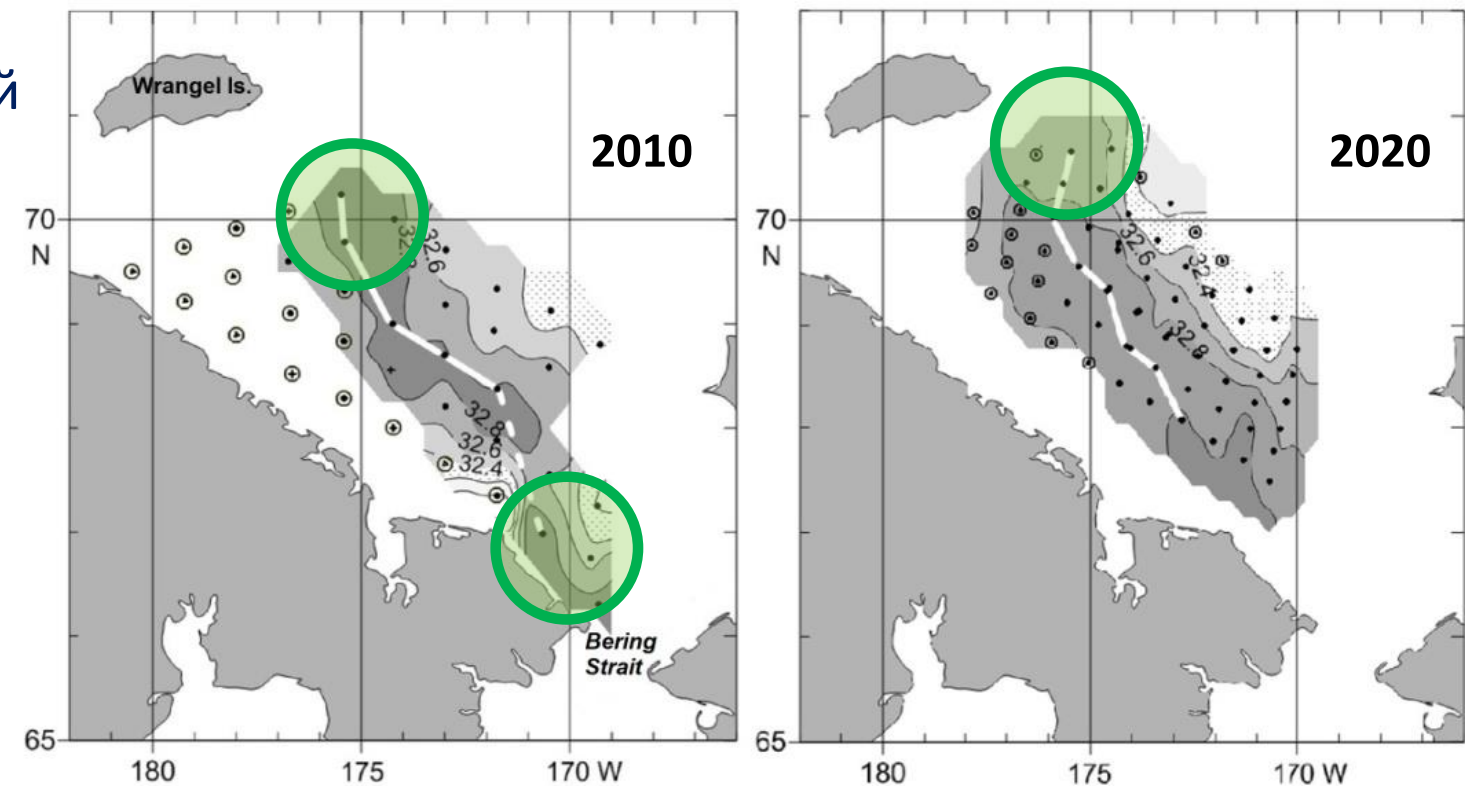
режим умеренной адвекции (~0.8 Св)

режим мощной адвекции (> 1,0 Св)

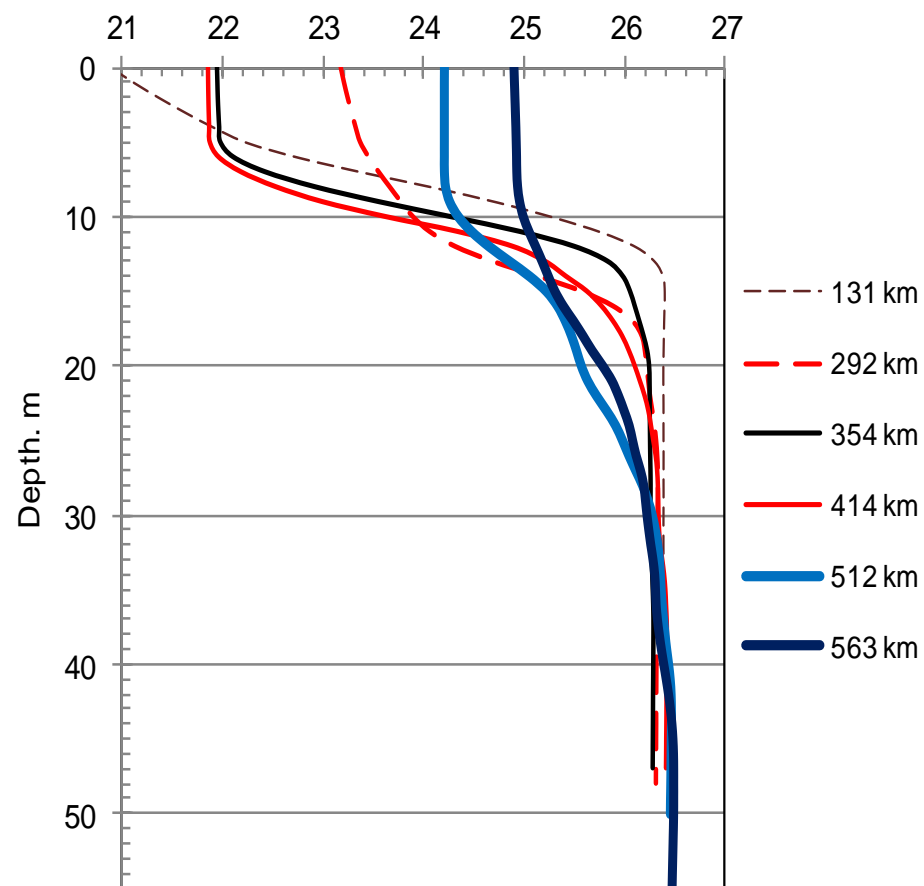
Локализация высокопродуктивных зон

Условие формирования ближней продуктивной зоны – развитие стратификации с $\text{grad } \sigma_{\theta} > 0.2 \text{ м}^{-1}$, необходимой для удержания фитопланктона в фотическом слое. В 2010 г. это произошло вблизи пролива, а в 2020 г. – за 500-600 км от него.

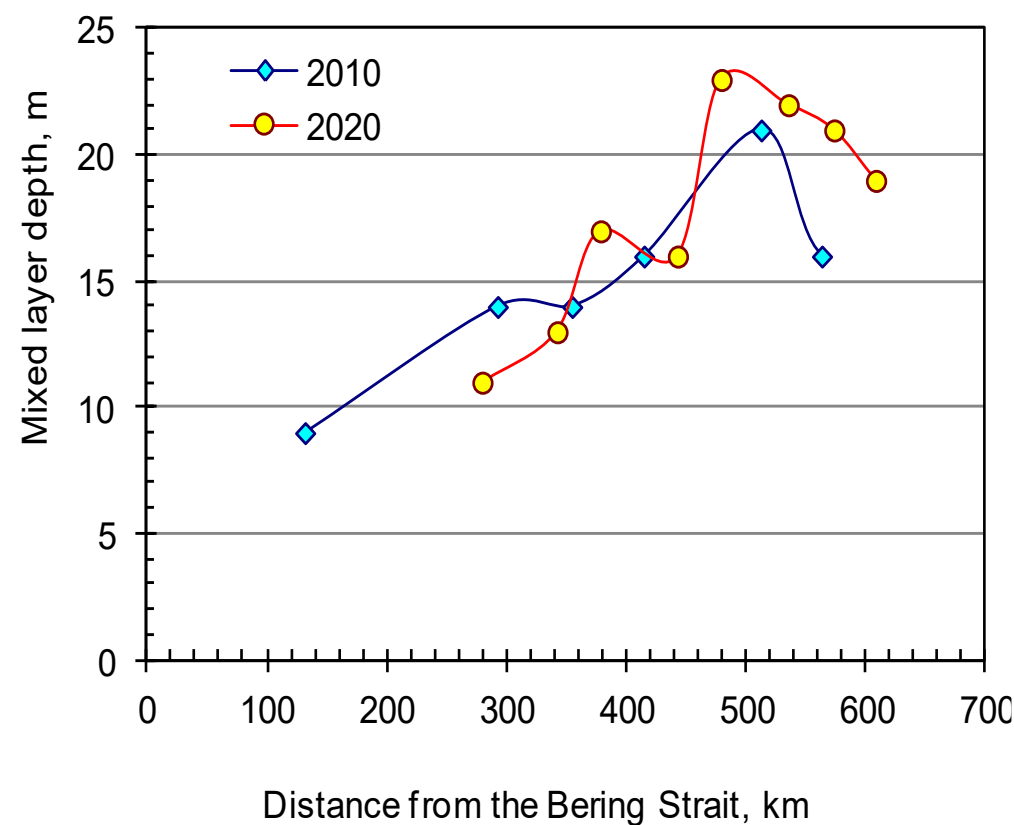
Напротив, дальняя продуктивная зона формируется в условиях разрушения стратификации, когда толщина ВКС превышает 20 м, а градиент плотности слабеет и развивается восходящий поток биогенных элементов. В 2010 г. это произошло за 400-500 км от пролива, а в 2020 г. – за пределами юго-западной части моря.



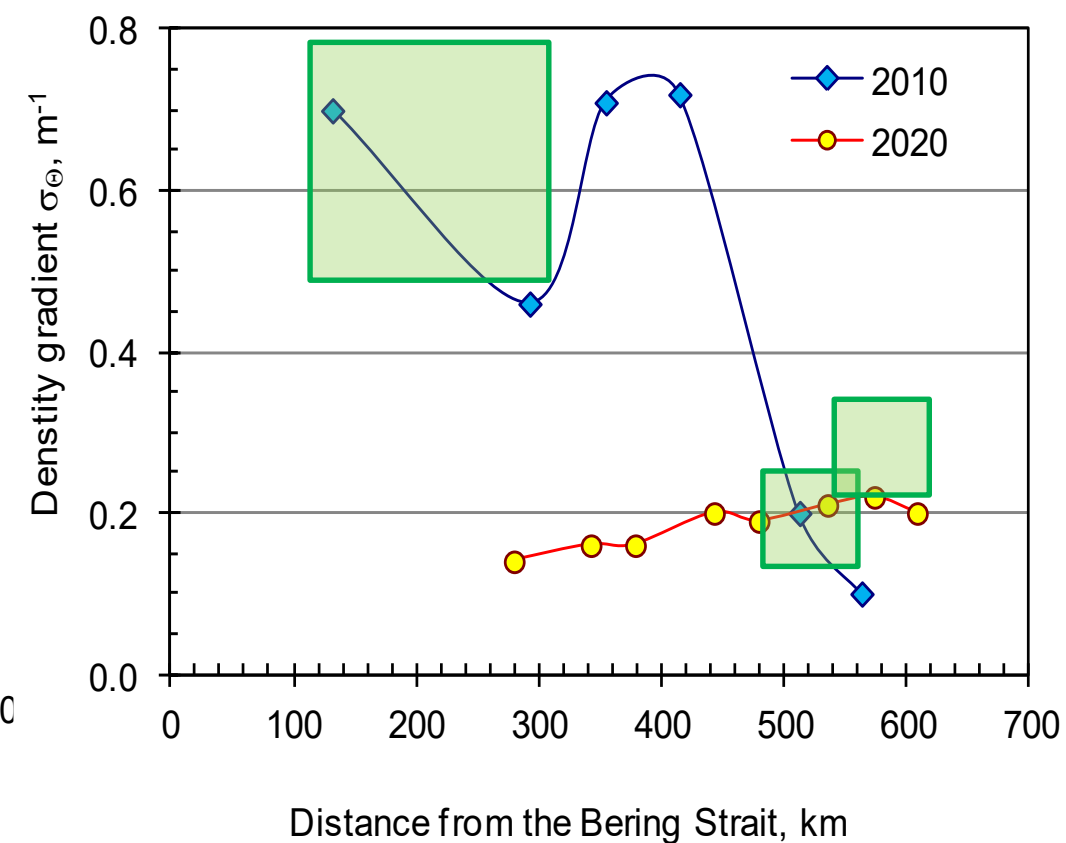
Specific density σ_{θ} , kg/m^3



Эволюция вертикального профиля условной плотности вдоль потока берингоморских вод в сентябре 2010 г. (НИС «ТИНРО»)



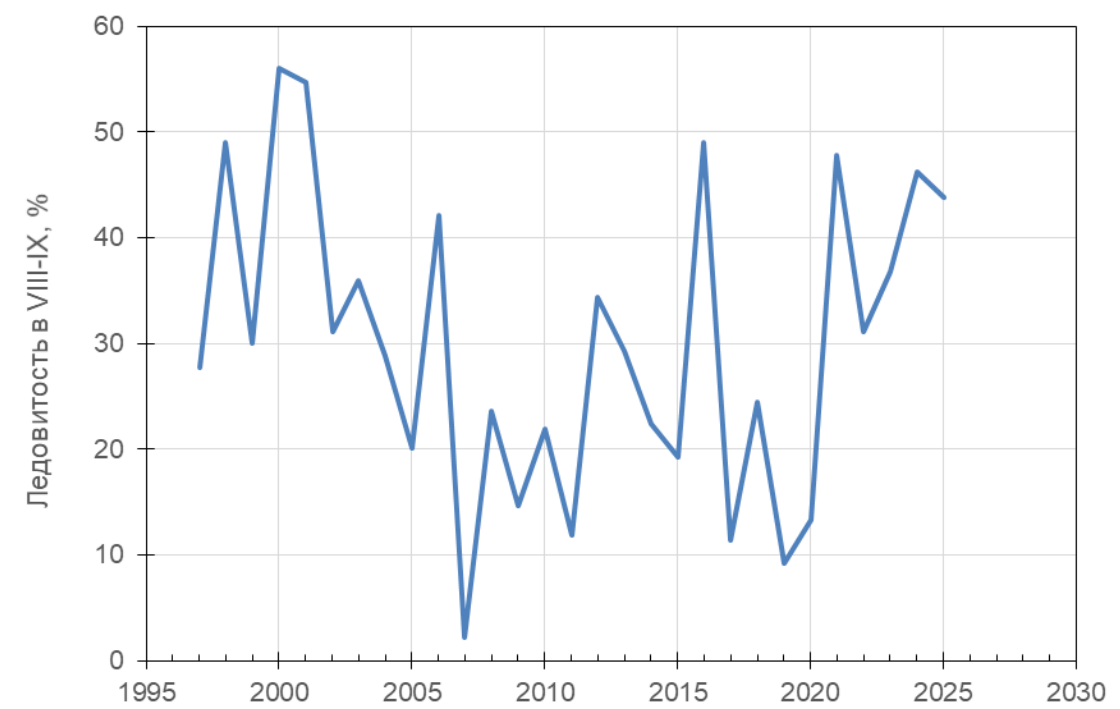
Постепенный рост толщины ВКС вдоль потока берингоморских вод в Чукотском море в сентябре 2010 и 2020 годов (НИС «ТИНРО»)



Ослабление градиента в пикноклине вдоль потока берингоморских вод в Чукотском море в сентябре 2010 г. (НИС «ТИНРО»)

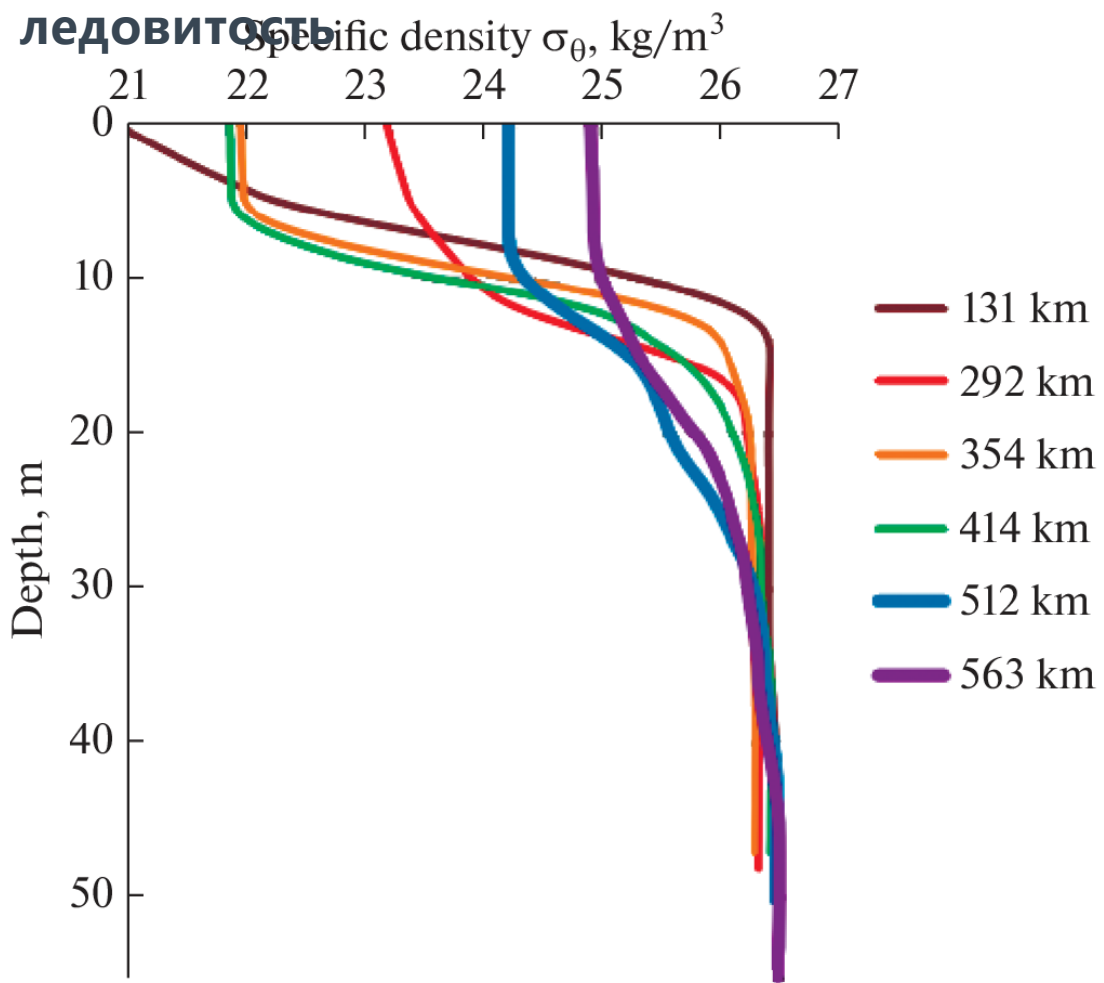
Локализация высокопродуктивных зон

В Чукотском море основной фактор, влияющий на летнюю стратификацию вод – это ледовитость. В условиях умеренной ледовитости (2010 и 2024 гг.) сильная стратификация привела к быстрому расходованию привнесённых потоком берингово-морских вод биогенных элементов. В малоледовитом 2020 г. слабая стратификация препятствовала их утилизации, поэтому биогены верхнего слоя израсходовались далеко не сразу, а их запас в подповерхностном слое вообще не был израсходован и транспортировался в центральную Арктику.

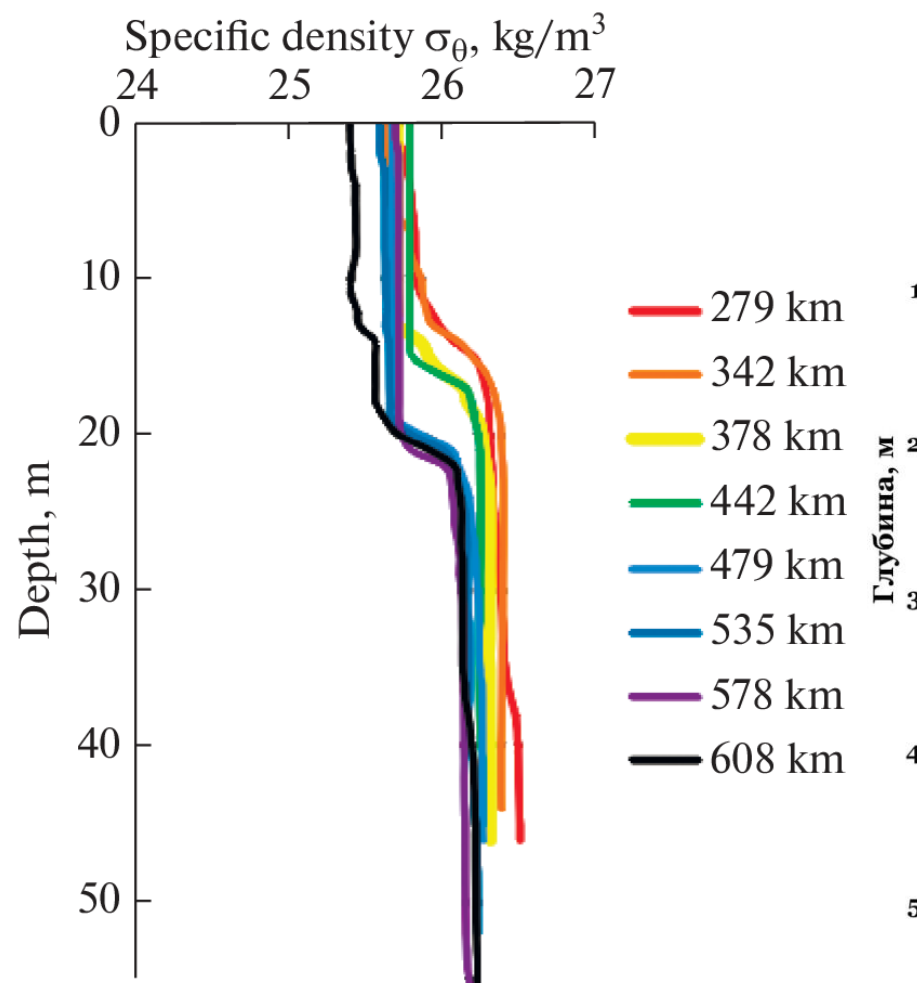


Межгодовые изменения средней за август-сентябрь ледовитости Чукотского моря

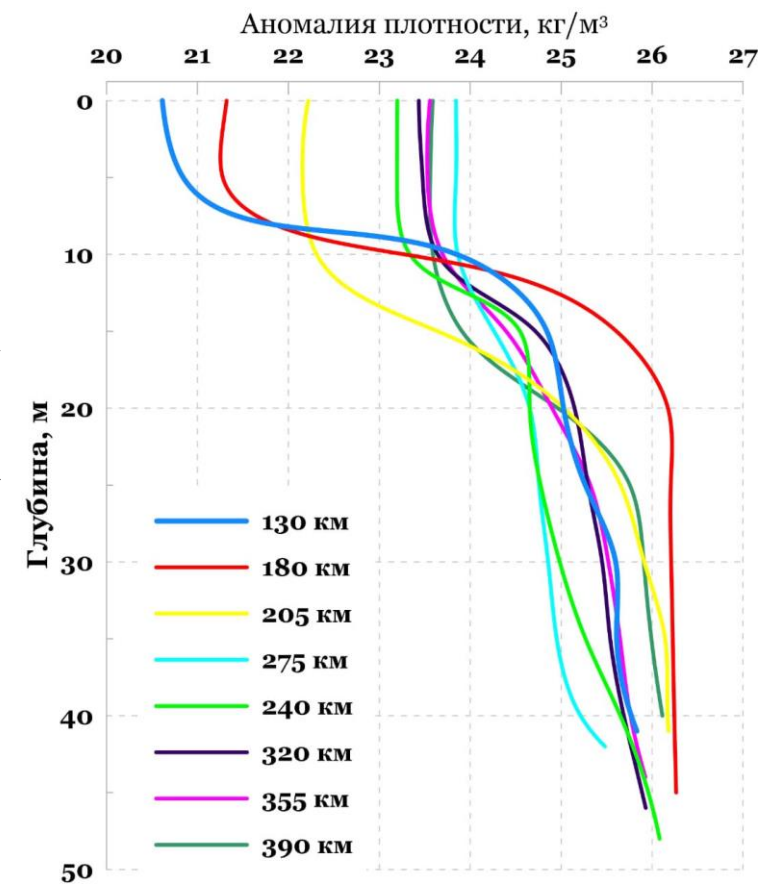
2010
умеренная ледовитость и адвекция



2020
малая ледовитость, мощная адвекция



2024
умеренная

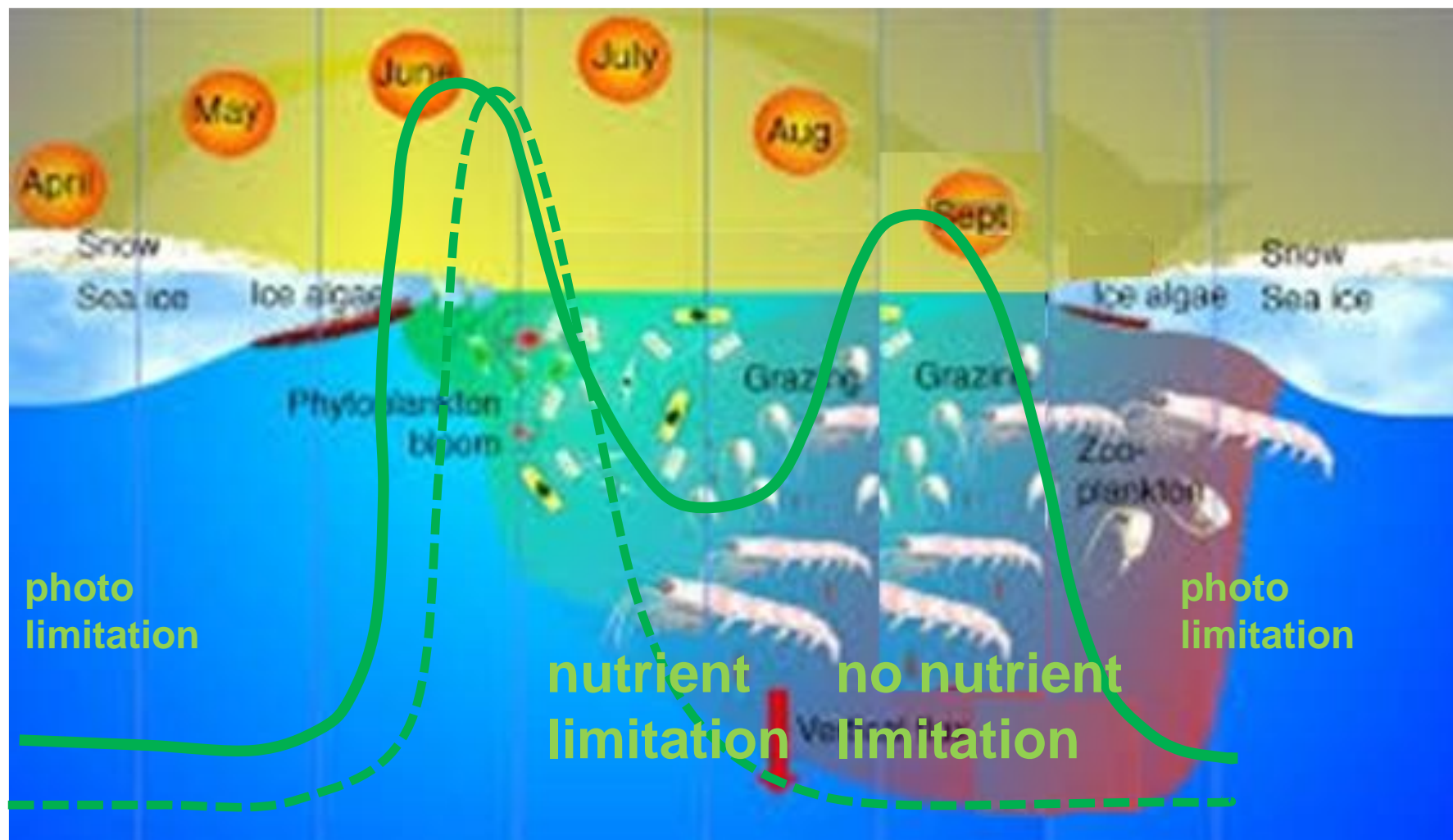
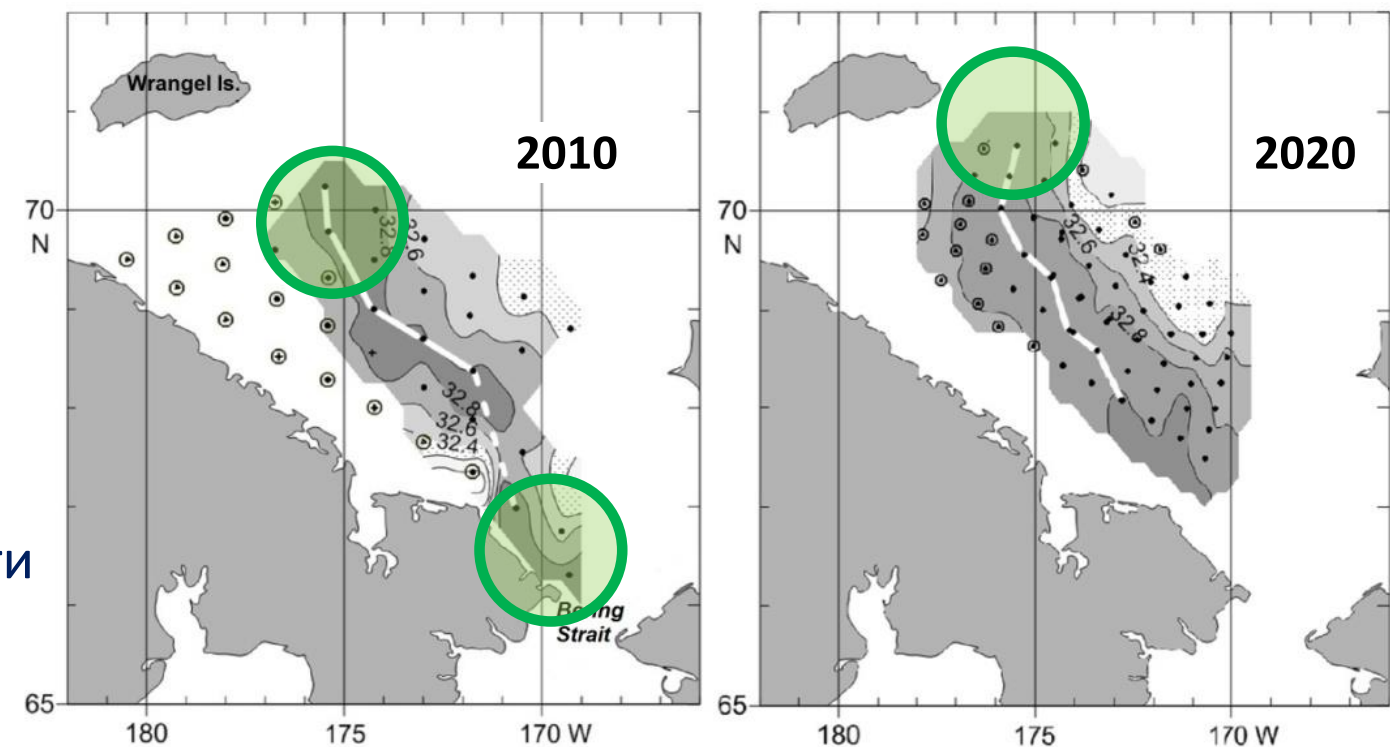


Эволюция вертикального профиля условной плотности вдоль потока берингово-морских вод в сентябре 2010, 2020 и 2024 гг. (НИС «ТИНРО»)

Перестройка экосистемы Чукотского моря при потеплении климата

Несмотря на несколько ледовитых последних лет, тенденция к потеплению климата сохраняется. Можно ожидать, что условия 2020 г. с полным освобождением Чукотского моря от льда будут повторяться. Как видно на примере 2020 г., в таких условиях приток биогенных элементов через Берингов пролив недоиспользуется. Значит ли это, что биопродуктивность юго-западной части Чукотского моря по мере потепления уменьшается?

– Все нет!



Уменьшается продуктивность в летний период отсутствия льда, то есть высокопродуктивное арктическое лето замещается низкопродуктивным летом, типичным для субарктических морей. Но сезон таяния льдов и сильной стратификации не исчезнет, он просто сместится на более ранние сроки. По мере усиления летнего прогрева вод появится второй продуктивный сезон – аналог субарктической осени (с другим механизмом продуктивности). Переход от полярного продукционного цикла с 1 пиком продуктивности к субполярному циклу с 2 пиками вероятно даст рост годовой продукции.



Ключевые моменты

Биогенный поток через Берингов пролив утилизируется в Чукотском море в два приёма: вначале расходуются биогены верхнего слоя, затем основной запас из подповерхностного слоя

Локализация продуктивных зон в потоке берингоморских вод определяется его плотностной стратификацией, которая зависит от распреснения поверхности Чукотского моря

Потепление Чукотского моря сопровождается усилением притока биогенов, но мешает их утилизации, из-за чего биопродуктивность ЮЗ части моря в летний сезон снижается

Годовой биогеохимический цикл в Чукотском море меняется с изменениями климата – появляется сезонность, напоминающая субарктическую, но обеспечиваемая другим механизмом