

Колебания вертикальной плотностной стратификации вод
у юго-восточного побережья Приморья
в связи с динамическими структурами
в северо-западной части Японского моря

Трусенкова О.О.¹, Островский А.Г.²,
Лазарюк А.Ю.¹, Лобанов В.Б.¹

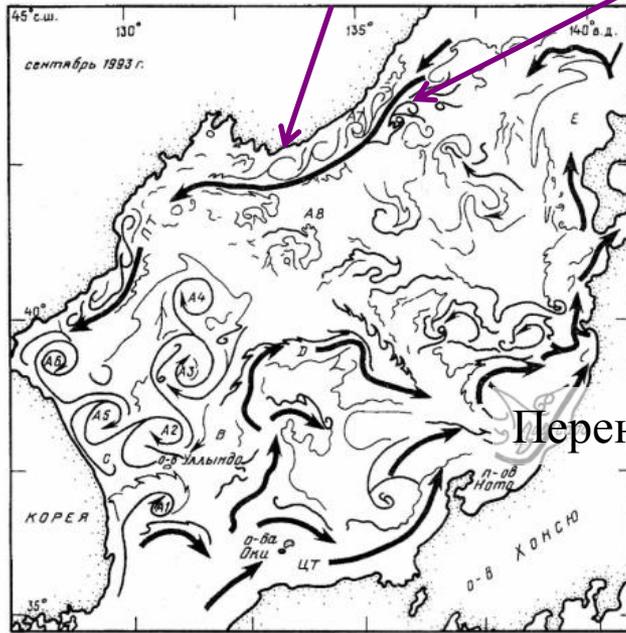
¹Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

*17-я Всероссийская Открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА», 11–15 ноября 2019 г., г. Москва, ИКИ РАН*

Район исследования: склон у юго-восточного побережья Приморья

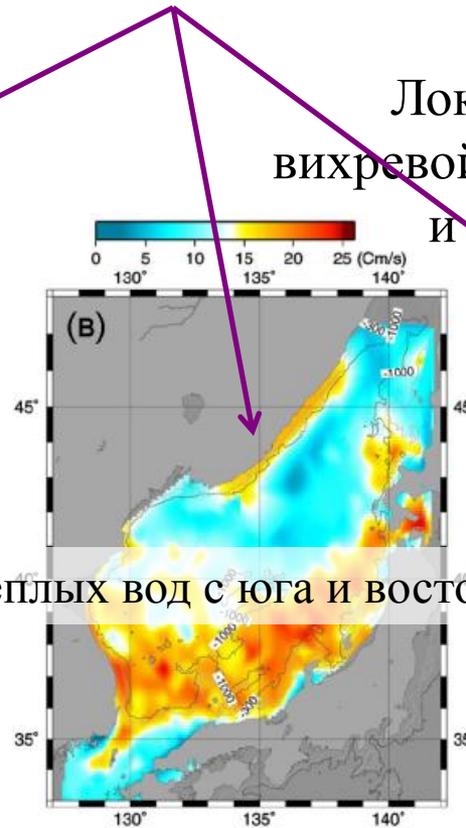
Перемещение
динамических структур
с течением:
склоновые вихри и волны



ИК-изображения
(Гинзбург и др., 1998)

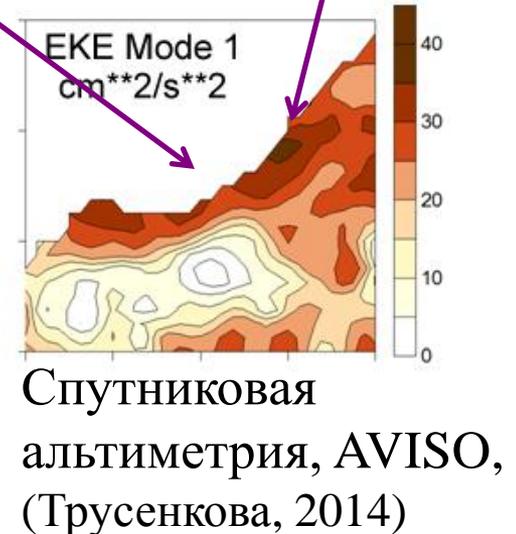
(Никитин и др., 2002; Danchenkov et al., 2006; Лобанов и др., 2007; Никитин и др., 2009; Пономарев и др., 2011; Ладыченко, Лобанов, 2013; Никитин, Дьяков, 2016)

Зона Приморского течения



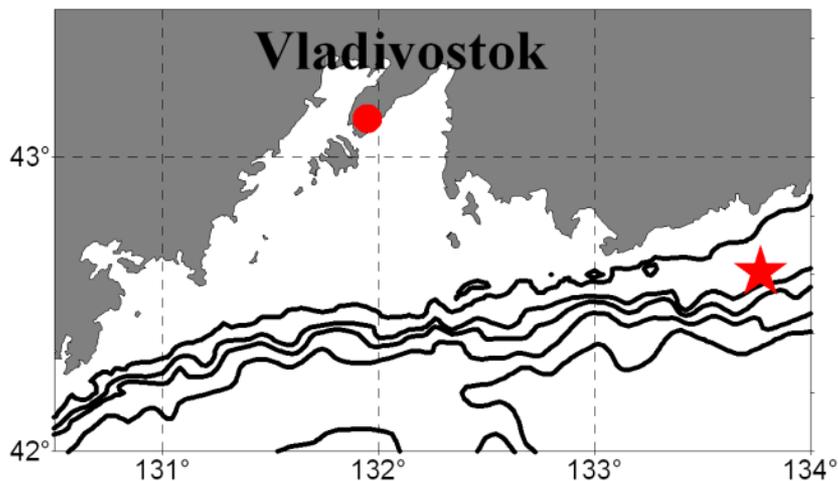
По дрейтерам ARGOS
(Lee, Niiler, 2005)

Локальный максимум
вихревой кинетической энергии
и ее изменчивости



Спутниковая
альтиметрия, AVISO,
(Трусенкова, 2014)

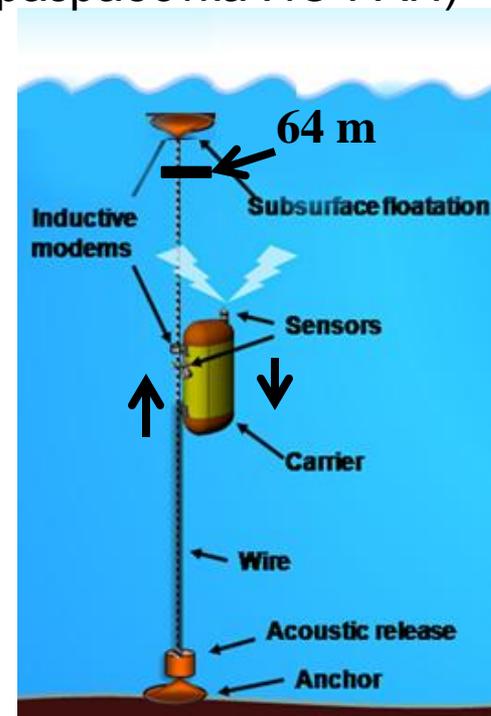
Район исследования: склон у юго-восточного побережья Приморья



Место установки «Аквалога»:
42.5°с.ш., 133.8°в.д.,
(35 км от берега), глубина: 440 м.

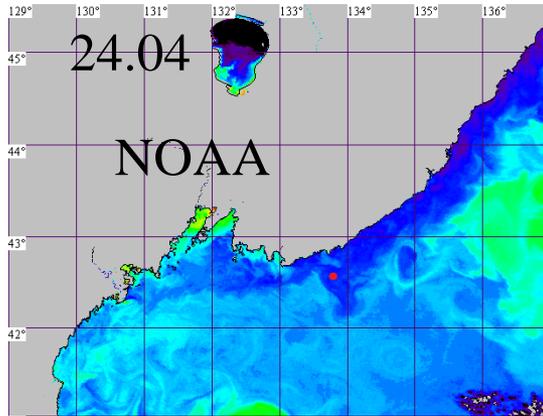
Данные с высокой дискретностью
в период 18 апреля – 14 октября 2015 г.
(практически полгода).

Автономный сканирующий
профилограф «Аквалог»
(разработка ИО РАН)



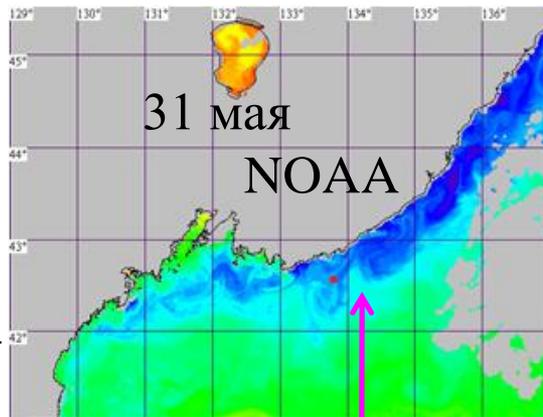
(Островский и др., 2013)

Совместный анализ данных «Аквалога» и спутниковых изображений поверхности моря (Трусенкова и др., 2018, 2019)



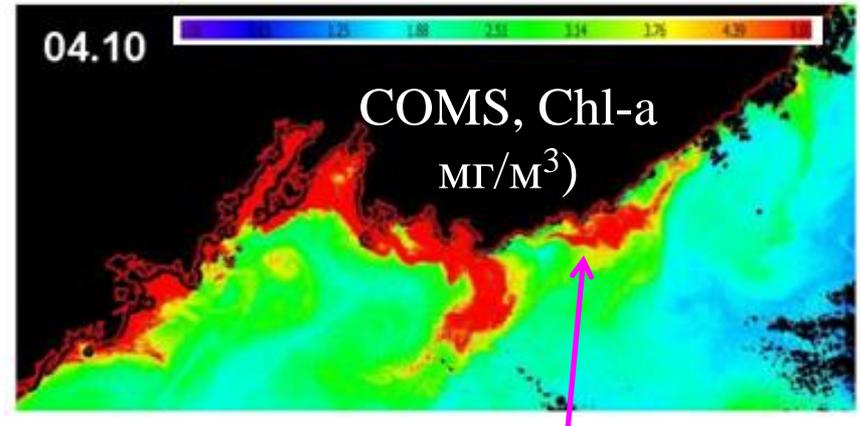
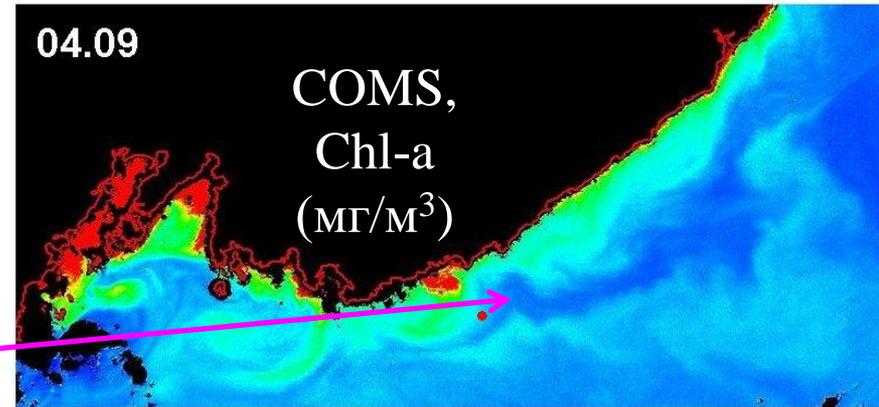
Вторжение
Приморского течения
(21 апреля – 1 мая)

Синим –
холодные,
желто-
зеленым и
красным –
теплые
воды.



Вынос прибрежных
вод в тылу АЦ вихря

Воды
Цусимского
течения с
востока:
пониженная
био-
продуктивность



Ветровой апвеллинг: повышенная
биопродуктивность
(30 сентября – 3 октября)

Температура и соленость в слое 64–70 м



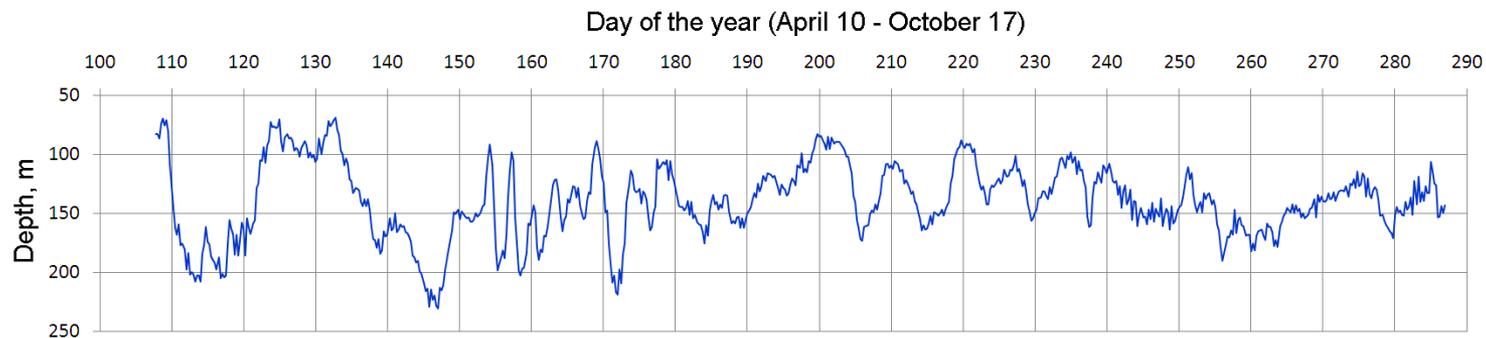
Аномалии в верхнем слое профилируемых вод: горизонтальная адвекция инородных вод (по спутниковым данным)

Температура и соленость в слое 64–70 м



Аномалии в верхнем слое профилируемых вод: горизонтальная адвекция инородных вод (по спутниковым данным)

Вертикальные колебания в пикноклине:
глубина поверхности $\sigma = 27.15 \text{ кг/м}^3$ ($140 \pm 31 \text{ м}$)



Вертикальные колебания в пикноклине, иной характер изменчивости
(Трусенкова и др., 2018)

Где находится граница по вертикали между верхним слоем (изменчивость за счет горизонтальной адвекции) и нижним слоем (изменчивость за счет вертикальных движений в пикноклине)?

Какие изменения вертикальной плотностной стратификации происходят при вертикальных колебаниях пикноклина?

Где находится граница по вертикали между верхним слоем (изменчивость за счет горизонтальной адвекции) и нижним слоем (изменчивость за счет вертикальных движений в пикноклине)?

Какие изменения вертикальной плотностной стратификации происходят при вертикальных колебаниях пикноклина?

Цель работы

Оценка связанных с динамическими структурами изменений вертикальной плотностной стратификации и глубины, разграничивающей температурные аномалии разной природы.

Где находится граница по вертикали между верхним слоем (изменчивость за счет горизонтальной адвекции) и нижним слоем (изменчивость за счет вертикальных движений в пикноклине)?

Какие изменения вертикальной плотностной стратификации происходят при вертикальных колебаниях пикноклина?

Цель работы

Оценка связанных с динамическими структурами изменений вертикальной плотностной стратификации и глубины, разграничивающей температурные аномалии разной природы.

Где находится граница по вертикали между верхним слоем (изменчивость за счет горизонтальной адвекции) и нижним слоем (изменчивость за счет вертикальных движений в пикноклине)?

Какие изменения вертикальной плотностной стратификации происходят при вертикальных колебаниях пикноклина?

Цель работы

Оценка связанных с динамическими структурами изменений вертикальной плотностной стратификации и глубины, разграничивающей температурные аномалии разной природы.

Спутниковые данные

AVHRR/NOAA (1 км); VIIRS/Suomi-NPP (375 м)

Значительный облачный покров в теплый период 2015 г.

Данные «Аквалога»

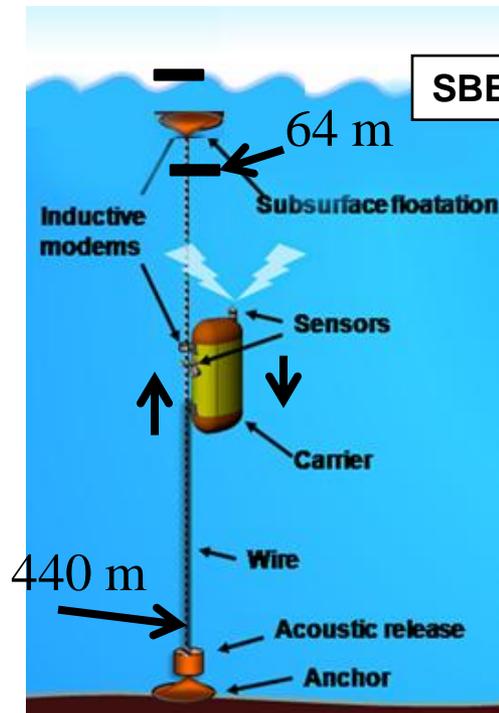
Измерения в период с 18 апреля по 14 октября 2015 г., глубина места 440 м.



SBE CTD 52MP



Nortek ACM Aquadopp



Рассматриваемые параметры:

температура, глубина поверхности $\sigma = 27.15 \text{ кг/м}^3$ (D27.15) и частота плавучести с дискретностью 1 м по глубине и 6 час по времени в слое **64–300 м**.

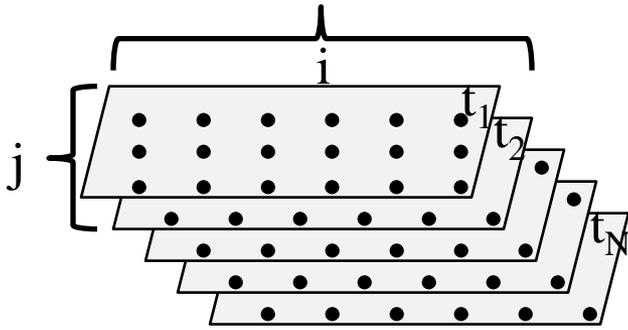
Частота плавучести:

$$N = (g/\rho \cdot \partial\rho/\partial z)^{1/2}$$

Конфигурация профилографа, инструменты, первичная обработка и коррекция данных подробно обсуждаются в работе (Лазарюк и др., 2017).

(Островский и др., 2013)

ЭОФ-анализ пространственно-временных полей



$$X(r_{ij}, t) = \sum A_k(r_{ij}) \cdot B_k(t), \text{ где}$$

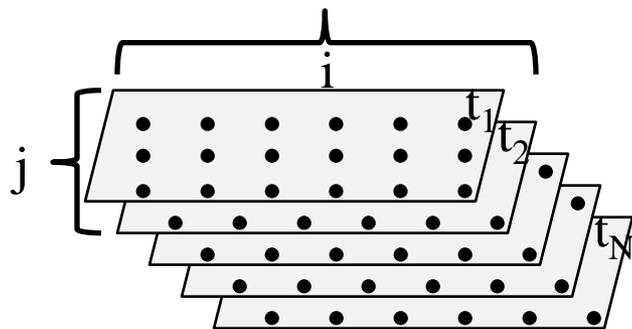
$X(r_{ij}, t)$ - поля, $A_k(r_{ij})$ - поля ЭОФ,

$B_k(t)$ - временные ГК.

$k=1, 2, \dots, N$ - временные отсчеты,

r_{ij} - точки поля, $i \times j = M$.

ЭОФ-анализ пространственно-временных полей



$$X(r_{ij}, t) = \sum A_k(r_{ij}) \cdot B_k(t), \text{ где}$$

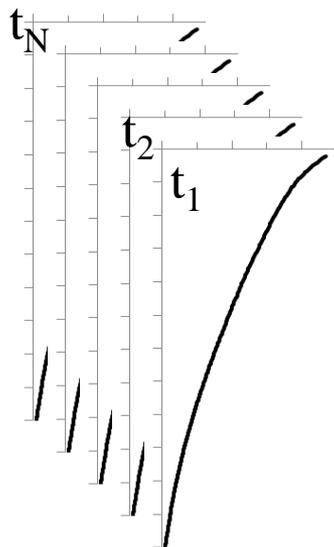
$X(r_{ij}, t)$ - поля, $A_k(r_{ij})$ - поля ЭОФ,

$B_k(t)$ - временные ГК.

$k=1, 2, \dots, N$ - временные отсчеты,

r_{ij} - точки поля, $i \times j = M$.

ЭОФ-анализ в осях «глубина ($\Delta h=1$ м) – время ($\Delta t=6$ час.)»



$$X(d_M, t) = \sum A_k(d_M) \cdot B_k(t), \text{ где}$$

$X(d_M, t)$ - набор вертикальных профилей,

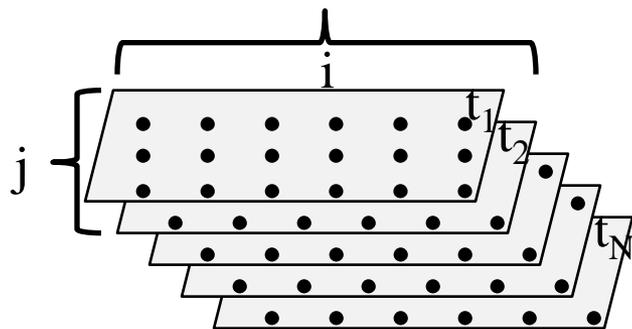
$A_k(d_M)$ - вертикальные профили ЭОФ,

$B_k(t)$ - временные ГК.

$k=1, 2, \dots, N$ - временные отсчеты,

d_i - профили, $i = 1, \dots, M$.

ЭОФ-анализ пространственно-временных полей



$$X(r_{ij}, t) = \sum A_k(r_{ij}) \cdot B_k(t), \text{ где}$$

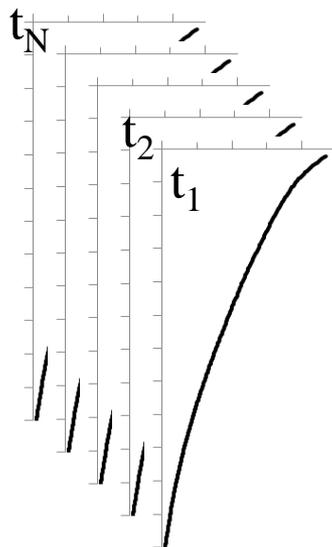
$X(r_{ij}, t)$ - поля, $A_k(r_{ij})$ - поля ЭОФ,

$B_k(t)$ - временные ГК.

$k=1, 2, \dots, N$ - временные отсчеты,

r_{ij} - точки поля, $i \times j = M$.

ЭОФ-анализ в осях «глубина ($\Delta h=1$ м) – время ($\Delta t=6$ час.)»



$$X(d_M, t) = \sum A_k(d_M) \cdot B_k(t), \text{ где}$$

$X(d_M, t)$ - набор вертикальных профилей,

$A_k(d_M)$ - вертикальные профили ЭОФ,

$B_k(t)$ - временные ГК.

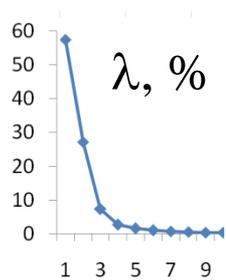
$k=1, 2, \dots, N$ - временные отсчеты,

d_i - профили, $i = 1, \dots, M$.

$R_k = \text{corr}(X, B_k)$ - дает оценку значимости,

$N^* = 17-20$ - число степеней свободы, $R^* = 0.42-0.46$.

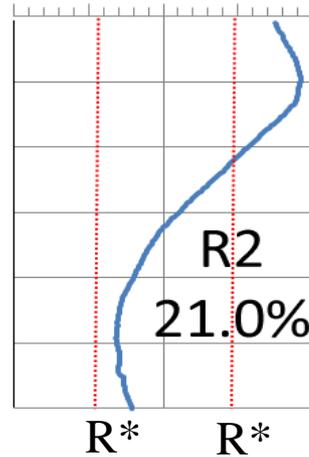
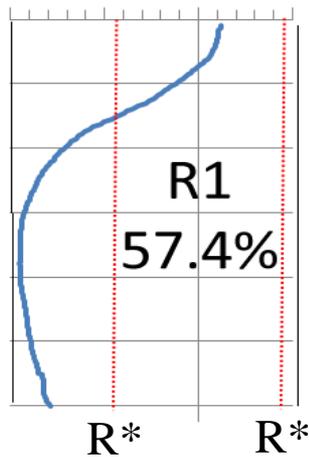
ЭОФ нормированных аномалий температуры



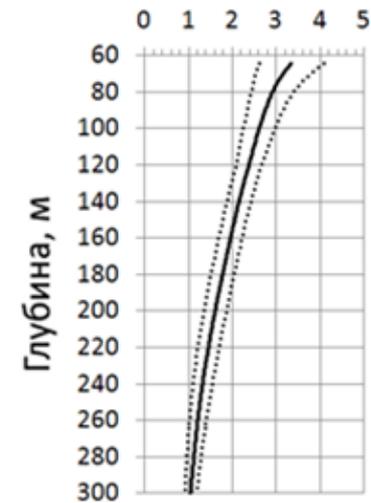
ЭОФ1: значима глубже 120 м

ЭОФ2: значима выше 150 м

Коэффициент корреляции
-1.0 -0.5 0.0 0.5 -1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0

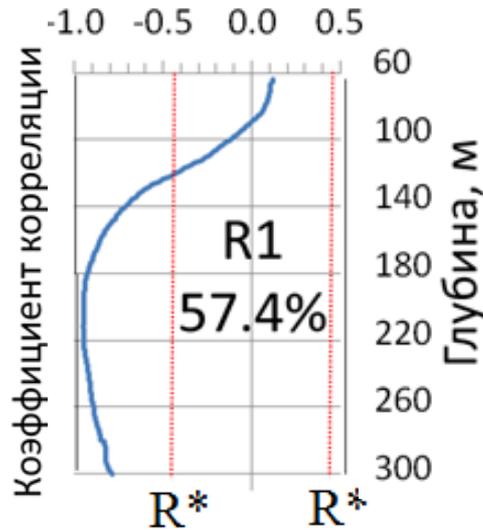
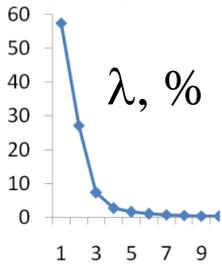


Глубина, м
60
100
140
180
220
260
300



Средний профиль

ЭОФ1 аномалий температуры

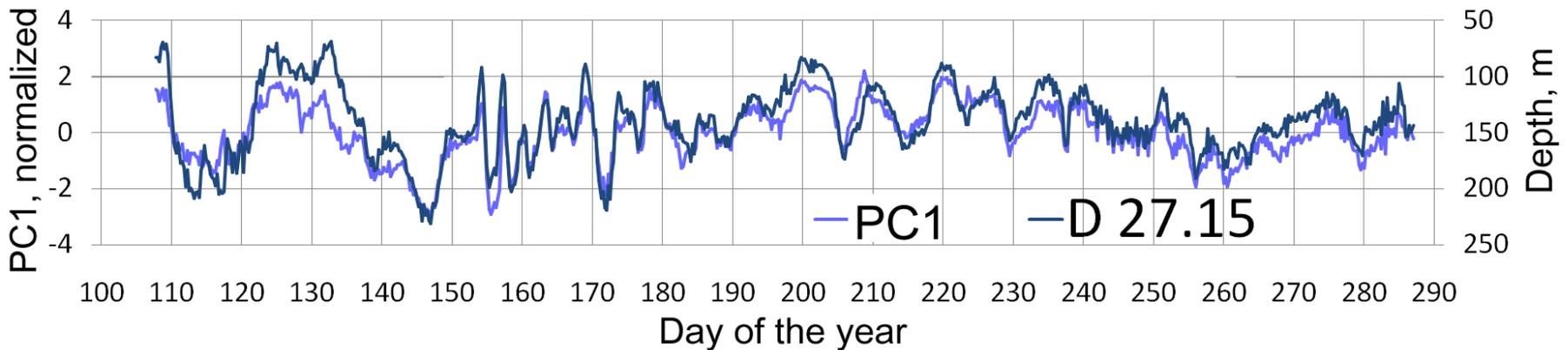


ЭОФ1: значима глубже 120 м,
экстремум на 180–220 м.

$$R_{(PC1 - D27.15)} = -0.87$$

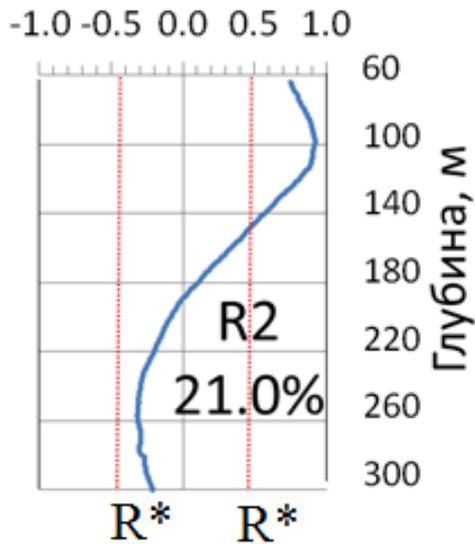
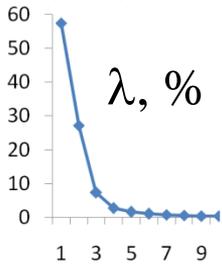
$D \downarrow \rightarrow GK1 \downarrow \rightarrow T \uparrow$ (ЭОФ1 < 0).

$\Delta T \sim 0.8-1^\circ C$ (для $GK1 = 1$).



Мода 1: вертикальные смещения: рост T (и уменьшение S) при опускании изопикнических слоев, а при поднятии – обратные изменения.

ЭОФ2 аномалий температуры

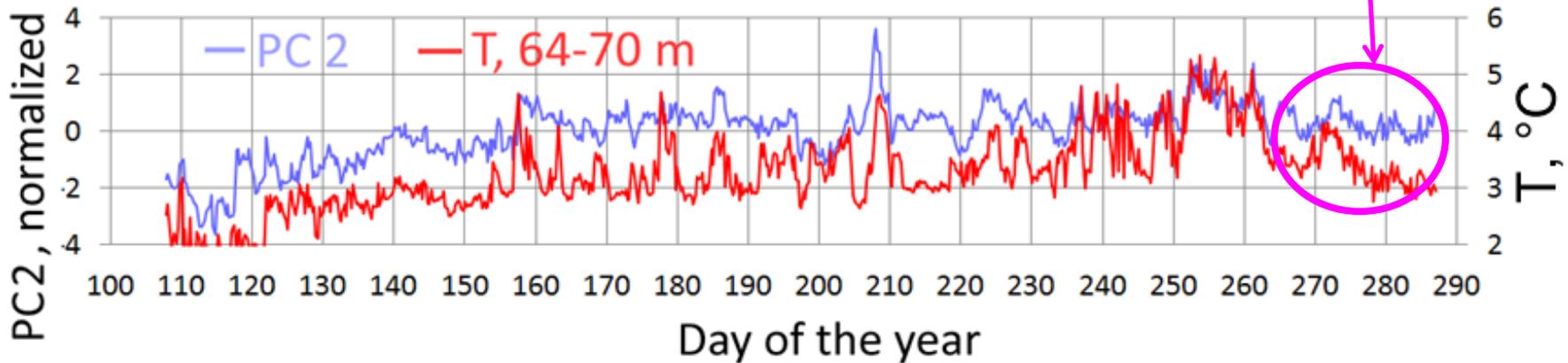


ЭОФ2: значима выше 150 м,
максимум на 90–100 м.

$$R_{(PC2 - T_{64-70})} = 0.77$$

$T_{64-70} \uparrow \rightarrow \text{ГК2} \uparrow \rightarrow T \uparrow$ (ЭОФ2 > 0);
(В ГК2 нет проявления апвеллинга в октябре.)

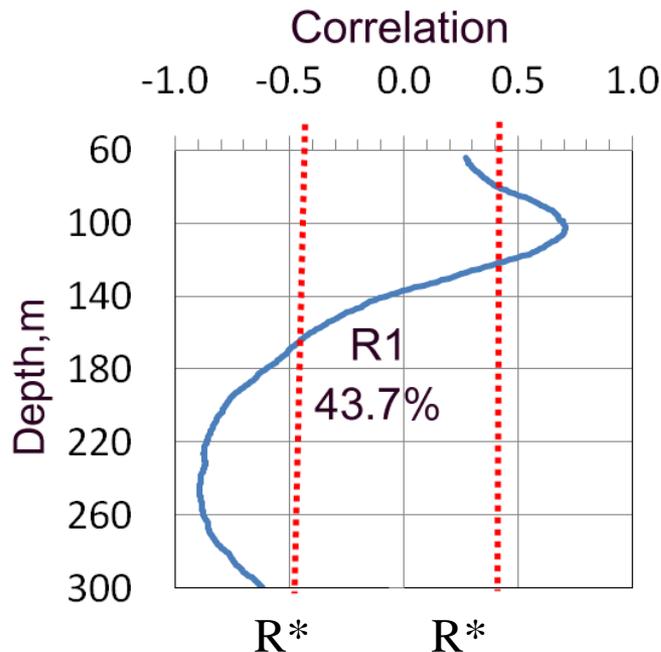
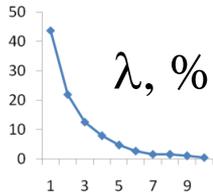
$\Delta T \sim 0.7\text{--}0.9^\circ\text{C}$ (для ГК2 = 1).



Мода 2: адвекция инородных вод в верхнем профилируемом слое.

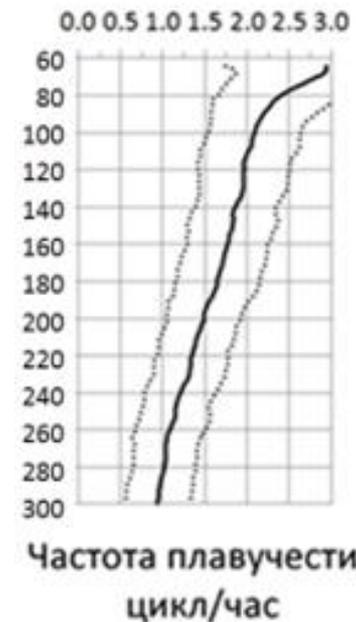
Граница между слоями с разным характером изменчивости T: **120–150 м**

ЭОФ нормированных аномалий частоты плавучести (N) (сглажена медианными фильтрами с окнами 9 м и 2 сут.)



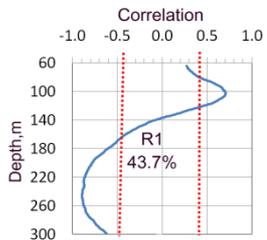
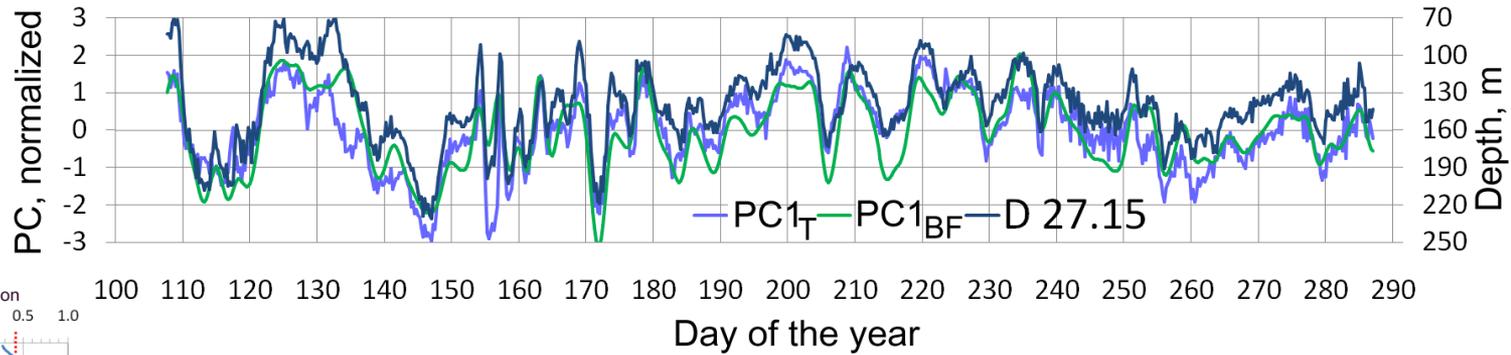
Изменения плотностной стратификации
противоположны выше и ниже **120–160 м**

Значимая ЭОФ1
противоположного знака
выше и ниже 120–160 м.



Средний профиль

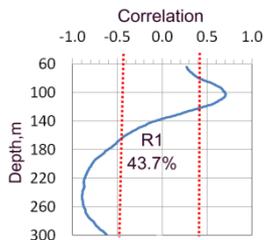
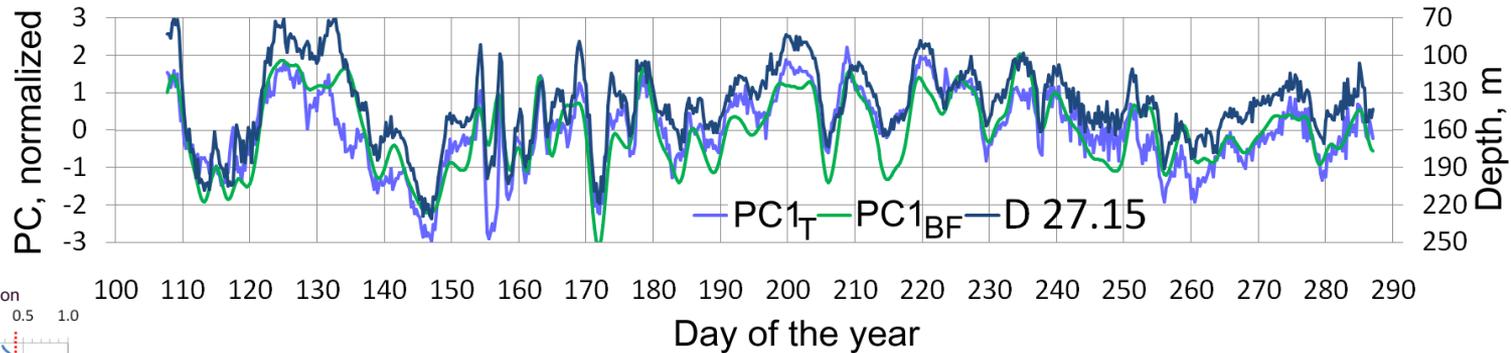
Временная изменчивость частоты плавучести



ГК1 температуры (синим) и частоты плавучести (зеленым) и
глубина D27.15 (темно-синим)

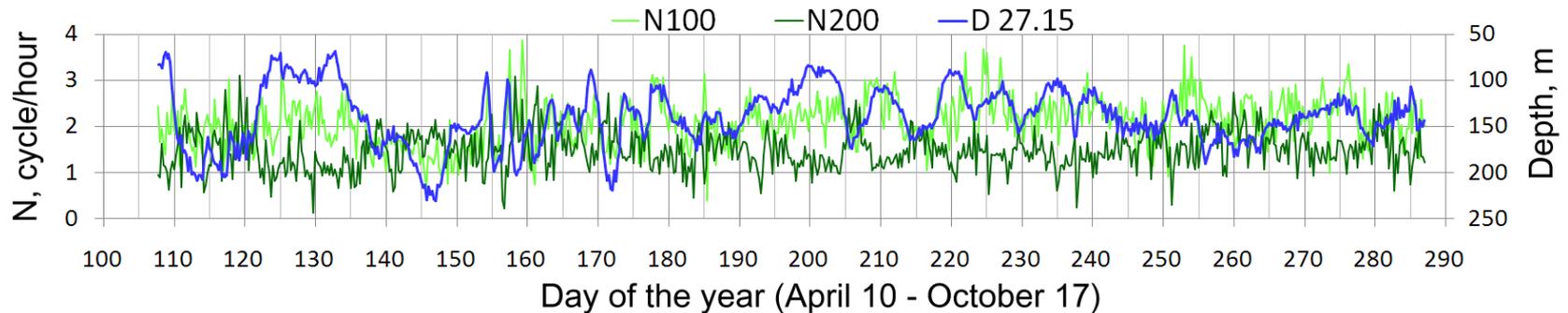
$$R_{(PC1,N - D27.15)} = -0.89 \quad R_{(PC1,N - PC1,T)} = 0.79; D \downarrow \rightarrow PC1_N \downarrow \rightarrow N_{64-120} \downarrow, N_{160-300} \uparrow$$

Временная изменчивость частоты плавучести



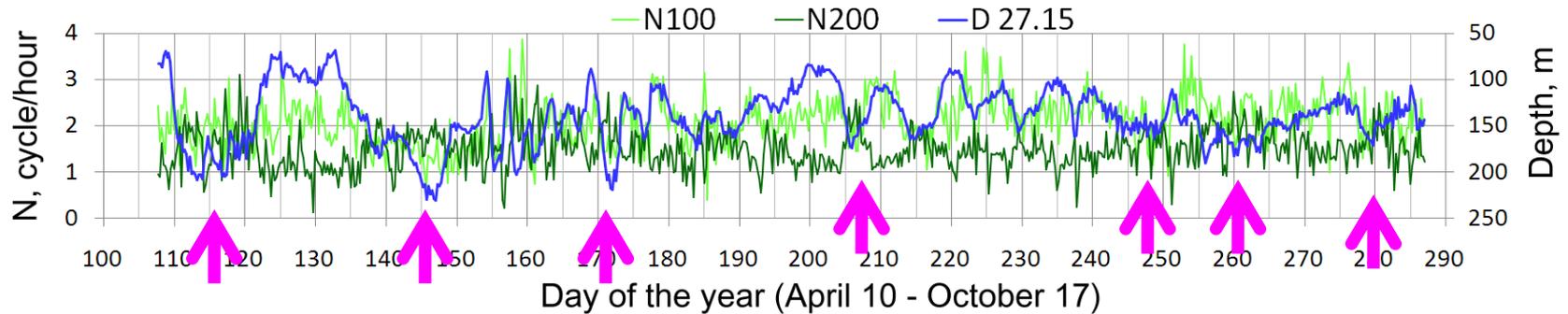
ГК1 температуры (синим) и частоты плавучести (зеленым) и глубина D27.15 (темно-синим)

$$R_{(PC1,N - D27.15)} = -0.89 \quad R_{(PC1,N - PC1,T)} = 0.79; D \downarrow \rightarrow PC1_N \downarrow \rightarrow N_{64-120} \downarrow, N_{160-300} \uparrow$$

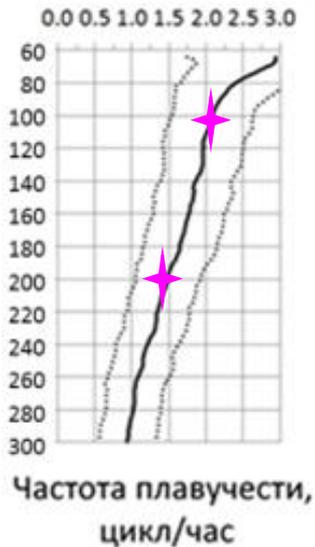


Изменения частоты плавучести согласованы с вертикальными движениями в пикноклине: при опускании D увеличение N выше **120–160 м** и уменьшение ниже. При подъеме – обратные изменения.

Временная изменчивость частоты плавучести



Средний профиль

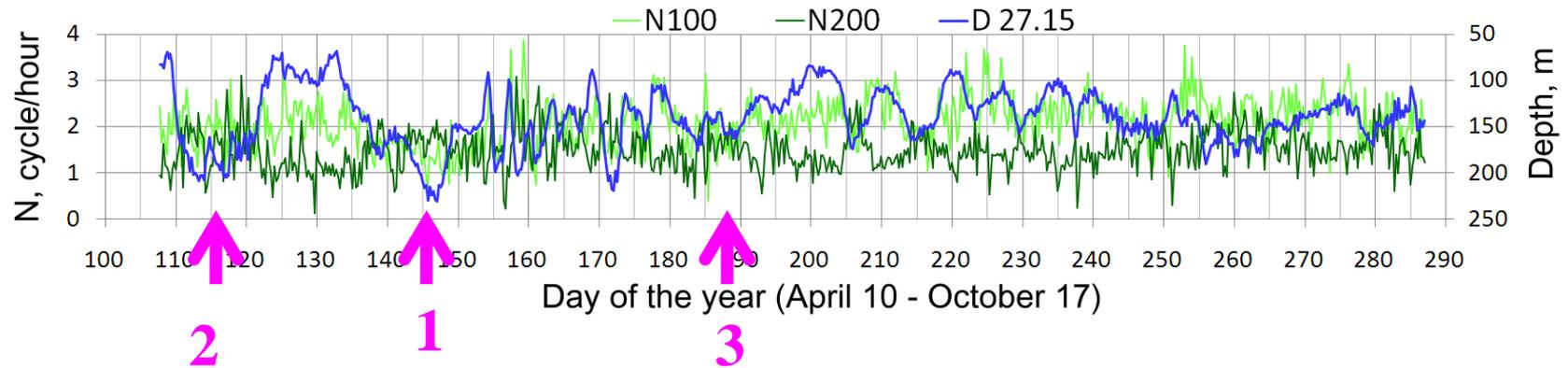


В среднем, $N_{200} \approx N_{100} * 0.75$, но при опускании D $N_{100} \approx N_{200} \rightarrow$ стратификация ослаблена в верхнем слое и усилена в нижнем.

Можно связать с вертикальными движениями в антициклонических циркуляциях.

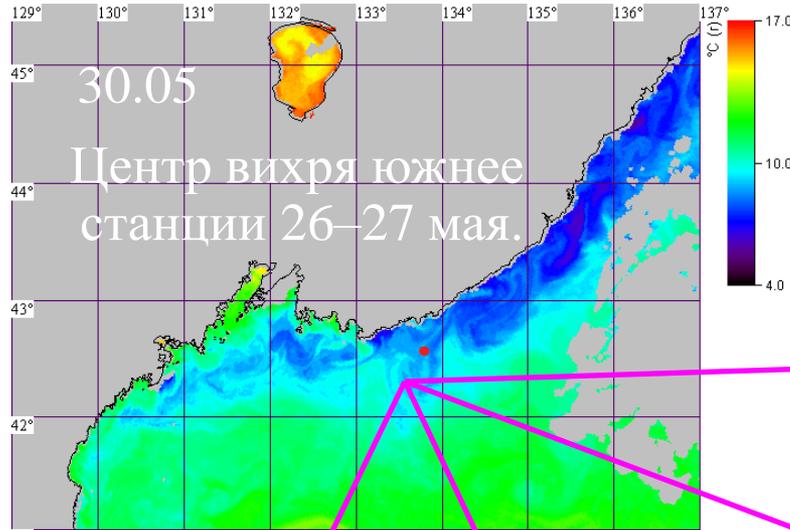
При подъеме D стратификация возвращалась к средней.

Характерные примеры (есть спутниковые снимки)

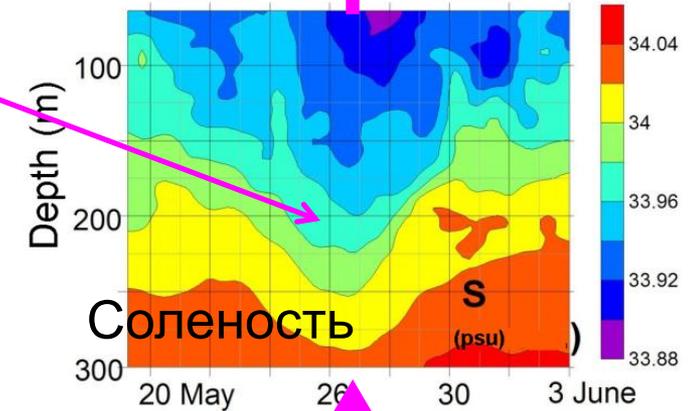
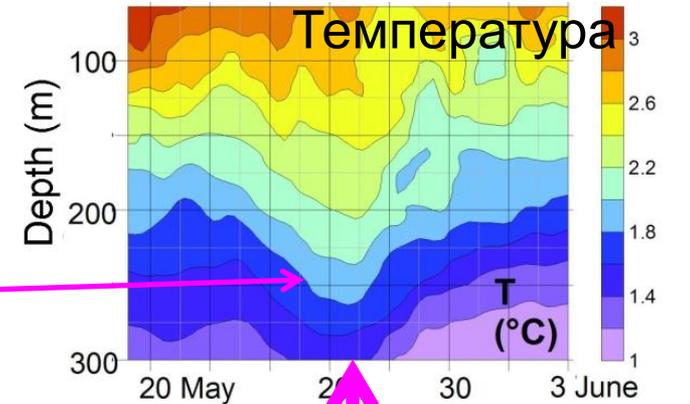


1. Прохождение крупного вихря в конце мая – начале июня.
2. Вторжение Приморского течения в конце апреля.
3. Вторжение Приморского течения в начале июля.

Крупный АЦ вихрь в конце мая – начале июня

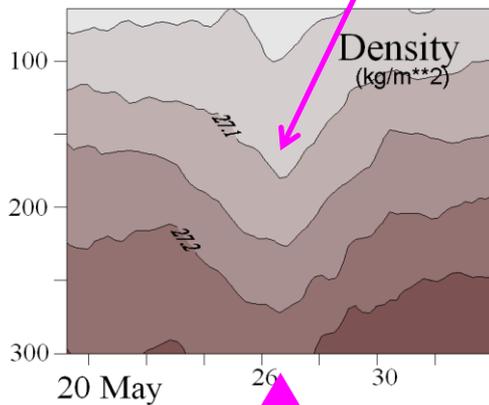


Синим – холодные, желто-зеленым и красным – теплые воды.

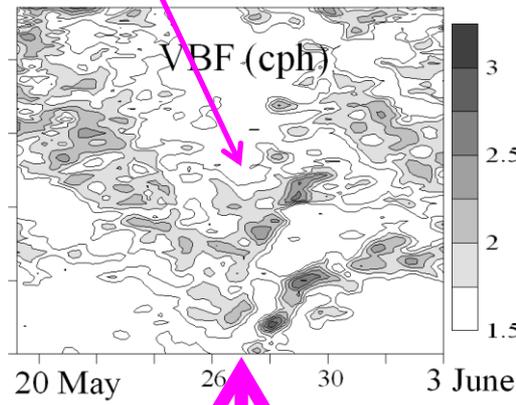


Размер: 60–80 км,
 скорость: 6–9 см/с.

Плотность



Частота плавучести

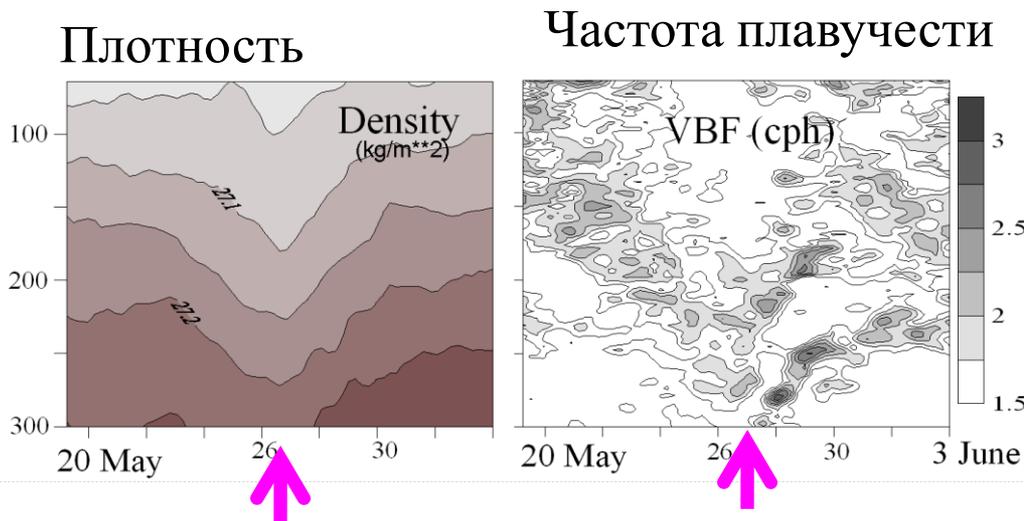
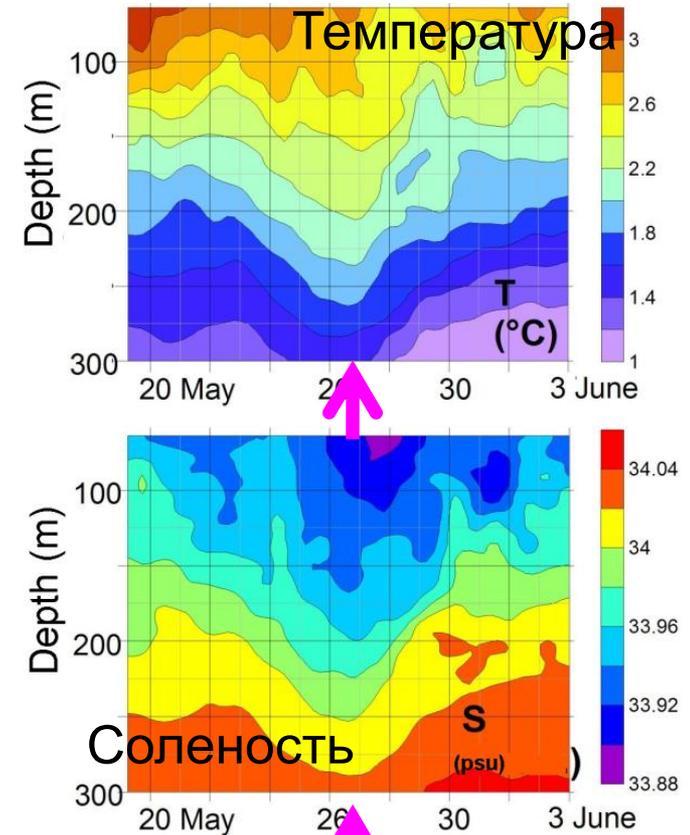


Центральная область вихря – 26-27 мая.

Крупный АЦ вихрь в конце мая – начале июня

Верхний слой (64–100 м): холодная вода пониженной солености – адвекция вод Приморского течения;

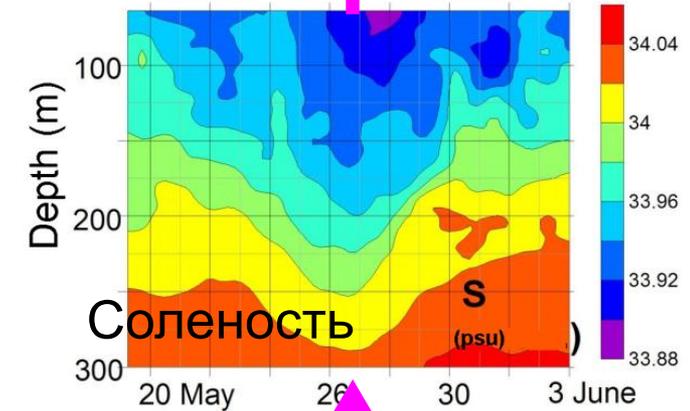
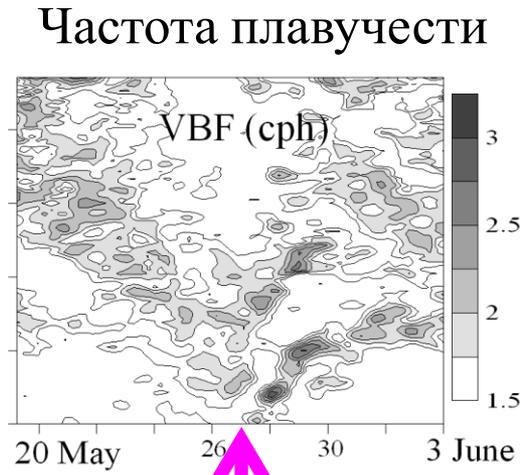
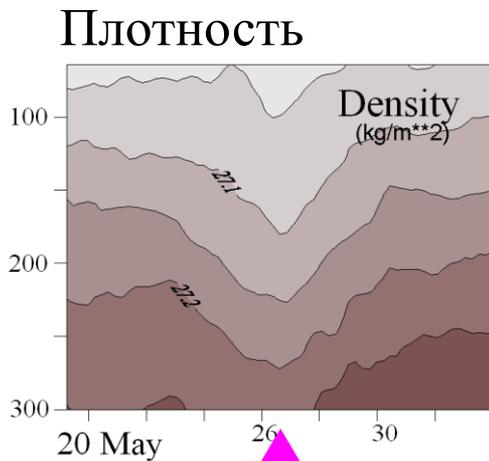
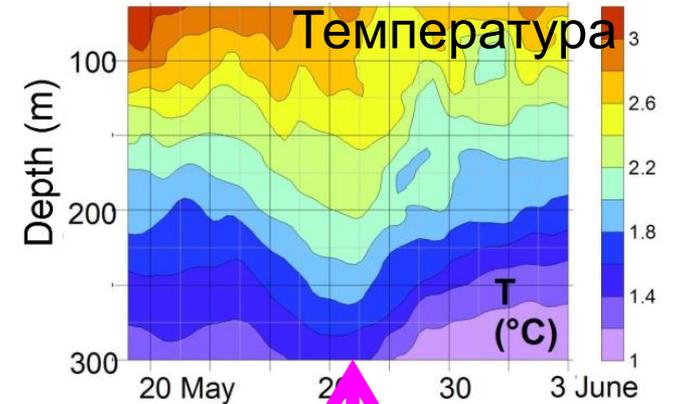
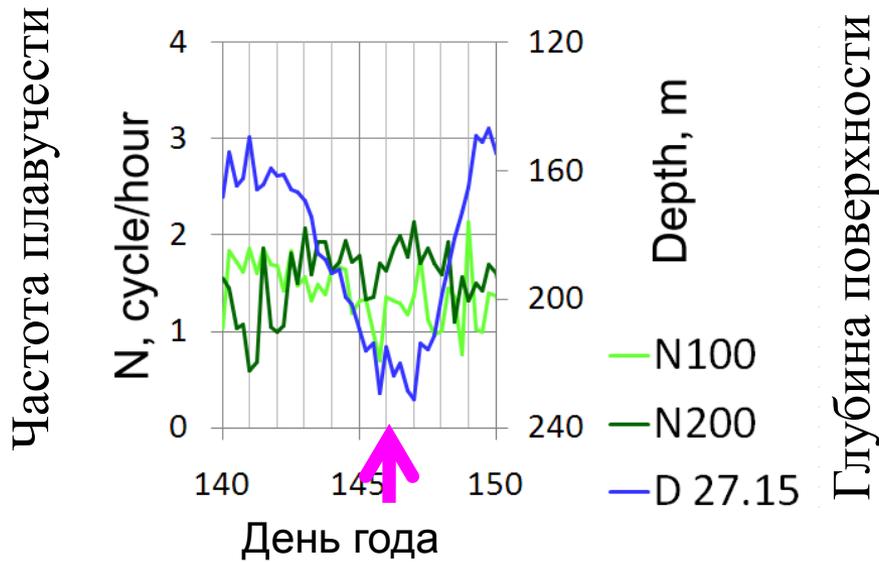
Нижний слой (150–300 м): теплые, распресненные воды – прогиб изопикнических поверхностей внутри АЦ вихря



Размер: 60–80 км,
скорость: 6–9 см/с.

Прогиб изолиний T, S, σ до 300 м, ослабление стратификации до 160 м.

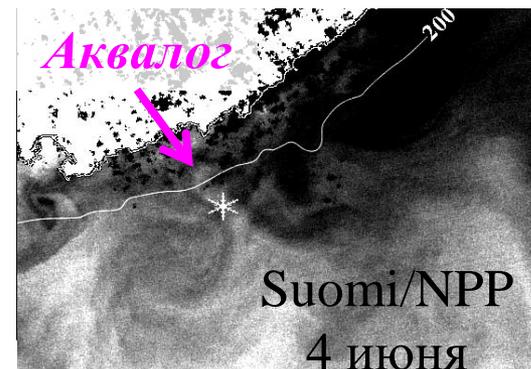
Крупный АЦ вихрь в конце мая – начале июня



Размер: 60–80 км,
скорость: 6–9 см/с.

Прогиб изолиний T, S, σ до 300 м, ослабление стратификации до 160 м.

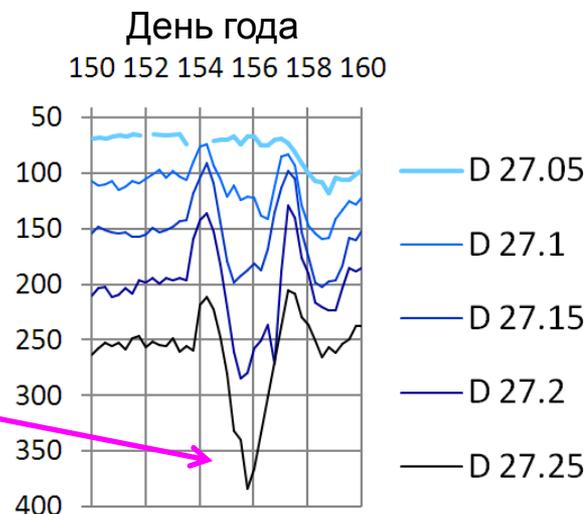
Мезомасштабные динамические структуры в тылу АЦ вихря (начало июня)



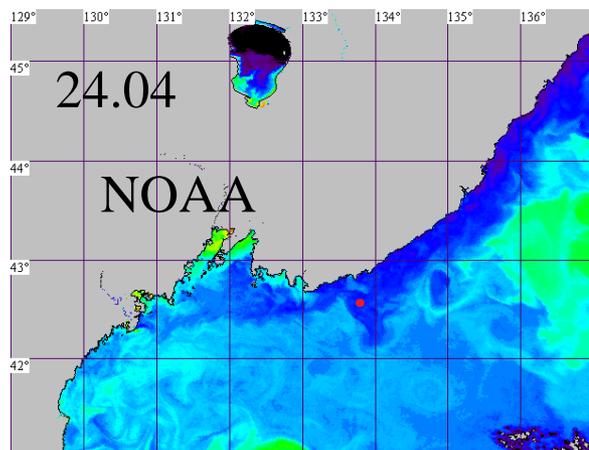
Темным— холодные,
светлым — теплые воды.

Значительные колебания пикноклина после
прохождения крупного АЦ вихря:
3 и 8 июня – подъем D, 4 июня – опускание
D и $N_{100} \approx N_{200}$.

Наибольшее углубление 4 июня

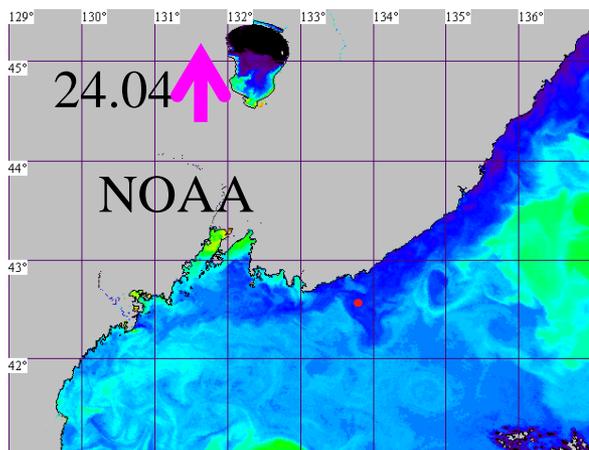


Вторжение Приморского течения (21 апреля – 1 мая)



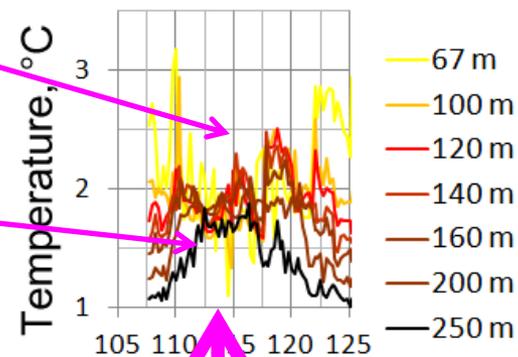
Синим – холодные,
голубым и желто-зеленым –
теплые воды.

Вторжение Приморского течения (21 апреля – 1 мая)

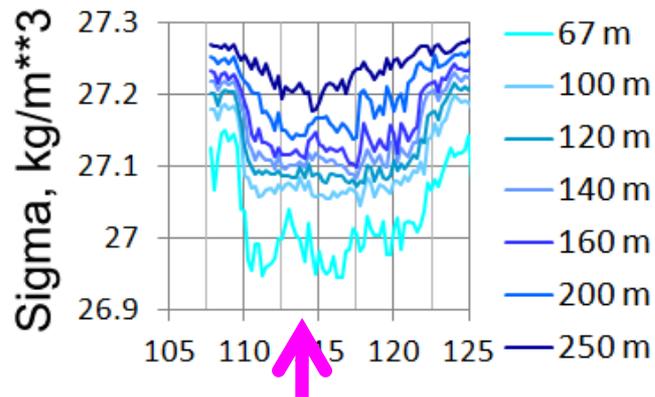
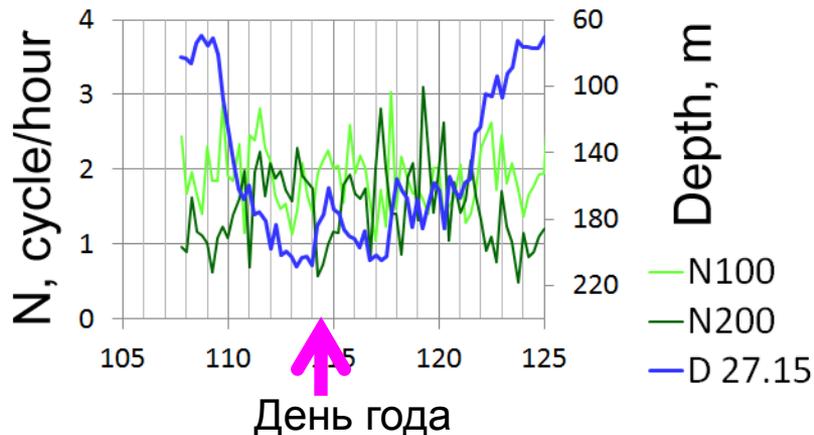
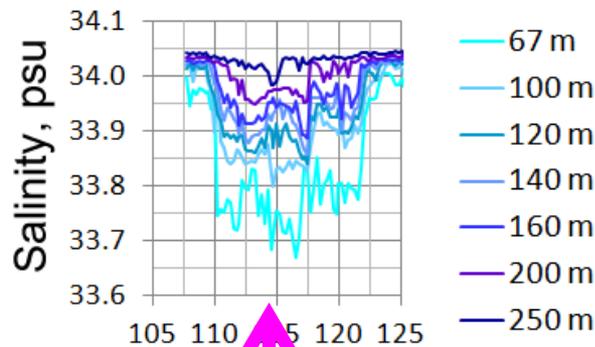


Холодные воды пониженной солености в верхнем слое (до 150-200 м).

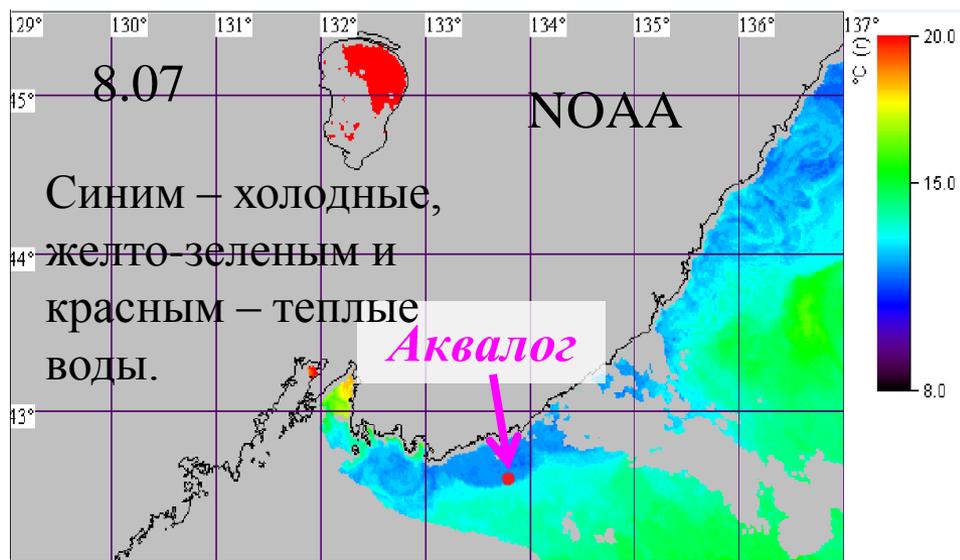
Повышение T ниже 150 м – АЦ вращение?



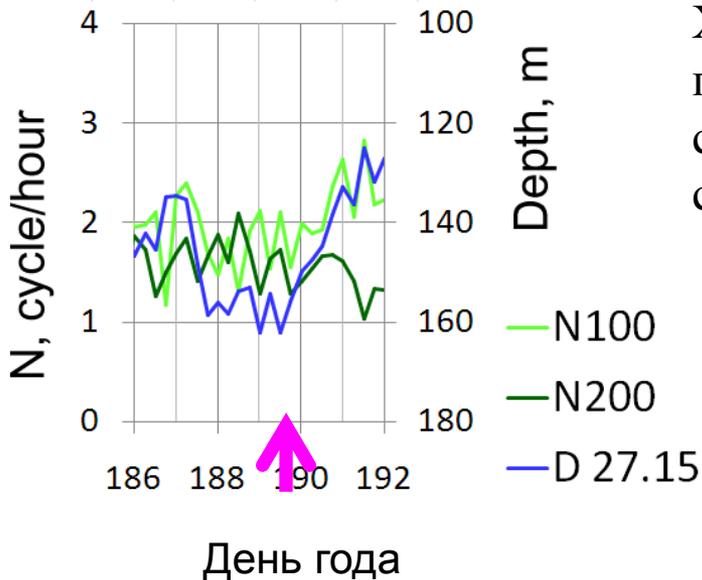
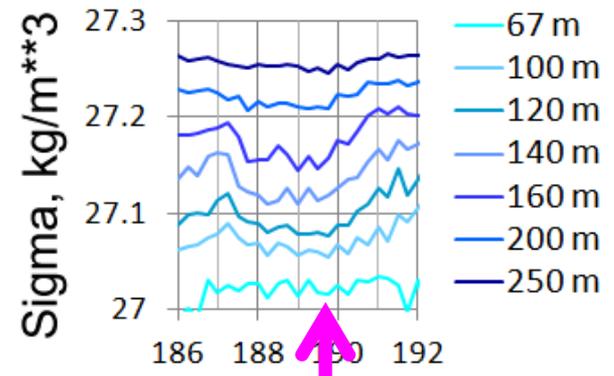
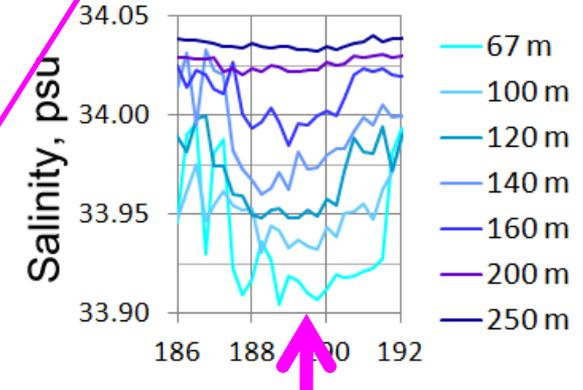
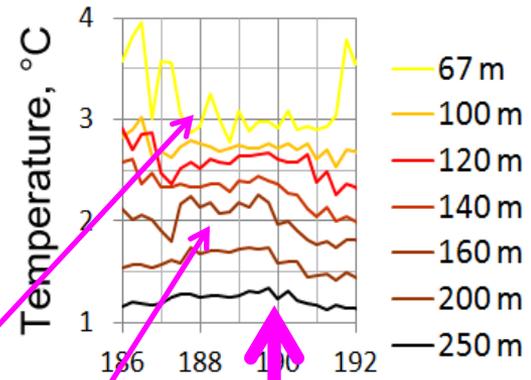
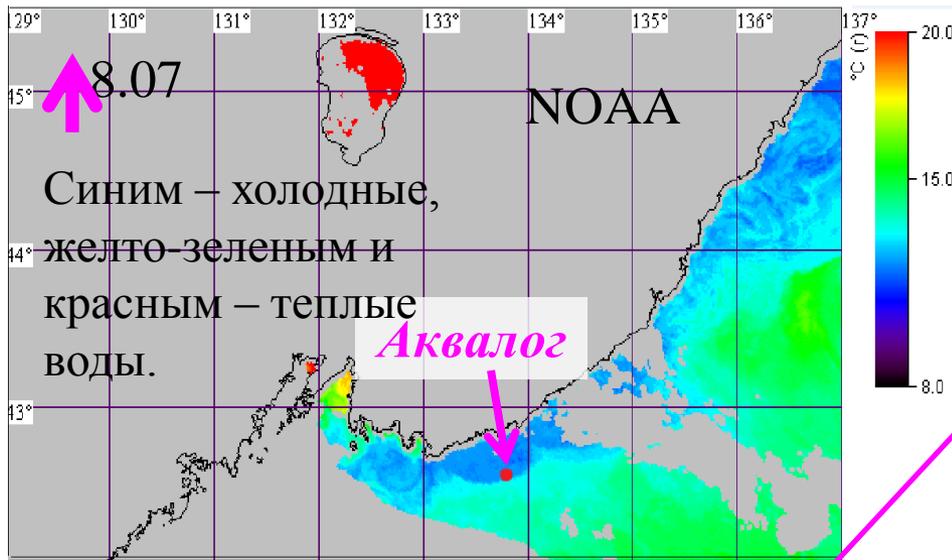
Синим – холодные, голубым и желто-зеленым – теплые воды.



Воды Приморского течения – вихрь? (8 июля – 189 сут.)



Воды Приморского течения – вихрь? (8 июля – 189 сут.)



Холодные воды
пониженной
солености в верхнем
слое (до 80-150 м).

Повышение T
ниже 150 м –
АЦ вращение?

Выводы

Аномалии температуры в верхнем слое профилирования (выше 120 м) связаны со вторжениями инородных вод (горизонтальной адвекцией), в нижнем (от 150 м до 300 м) слое – с вертикальными колебаниями пикноклина.

С вертикальными колебаниями пикноклина были связаны изменения плотностной стратификации, которые имели противоположный характер в слоях выше и ниже 120–160 м.

В верхнем слое при опускании изопикнических поверхностей стратификация ослаблялась (частота плавучести уменьшалась), что можно связать с антициклоническими циркуляциями, в нижнем слое происходили противоположные изменения стратификации из-за сближения изопикнических поверхностей.

При подъеме поверхностей происходили обратные изменения и стратификация возвращалась к средней.

Долгосрочные измерения с помощью платформы «Аквалог»
предоставил уникальную возможность исследования
короткопериодной изменчивости в районе
континентального склона у побережья Приморья



Спасибо за внимание!