

# КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ: СИНГУЛЯРНОСТЬ ИССЛЕДУЕМЫХ ЯВЛЕНИЙ, МЕТОДОВ И ТЕХНИКИ

Кантаков Г.А., НПО ДЭКО

# 7 минут в формате Минобра

## РЕФЕРАТ ПРЕЗЕНТАЦИИ

Разрезы – Кольский! +1! - история (и она замечательная!) – методы тогда – методы посередине – методы сейчас – работа и по инерции и в поисках физ стат связей – разрезы и судьбы Будыко / Израэля / Марчука – новые вызовы после 1990-ых – *IN SITU* vs(?) *SUPER HABITAT* – информативная красота регулярных наблюдений – новые методические вопросы - техника и перспективы - разрезам таки быть!

Здесь есть ответ на любой фундаментальный вопрос по разрезам

# Цель: ценность океанологических разрезов, для чего и как продолжить (?/!) измерения на них

Позади (нас) 125+ лет океанографии (Шокальский, 1917) морей РФ, поэтому в подаче материала синтезируем три подхода :

- Путь самурая (Yamamoto, 1900 по изд. 1944), он же приоритет процесса сбора данных *IN SITU*, далее прибавим, особенно с 1990-ых и *SUPER HABITAT* (дистанционные, вкл. спутниковые);

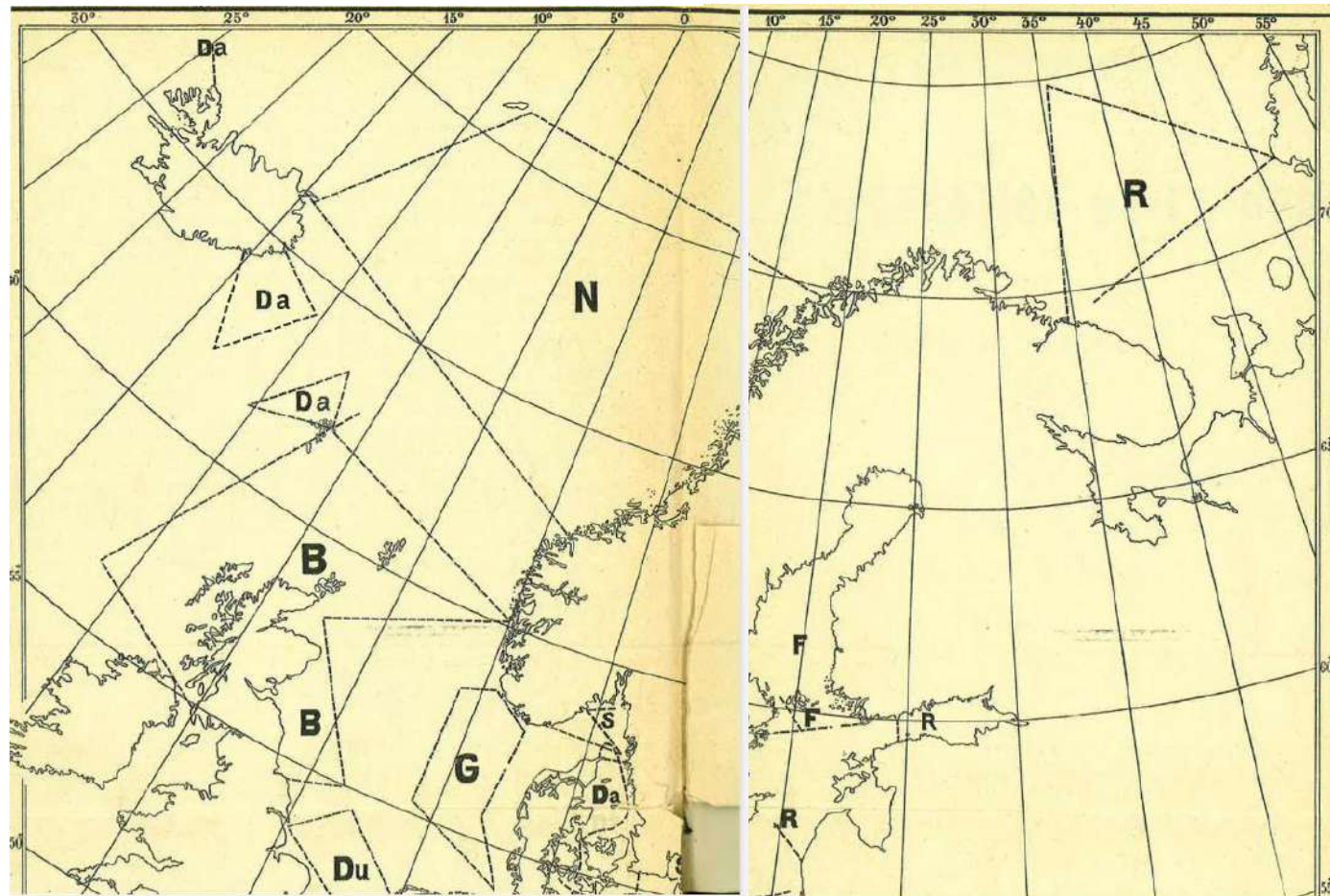
-- Все реки текут в море, но море не переполняется: к тому месту, откуда реки текут, они возвращаются, чтобы опять течь (Еккл. 1:7 ▷ цикл воды + углерода!);

--- Изучение ... морской среды также должно быть подчинено задаче оценки экосистемных последствий (Матишов 2000; 2022 + др.

## Что же ждет морские экосистемы, а значит и нас?

# Начало: для чего стандартные разрезы? 1899 год

The hydrographical researches shall have for their object: the distinction of the different water-strata, according to their geographical distribution, their depths, their temperature, salinity, gas-contents, plankton and currents, in order to find the fundamental principles not only for the determination of the external conditions of the useful marine animals, but also for weather-forecasts for extended periods in the interests of agriculture.



Источник: ICES Convention and rules of procedure. [##] pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.8525>

# Стандартный разрез Кольский (1900 год)

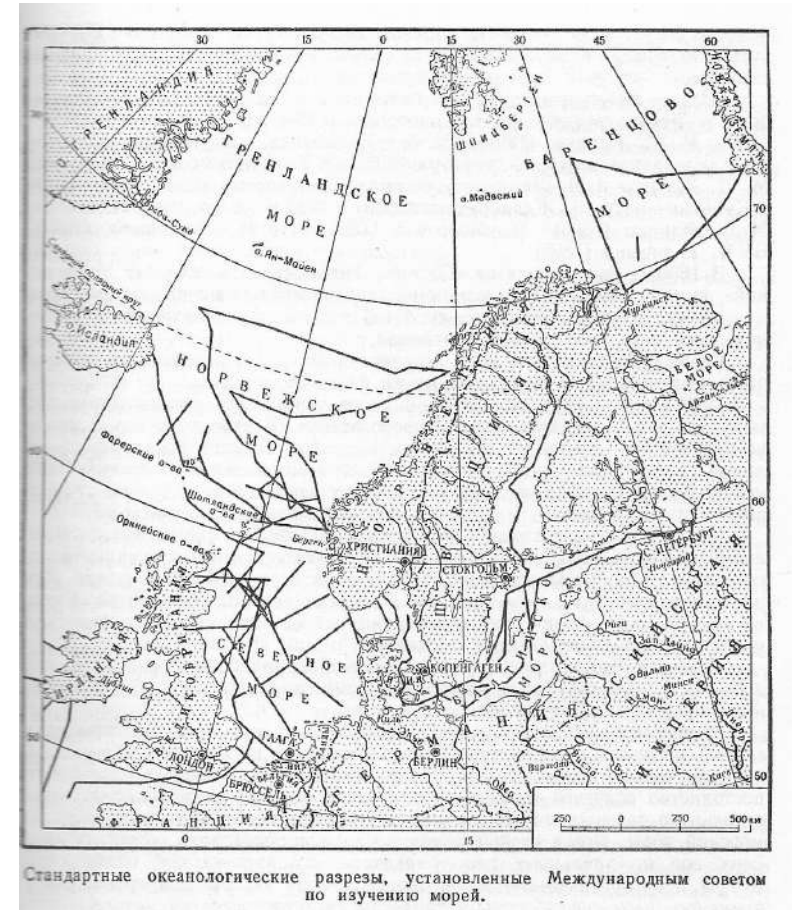
... удалось произвести исследования по направлению меридиана Кольского залива (в марте до  $74^{\circ}47'N$ )... Можно принять, что точность температурных определений этого рейса была около  $0,1^{\circ}$ ; начинаясь с этого рейса, по всей вероятности, около  $0,03^{\circ}$  (Книпович и др., 1904 – лексика как в оригинале - GK)

— 68 —

0 м.	10 м.	25 м.	50 м.	60 м.	91 м.
+3,95	+4,05	+3,85	+0,15	-0,95	-1,48
34,00	34,02	34,13	34,45	34,47	34,63

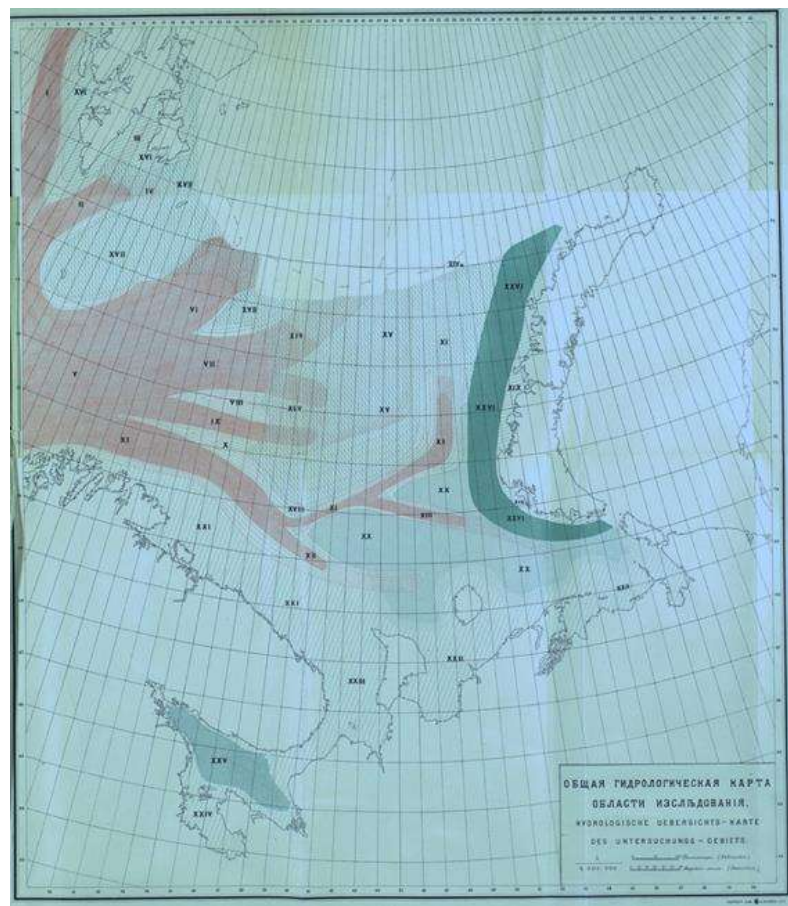
Станция 587

(пример данных, 2 –ой знак после запятой!)

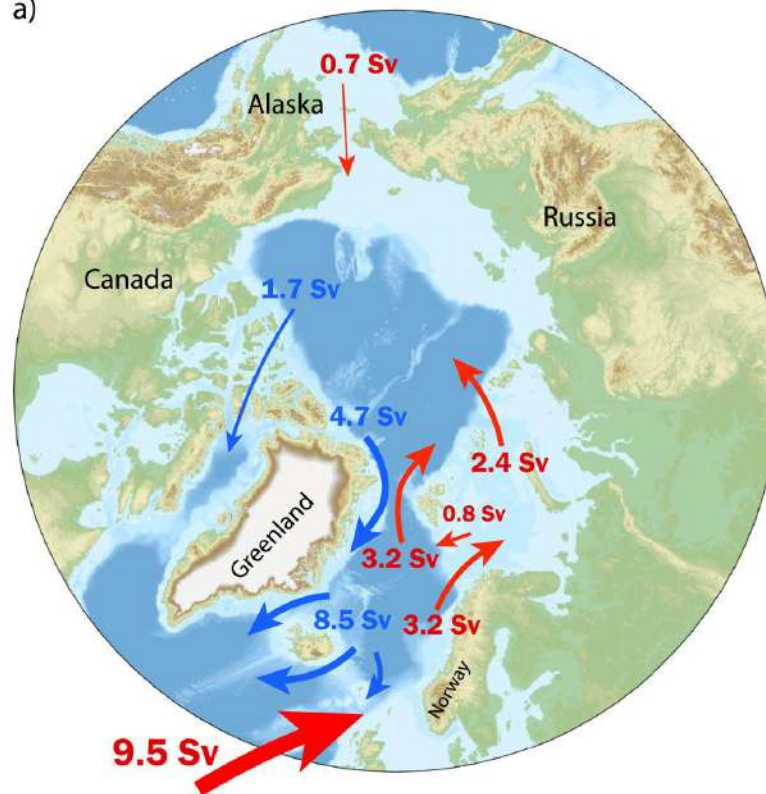


Схемы разрезов ICES 1900-ые  
Источник: Зубов, 1954 (цит.  
по Шокальскому, 1917)

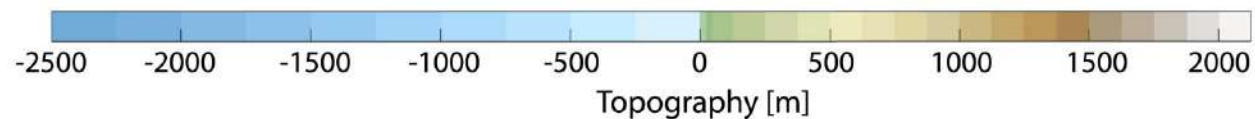
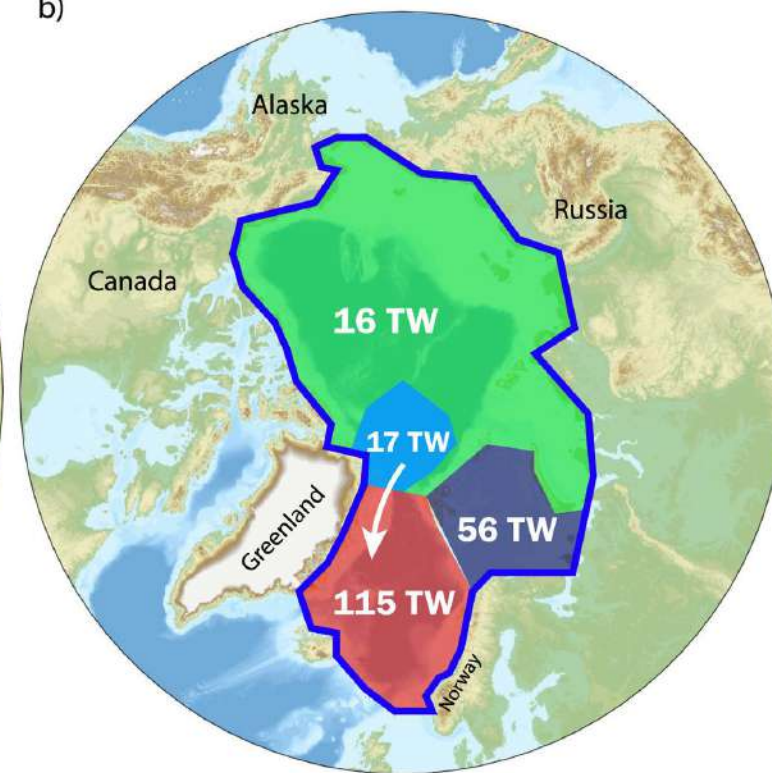
# 125+ лет океанографии СЛО



a)



b)



Источники: Книпович и др., 1904; Smedsrud et al. (2022) цит. по Гордеева, Дешова (2023)

# Как распоряжаемся наследством? от 1900-ых и далее

... Ученый совет ... предложил начальнику этого отряда Ключе попытаться организовать «работы по Кольскому меридиану, имеющие чрезвычайно важное значение не только для выяснения вопросов гидрологии и биологии Баренцева моря, но и для вопросов общей климатологии всего нашего Севера» (Дерюгин, **1924**)

... Прошу вынести на решение Ученого Совета ИО РАН ходатайство к администрации ИО РАН о подключении института к выполнению разреза «Кольский меридиан» и обмену полученными по нему данными (Титов, **2025**).

# Кольский разрез: как работалось? а сейчас?

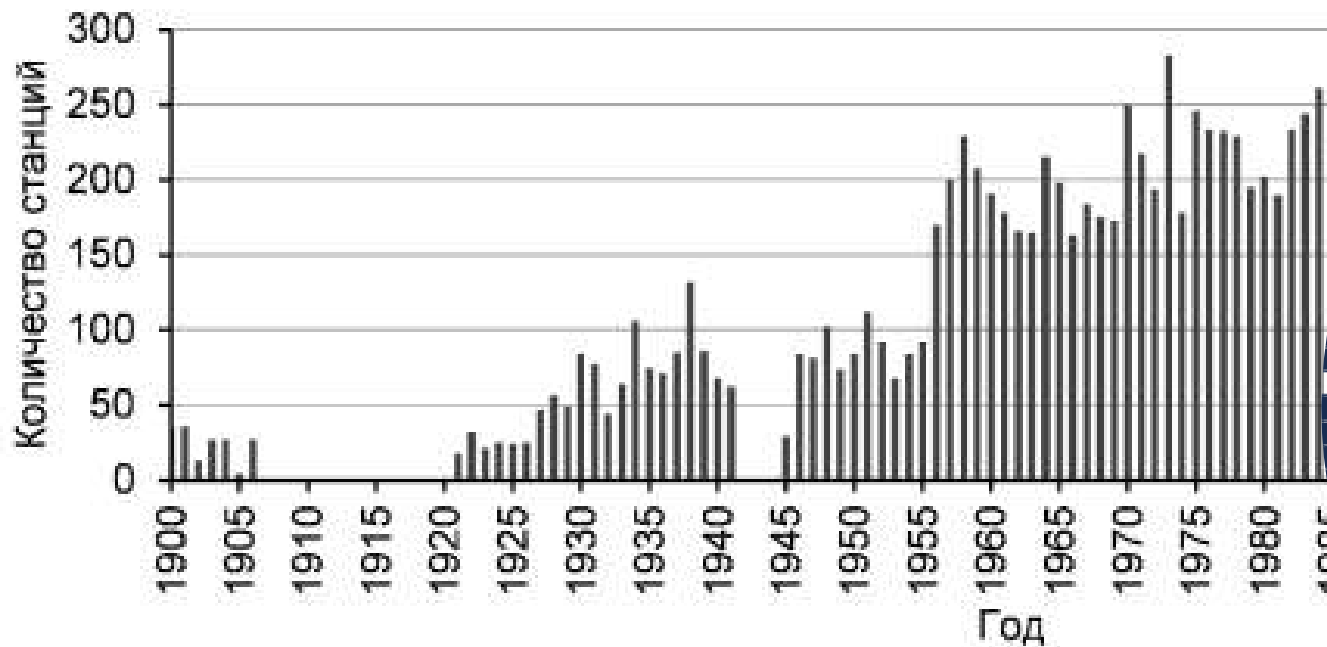
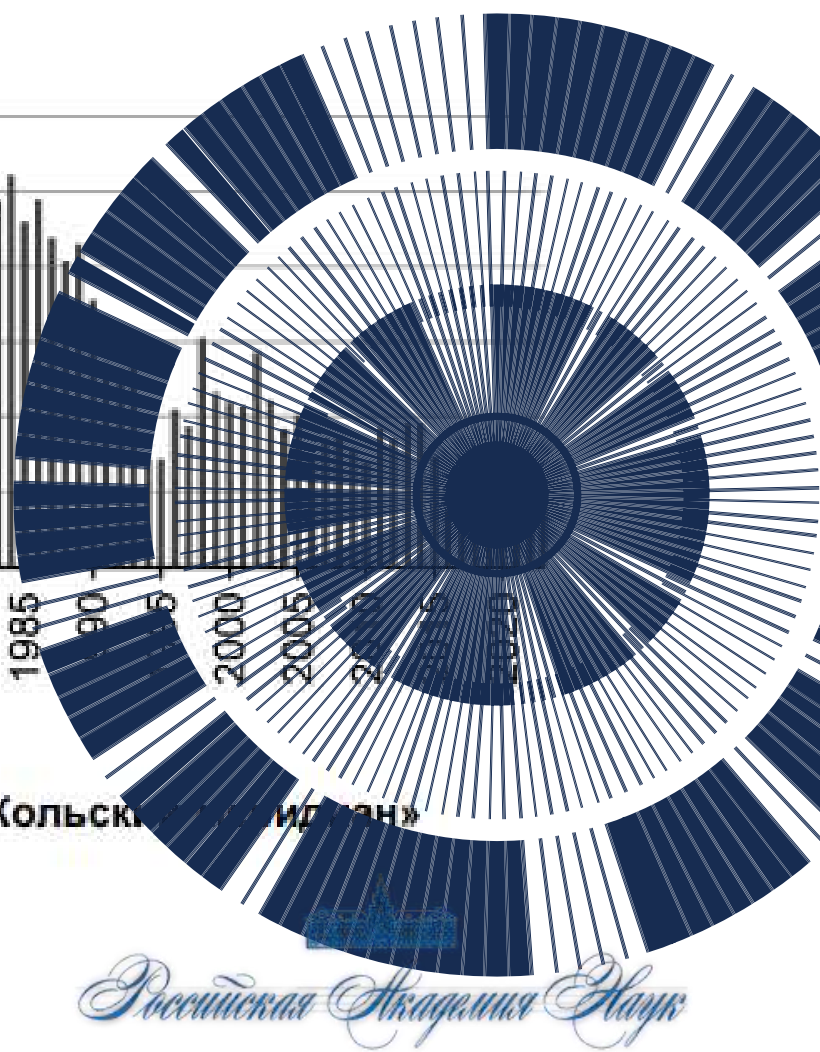


Рис. 4. Количество станций, выполненных на разрезе «Кольский меридиан» в 1900-2023 гг.



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Источник: Карсаков и др., 2024; доклад О.В.Титова, ИО Ширшова 28.02.2025



*Российская Академия Наук*



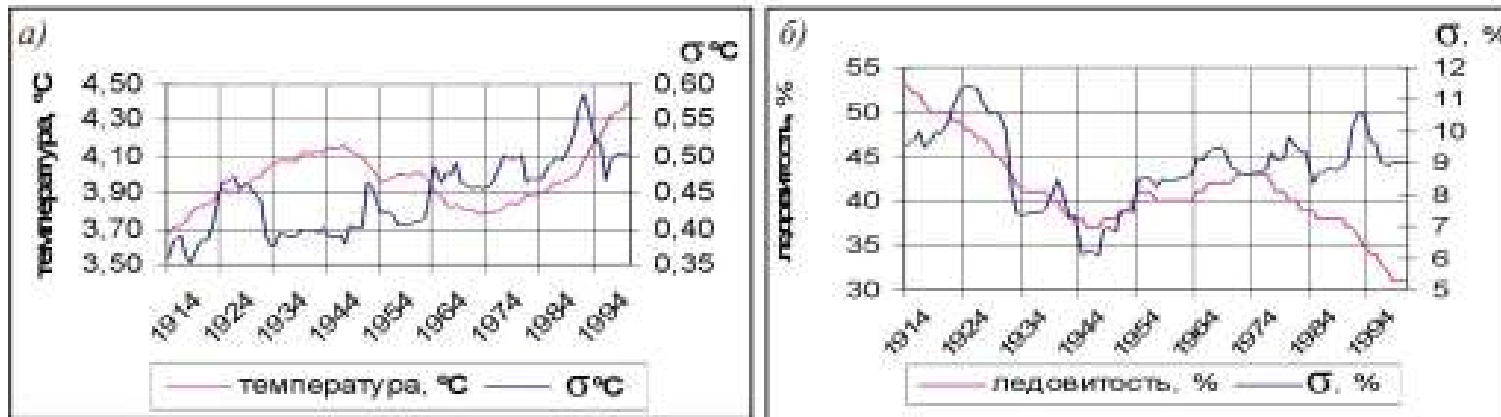


Рис. 3. Скользящее 30-летнее осреднение температуры воды и ее среднего квадратического отклонения в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан (а) и аналогичное осреднение ледовитости Баренцева моря (б). Год указывает середину 30-летнего интервала осреднения.

Источники:  
Бойцов и др., 2010;  
Карпова и др. 2017

# Смотрим на ряды I: физ.-статистические методы РГГМУ

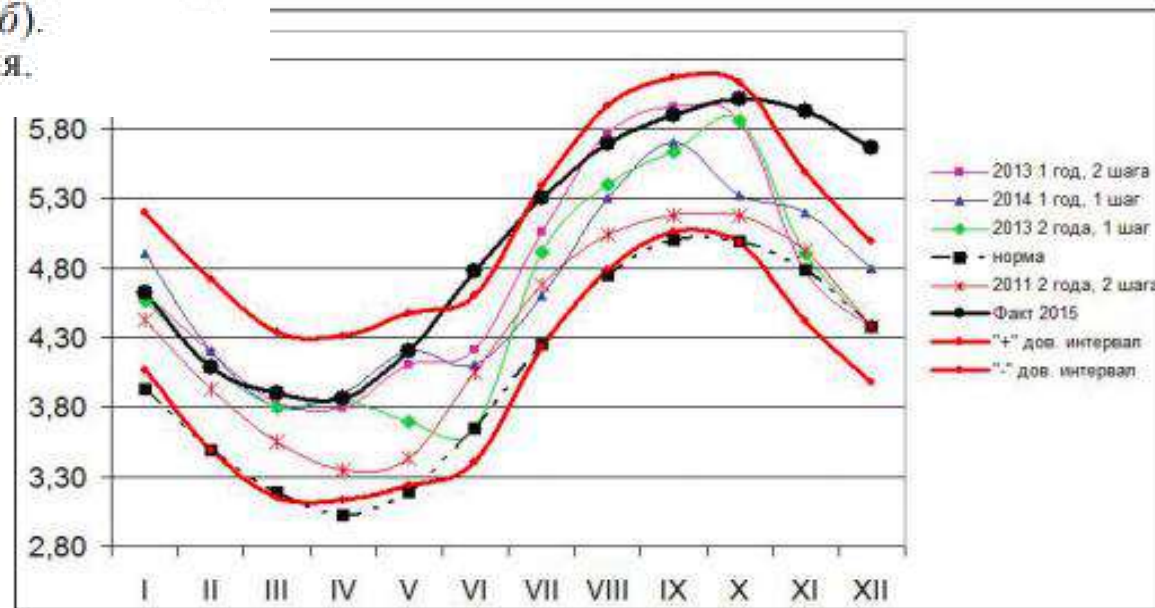
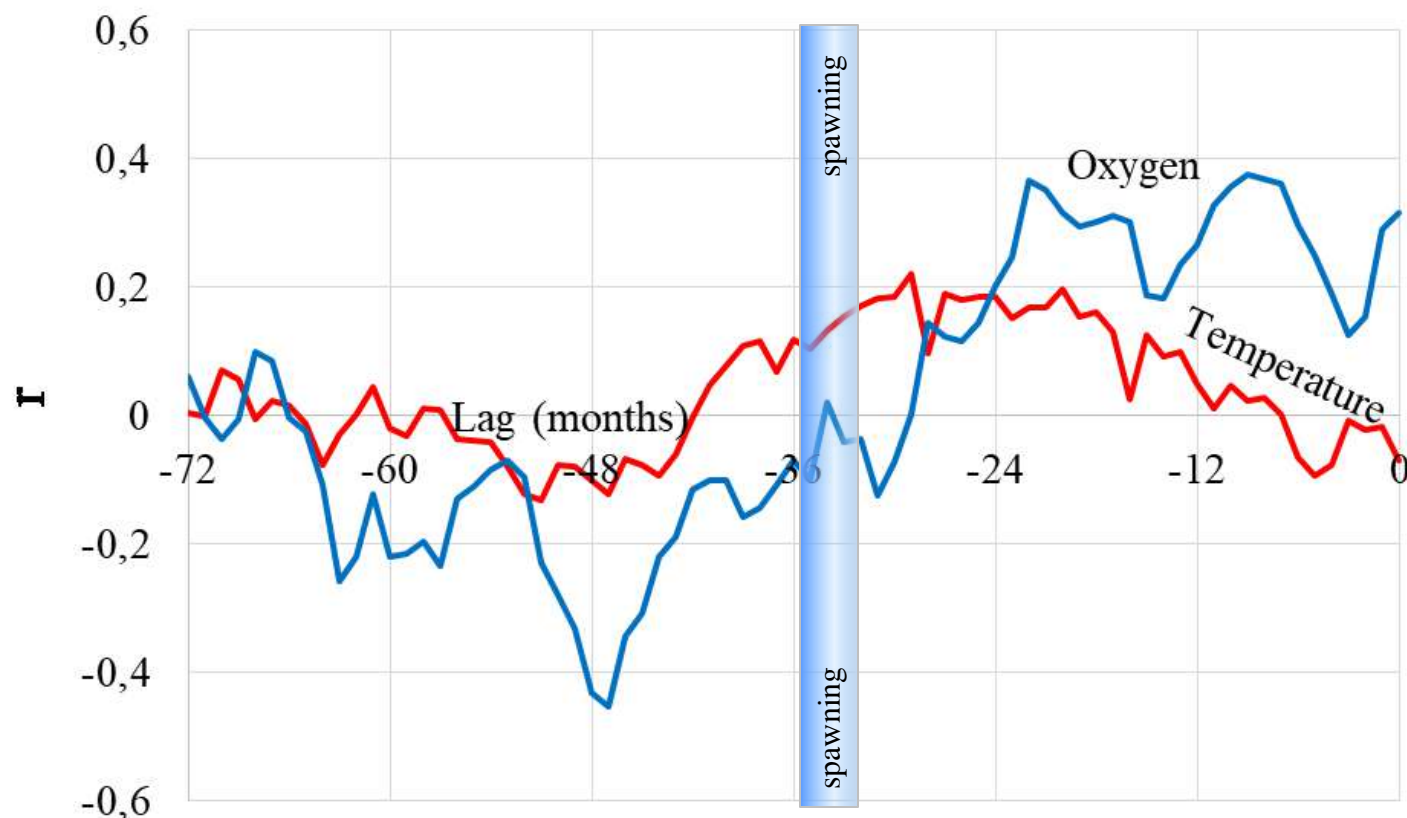


Рис. 1. Опытные прогнозы среднемесячной температуры воды в слое 0—200 м на разрезе Кольский меридиан по данным станций 3—7 заблаговременностью 1—4 года на 2015 г., составленные в 2011—2014 гг.

Таблица 1. Корреляция между температурой воды в слое 50—200 м на Кольском разрезе и площадью льда в Баренцевом море в 1979—2014 гг.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Коэффициент корреляции	<b>-0,83</b>	<b>-0,82</b>	<b>-0,70</b>	<b>-0,78</b>	<b>-0,87</b>	<b>-0,83</b>	-0,67	-0,48	-0,26	-0,28	-0,44	-0,70

Примечание. Полужирным шрифтом выделены коэффициенты 0,79 и более (по модулю).



# Смотрим на ряды II : физ.-статистические методы ААНИИ / ПИПРО

Кросс-корреляция среднемесячных данных по температуре воды (0-200 м) КМ, насыщению кислородом придонных вод и численности пополнения СВА трески в возрасте 3 лет на временных лагах до 6 лет (72 месяцев). Вертикальной линией выделены сроки нереста.

Источники:  
Алексеев и др., 2019;  
Титов, 2025

# В чем физика процесса, что мы узнаём через стандартные разрезы?

РД 52.10.918-2022



Рисунок В 7 – Схема размещения восточных океанографических разрезов на Баренцевом и Печорском море

Тепловые балансы ДС большинства открытых морей РФ отрицательны (Леонов, 1960), следовательно адвекция тепла течениями является характерной чертой океанографического режима морей РФ.

Соответственно, ... океанографические разрезы кроме своего прямого назначения могут быть использованы для исследований пространственно-временной изменчивости морских гидрологических и гидрохимических характеристик, при расчетах водообмена, водного, солевого и теплового балансов морей и при других расчетах (климат - ГК).

Источник: ГОИН (2022)

# Методы исследований климата



М.И. Будико основывал теорию климата на балансовых методах (1950-ые). Спустя два десятилетия переключился на палеоклимат и остался верен ему до конца. Первым предсказал таяние льдов в Арктике.

Источник: Doose, 2022

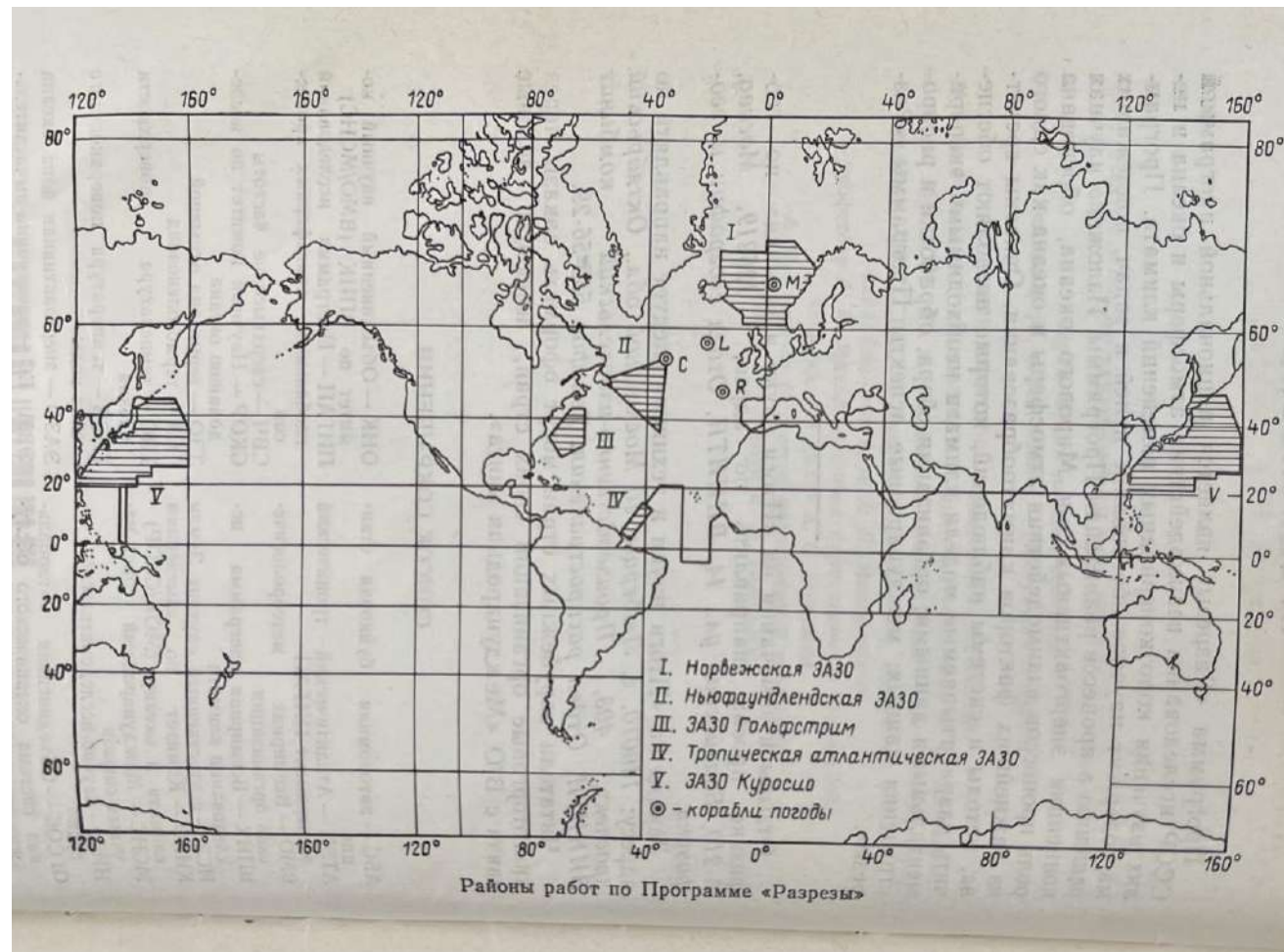


Ю.А.Израэль руководил Росгидрометом в 1974-1991 гг. РД по стандартным разрезам разработано в его время и действует до сих пор и в ближайшем будущем



Г.И.Марчук возглавлял Отдел вычислительной математики РАН. Лидер численного моделирования климата через взаимодействия океана и атмосферы.

# Карта смелости ГИМ (+ соавт.) Программа Разрезы

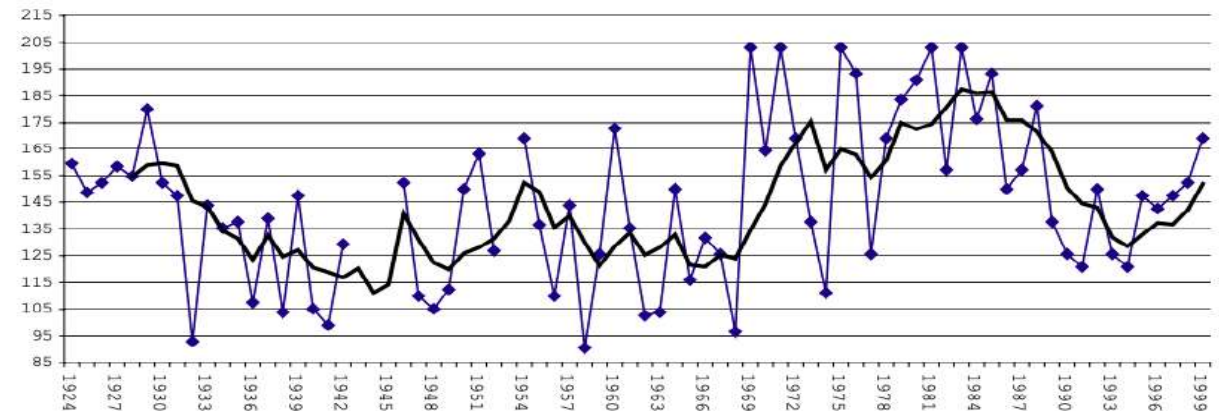
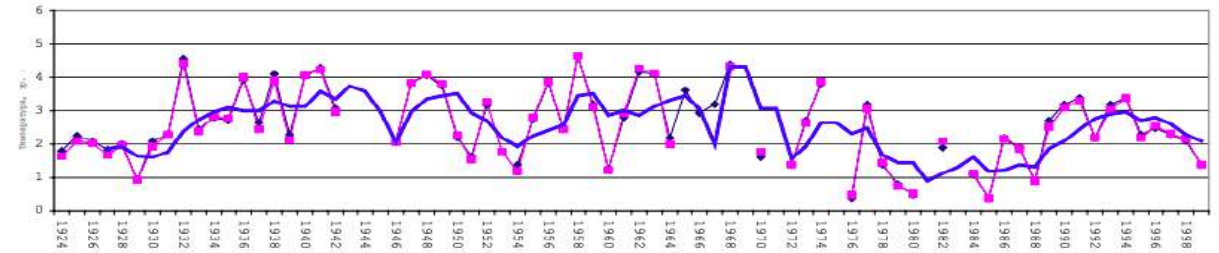
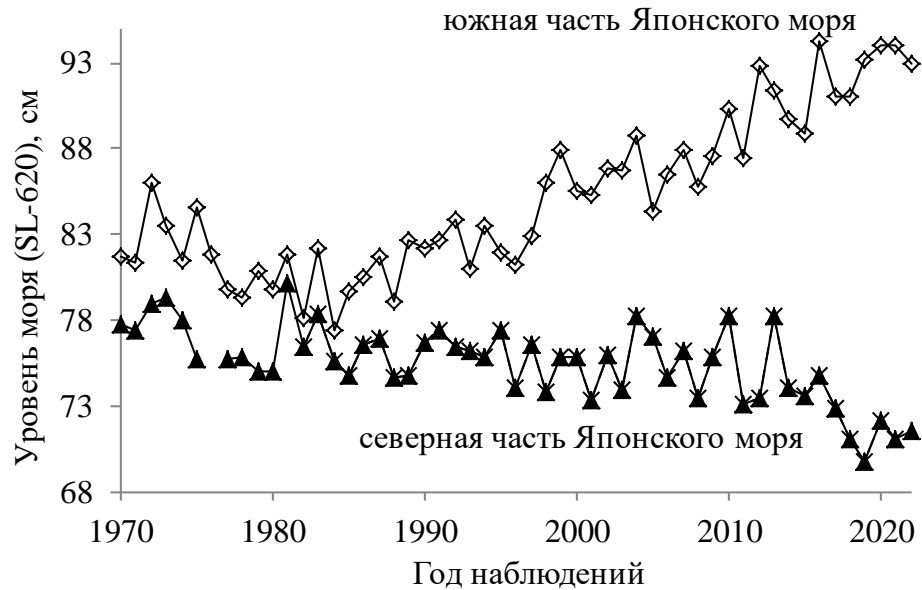


- Касалась: Норвежской, Ньюфаунденской, Гольфстрима, Атлантической экваториальной, Курошио;
- Точность для спутниковых измерений  $T=0.20\text{ C}$

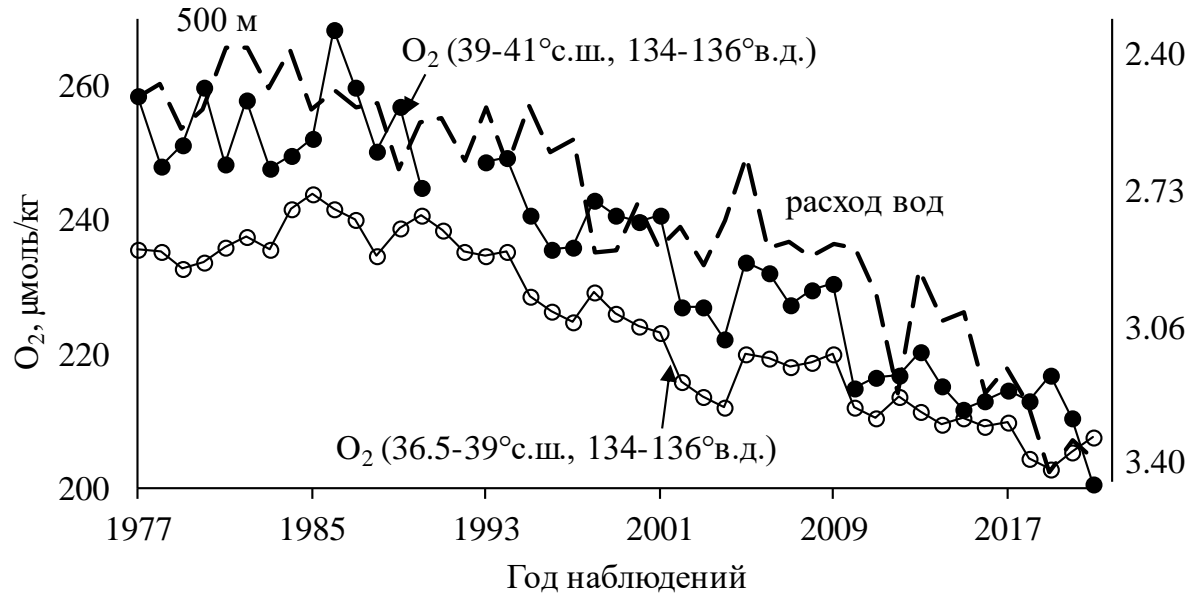
Источники:

Марчук и др., 1983;  
Данилина и др. 1984;  
Марчук и др., 1984.

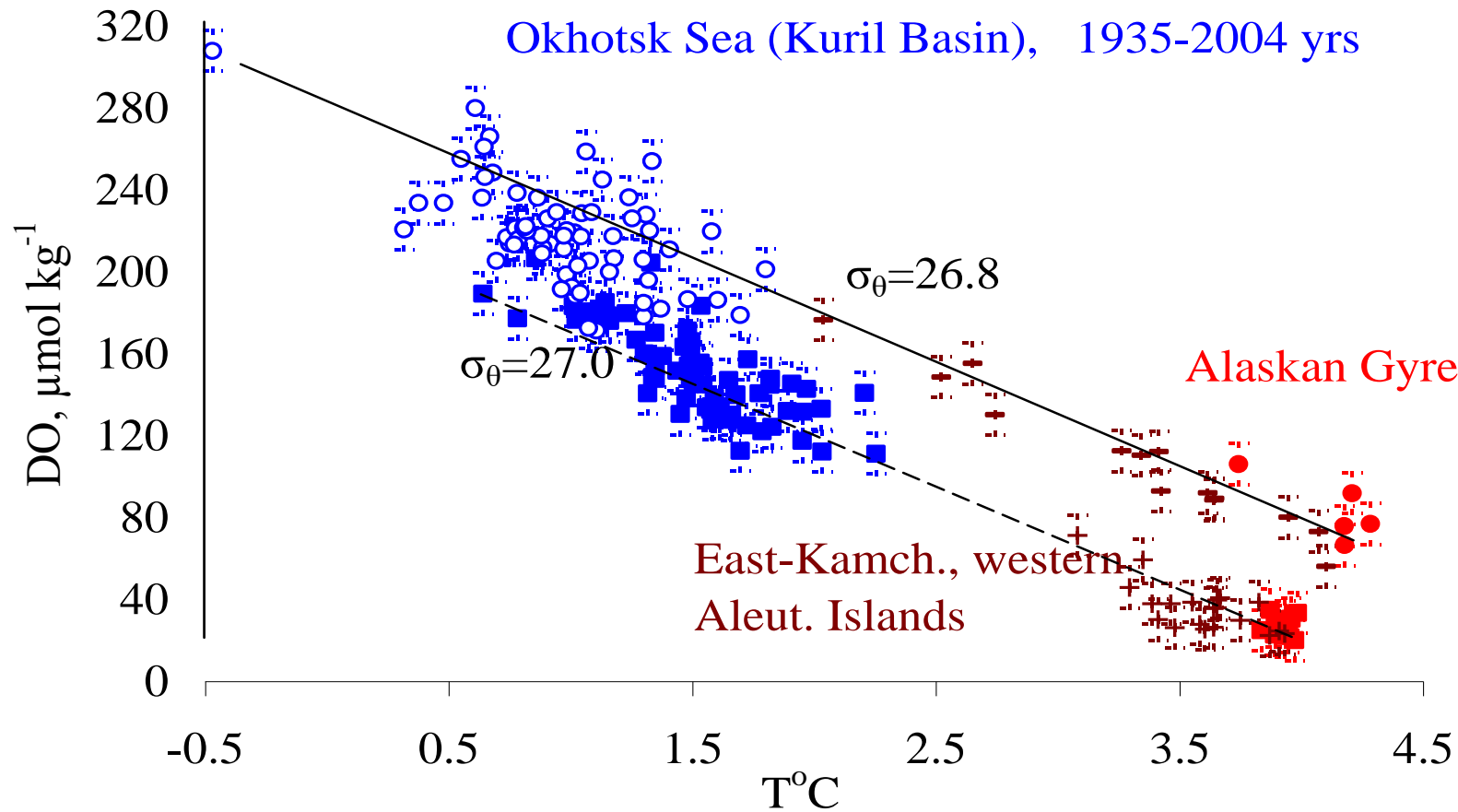
# Пора затронуть климат (I) Японское море



Источники: Андреев (2010, 2014, 2018)  
Tarasyuk, 2002.

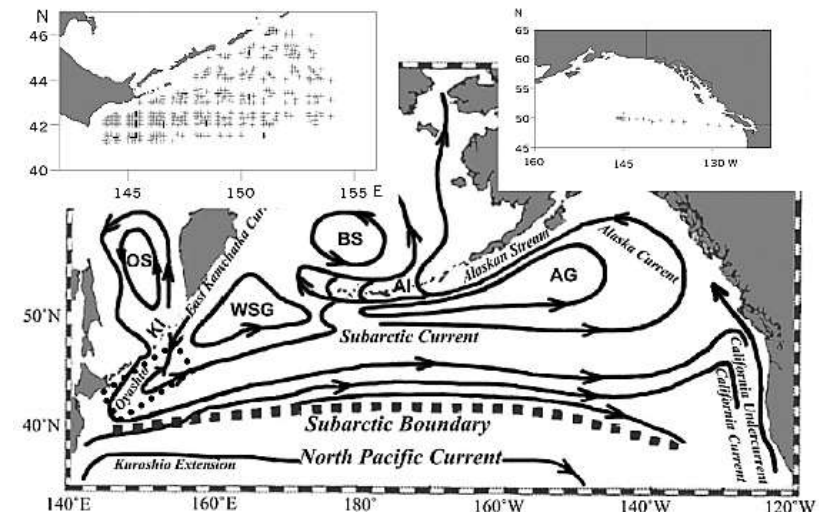


# Пора затронуть климат (II) Охотское море



Усиление Субарктического круговорота, усиление Аляскинского течения и Восточно-Камчатского течения приводят к потеплению вод Восточной Камчатки с плотностью 26,8 сигма-тета и потеплению вод Охотского моря с плотностью 27,0 сигма-тета.

Источник: Андреев, Батурина 2006



# Экосистемы (I)

...Даже при повторяющихся аналогичных климато-океанологических режимах из-за

многофакторности экологических связей ... **не**

**наблюдается одинакового**

**отклика**... и повторения подобия ... Имея достоверные ряды, можно судить, по крайней мере о тенденциях развития на ближайшие годы.

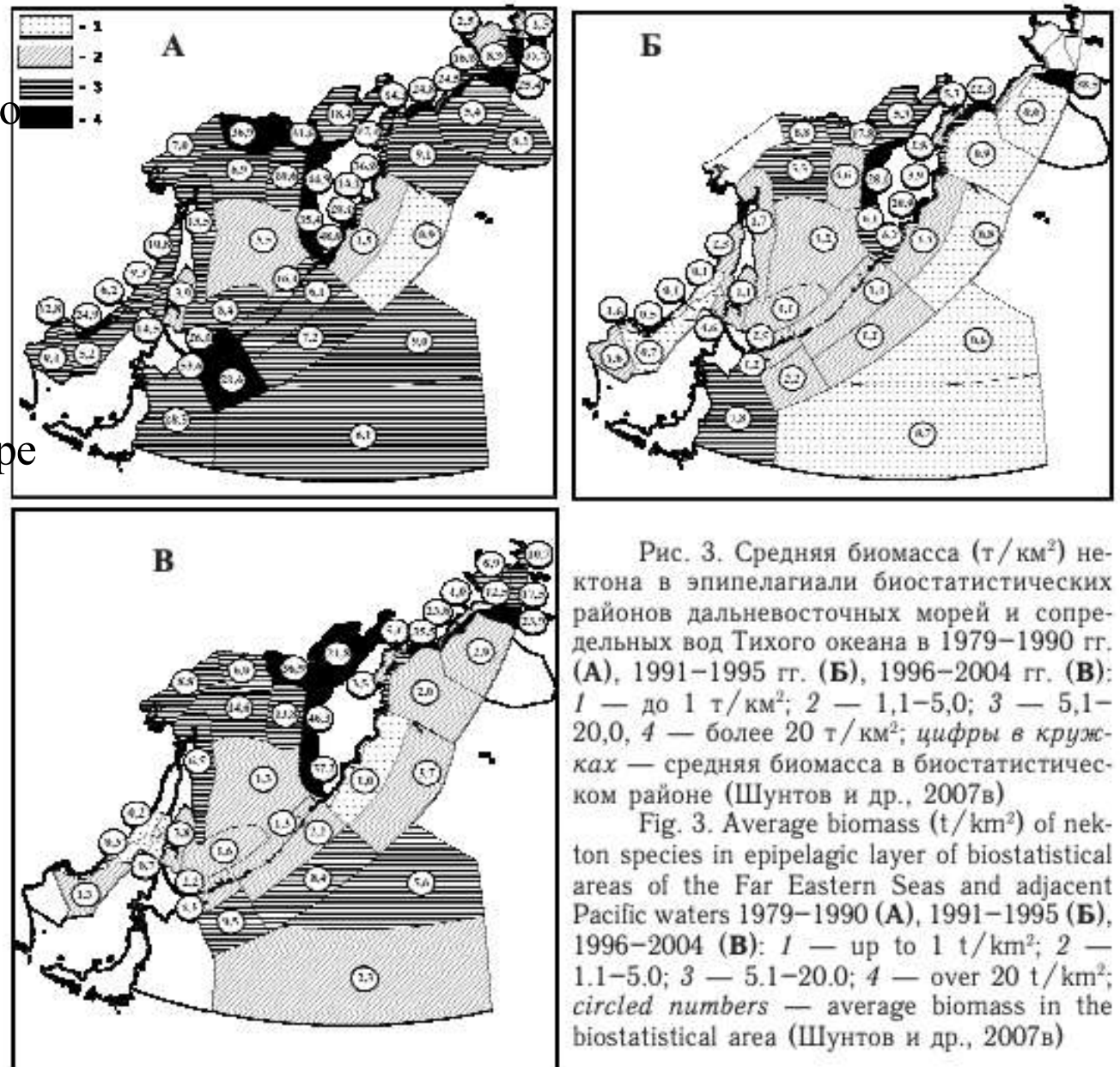
**Несмотря** на многолетние наблюдения...

изменения в биоте оказывались внезапными...

Мощное кокколитофорное цветение, нестабильность макропланктона, депрессия ушастых тюленей, массовая гибель серых китов И тонкоклювых буревестников...

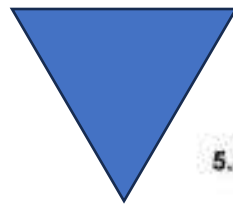
**Ключ** – прогресс в изучении и понимании закономерностей и причинно-следственных механизмов... экосистемы моря в целом.

Источник: Шунтов, Темных 2008 + список литературы к Сл. 16





# Экосистемы (II)



## ESORATH/ECOSIM

### Сценарии проверки гипотез

Изучение влияния изменений первичной и вторичной продукции на каждый круговорот.

Изучение сезонности изменений в каждой системе;

Изучение роли увеличения первичной продукции на численность нерки;

Изучение роли хищничества в регуляции численности популяции:

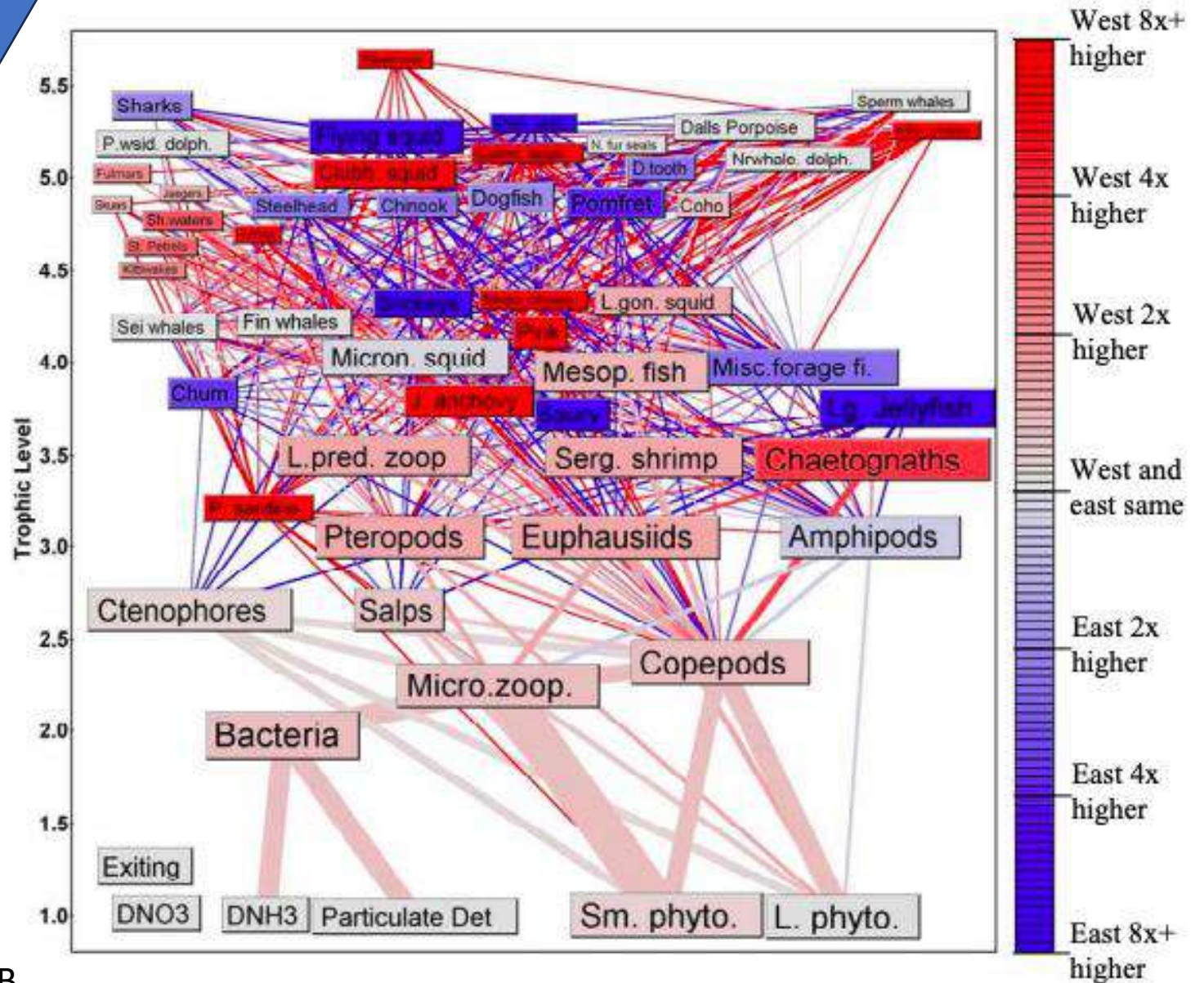
акула/лосось

морское млекопитающее/лосось

Изучение роли морских птиц в круговороте;

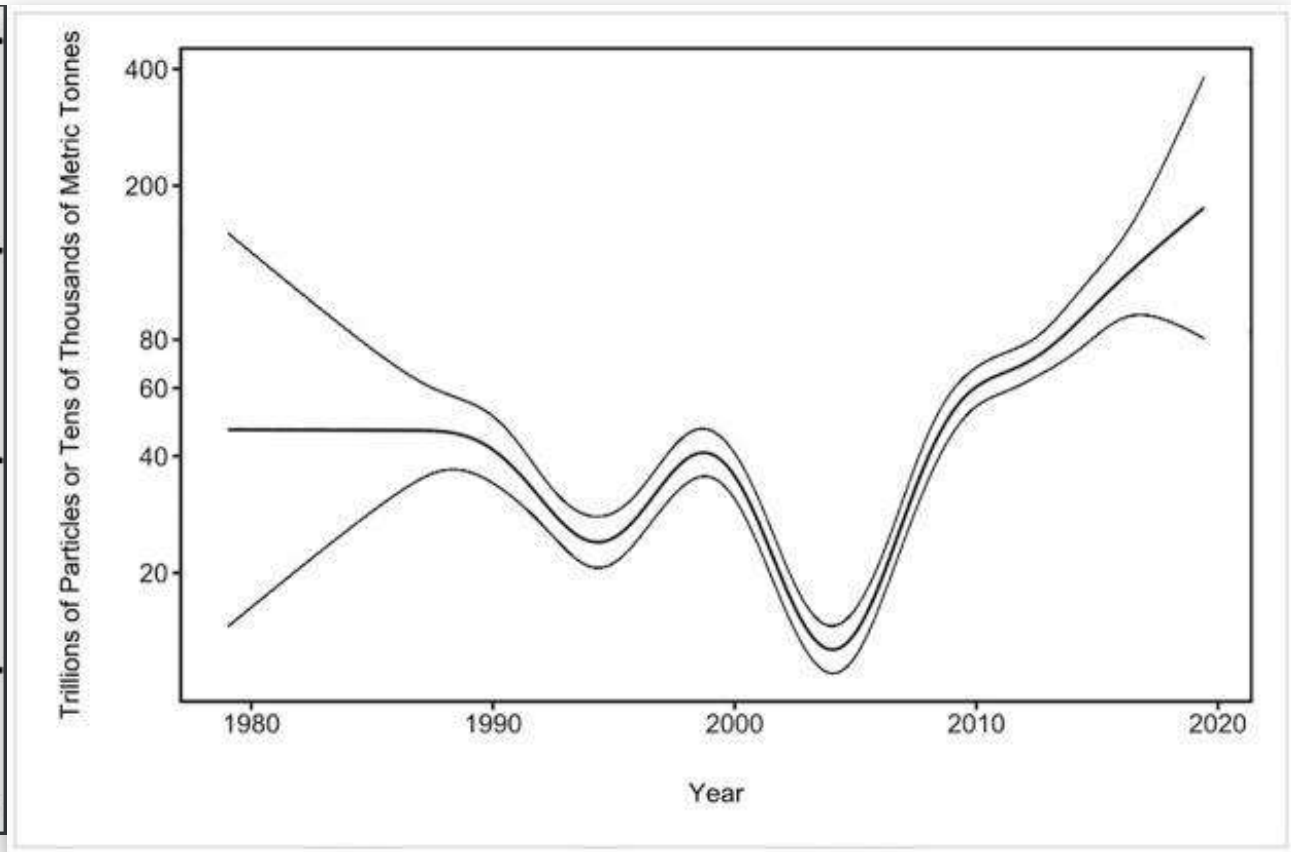
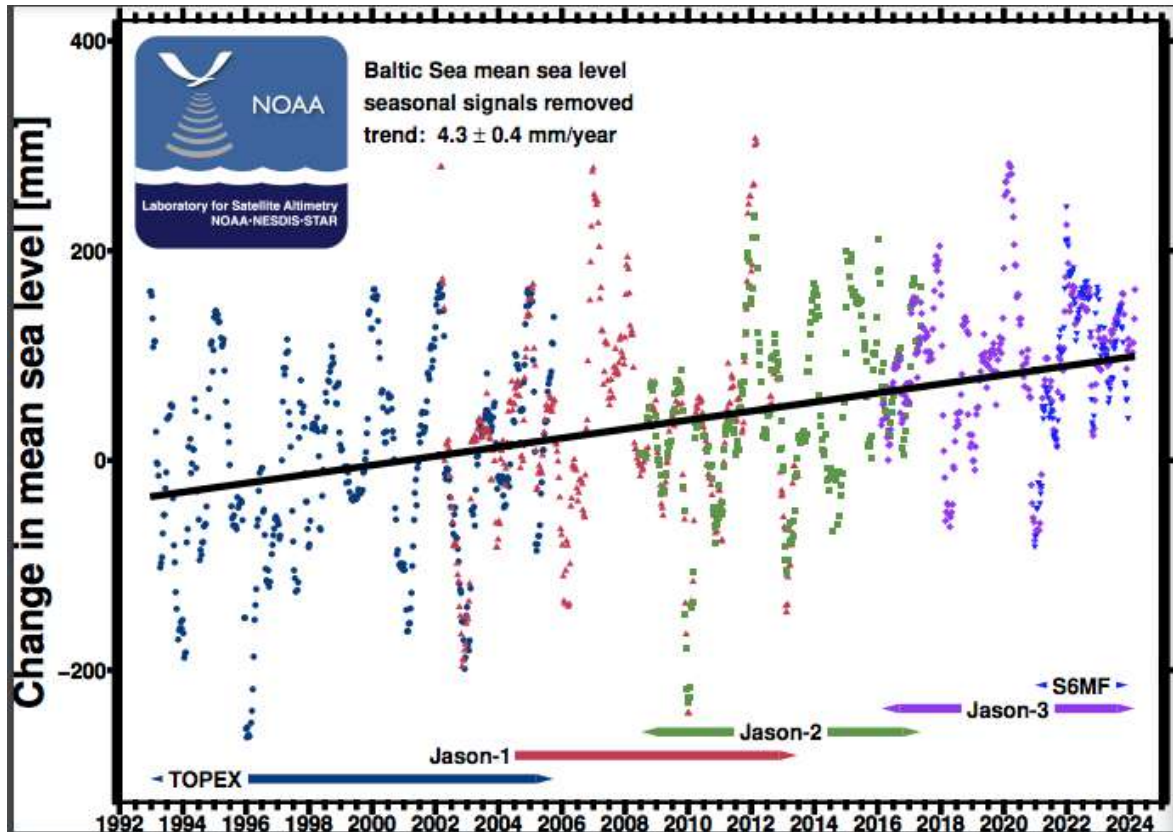
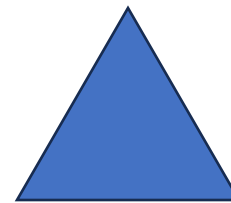
Изучение роли кормовой рыбы в круговороте;

Изучение конкуренции видов за добычу, горбуша/нерка; морской лещ/кальмар и т. д.



Источник: McFarlane G., Krovnin A., Megrey B. and Kishi M. 2002; Динамика экосистем...(2000)

# SUPER HABITAT & IN SITU (I)

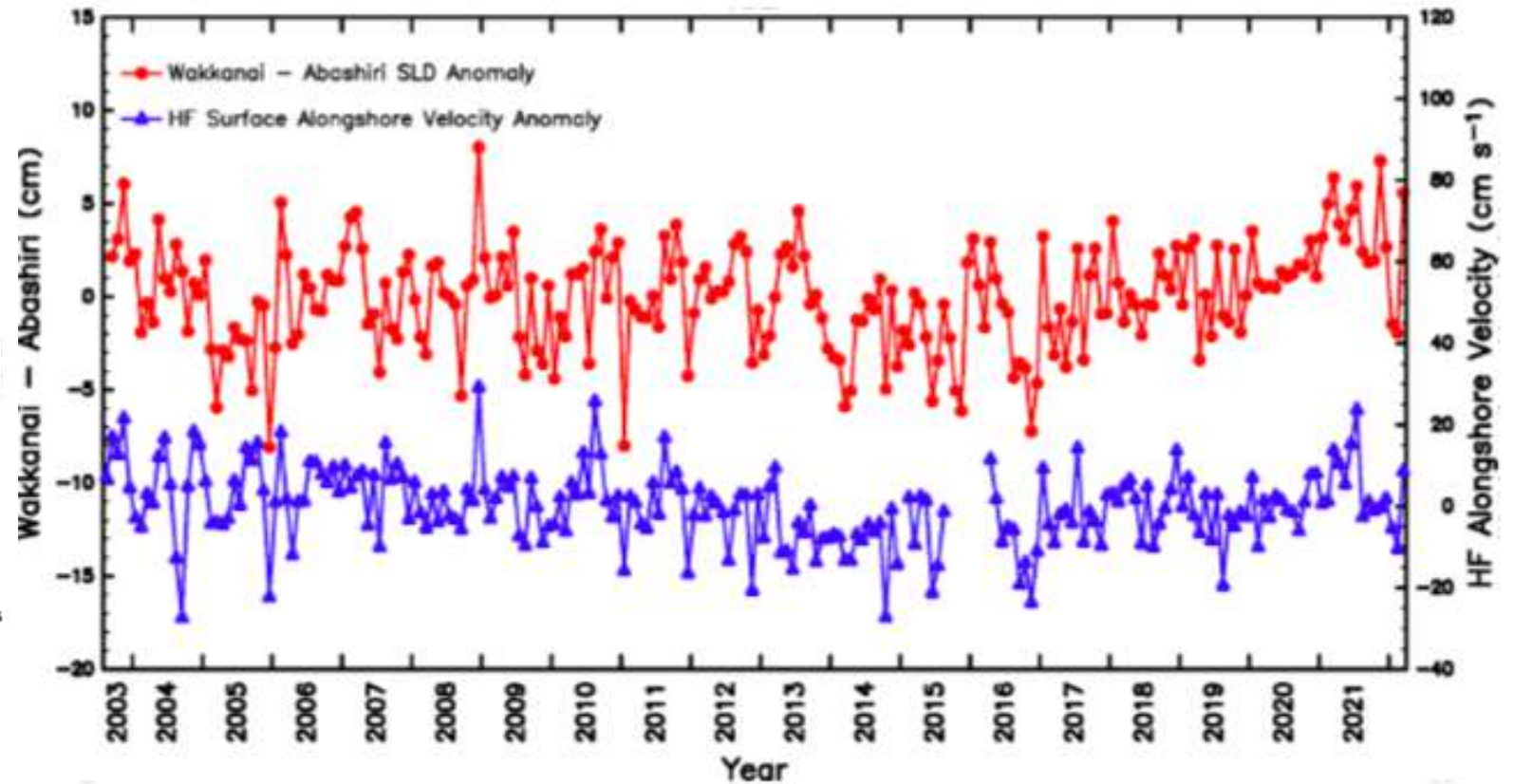
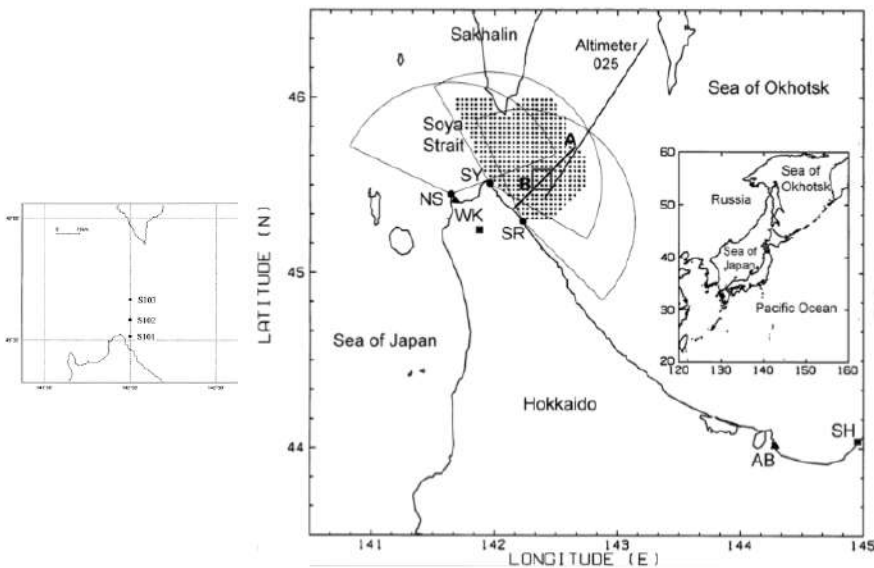
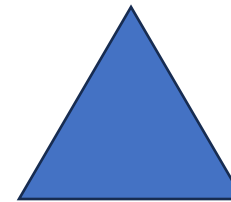


Ход уровня Балтийского моря

Количество микропластика по всем сетным ловам Мирового океана

Источники: NOAA ([https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php)); Eriksen et al., 2023

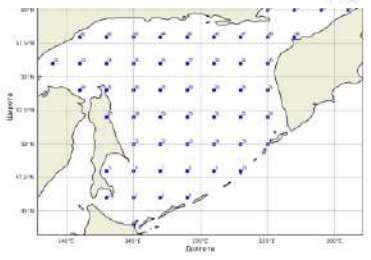
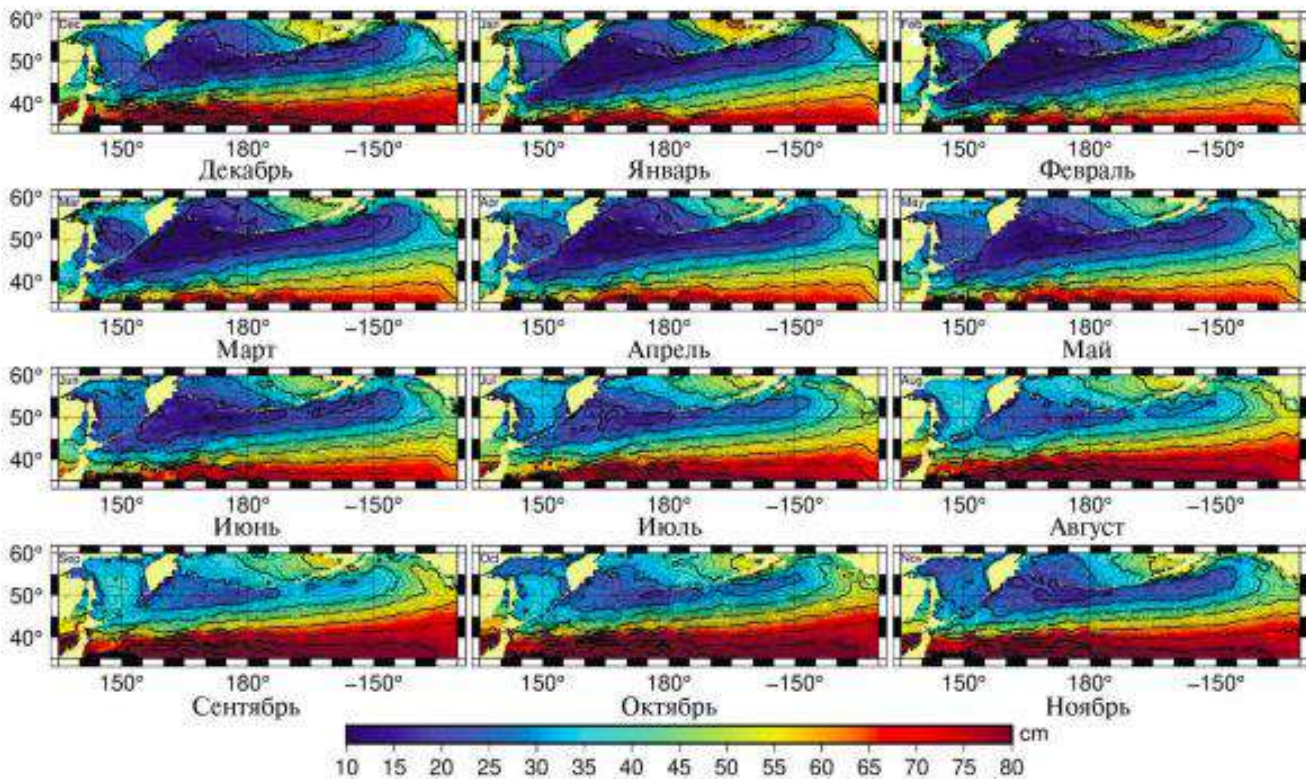
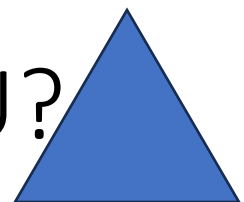
# IN SITU & SUPER HABITAT (II)



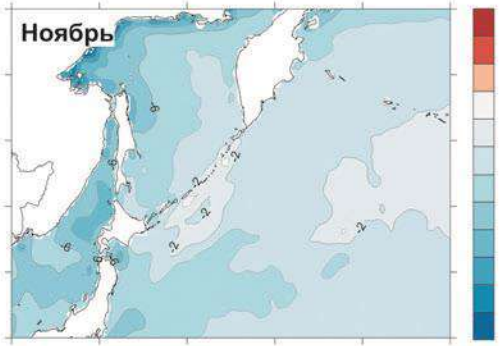
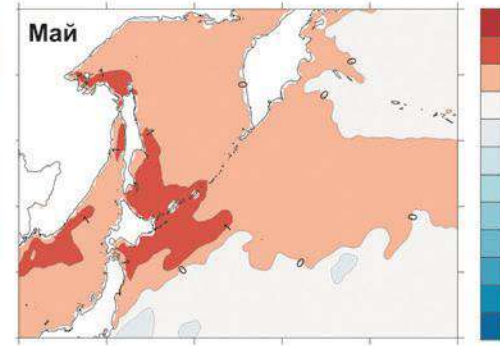
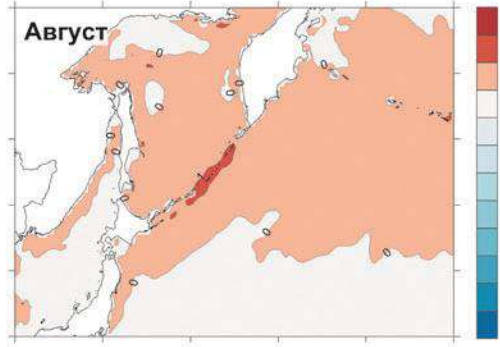
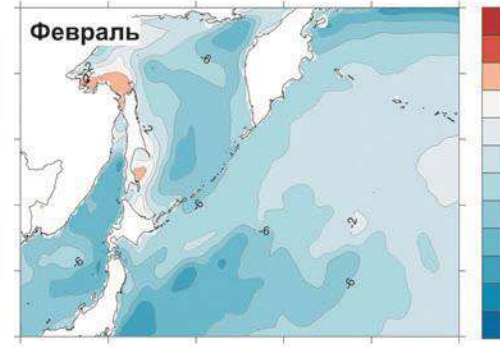
Пре-, и пост измерения расхода ( $Sv$ ) через пролив Лаперуза за период 1995-2022 гг.

Источники: Tanaka, Nakata 1999; Ebuchi et al., 2024

# SUPER НАБИТАТ (III), а где IN SITU?

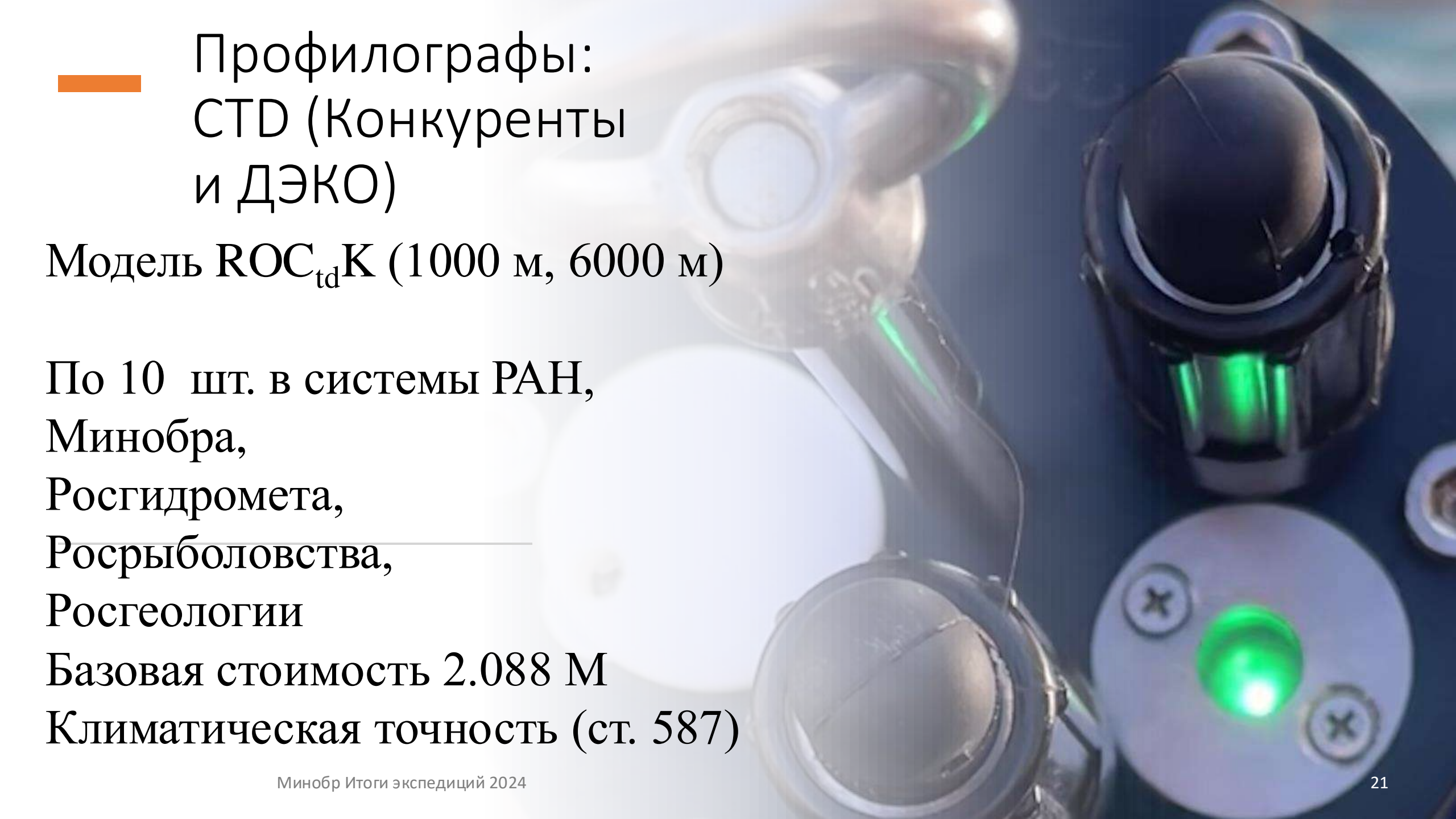


Среднемесячное распределение абсолютной динамической топографии в северо-западной части Тихого океана за период 1992–2020 гг.



Средние многолетние пространственные распределения потока явного тепла в изучаемом регионе (в МДж/м<sup>2</sup>) в феврале, мае, августе и ноябре

Источник: Романов, Романов 2023; Романов, Романов в печати; Шевченко, Ложкин 2024



Профилографы:  
СТД (Конкуренты  
и ДЭКО)

Модель  $ROC_{td}K$  (1000 м, 6000 м)

По 10 шт. в системы РАН,  
Минобра,  
Росгидромета,  
Росрыболовства,  
Росгеологии

Базовая стоимость 2.088 М

Климатическая точность (ст. 587)



Если разрезы действ. Сингулярны, то позвольте выводы:

Вековые разрезы Кольский (Баренцево море), Антоновский (Японское море) являются настоящими сокровищами оперативной океанографии СубАрктики и ее климата. Прямо сейчас требуется следующие шаги:

- возобновление регулярных исследований НА РАЗРЕЗАХ для решения текущих задач исследований климата, изменений экосистем, режима морей;

-- пробы автоматизированного сбора данных *IN SITU* + *SUPER HABITAT*;

--- МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ!!!

Создавать и поддерживать новые разрезы для отслеживания долгопериодных изменений в адвективных Северной Атлантике (усилия ИО РАН) и Северо-Западной Пацифике (ТОИ ДВО РАН)

## Вместо послесловия:



1962 г. О-в Парамушир, Северные Курилы. Будущий академик С.Л. Соловьев. Выбор места для сейсмостанции (источник: [www.ocean.ru](http://www.ocean.ru)); Flicki Oglebay Dormer, 1988 возле буя Frank Snodgrass capsule, названного в ее честь, спустя 18 лет после постановки и дрейфа (источник: Munk et al., 1989).





Идеи академика С.Л. Соловьева по цунами и техника, наконец-то соединены в технологии четвертого поколения (G4) – системе, способной распознать цунами в дальней, и в ближней зоне.

**Думать и делать!**

**Спасибо!**

Тихий океан 2014, GK

# Список литературы

Нагакуре : the book of the samurai by [Wilson, William Scott, 1944](#); [Yamamoto, Tsunetomo, 1659-1719, P.200](#).

Экспедиция для научно-промысловых исследований у берегов Мурмана.1904.Сост. Н.М. Книповичем при содействии К.П. Ягодовского и Н.С. Жихарева. Т. 1-2; Ком. для помощи поморам рус. Севера Т. 2. Ч. С 112.

ICES Convention and rules of procedure. [##] pp. <https://doi.org/10.17895/ices.pub.8525>

Зубов Н.Н.1954.Отечественные мореплаватели-исследователи морей и океанов. Госиздат геогр. Литературы.М.С.475.переиздание Паулсен.2013 г.

Гордеева С.М., Дешова Д.В. Водный, тепловой и солевой баланс юго-восточной части Баренцева моря. Проблемы Арктики и Антарктики. 2023;69(4):407-420. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-407-420>

Smedsrud, L. H. , Muilwijk, M. , Brakstad, A. , Madonna, E. , Lauvset, S. K. , Spensberger, C. , et al. (2022). Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century. Reviews of Geophysics, 60, e2020RG000725. <https://doi.org/10.1029/2020RG000725>

Дерюгин К.М. Баренцово море по Кольскому меридиану (33 0 30' в.д.) // Труды Северной Научно-Промысловой Экспедиции. Вып. 19. М.; Л., 1924. С. 3.

Титов О.В. Доклад ИО РАН УС 28.02.2025 (интернет источник)

Карсаков А.Л. (ред.).2024. Материалы всероссийской научно-практической конференции, посвященной 125-летию векового разреза «Кольский меридиан» (г. Мурманск, 27-28 марта 2024 г. С.254.

Бойцов В.Д., Карсаков А.Л., Аверкиев А.А., Густоев Д.В., Карпова И.П. 2010. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 15.с.с..135—149.

И.П. Карпова, Д.В. Густоев, А.С. Аверкиев. 2017. ОБ ОЦЕНКЕ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СЕВЕРНОМ ПРОМЫСЛОВОМ БАССЕЙНЕ. Ученые записки РГГМУ. № 49. сс. 73—81.

Г. В. Алексеев, А. Е. Вязилова, Н. И. Глок, Н. Е. Иванов, Н. Е. Харланенкова. 2019. ВЛИЯНИЕ АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В НИЗКИХ ШИРОТАХ ОКЕАНА НА КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА АРКТИКИ И ИХ ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ. Арктические исследования в Арктике.с.с.73-83.

Итоги науки и техники.1983. Ред. Марчук Г.И. Программа исследований взаимодействия атмосферы и океана в целях изучения короткопериодных изменений климата (Программа «Разрезы»).Т.1.М.ВИНИТИ.С.60.

Итоги науки и техники.1984. Ред. Данилина И.П. Опыт осуществления радиационной подпрограммы АТЭП и программа «Разрезы».Т.2.М.ВИНИТИ.С.104.

Итоги науки и техники.1984. Ред. Марчук Г.И. Требования к составу и к точности спутниковой информации в исследованиях по программе «Разрезы».Т.3.М.ВИНИТИ.С.36.

Леонов А. К.1960.Региональная океанография.Ч.1.С.765.Гидрометеиздат.

ГОИН.2022.ПОЛОЖЕНИЕ О ВЕКОВЫХ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ РАЗРЕЗАХ НА МОРЯХ, ОМЫВАЮЩИХ БЕРЕГА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.2022. РД 52.10.918–2022. С.78.

Doose, K. 2022. Modelling the future: climate change research in Russia during the late Cold War and beyond, 1970s–2000. Climatic Change 171.6. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03315-0>

Andreev A.G. Interannual Variability of water discharge through the Korea (Tsushima) Strait and its influence on the dissolved oxygen content in the Sea of Japan. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2010. Vol. 35. No. 9. P. 633–640.

Andreev A.G. Interannual variations of sea water parameters and chlorophyll a concentration in the Japan Sea in autumn. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2014. Vol. 39. No. 8. P. 542-549. doi: 10.3103/S1068373914080068.

Andreev A.G. Peculiarities of Water Circulation in the Southern Tatar Strait. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. Vol. 54. No. 9. P. 1050–1056.

Tarasyuk S.N. 2002. Survival of yellowfin sole (*Limanda aspera* Pallas) in the northern part of the Tatar Strait (Sea of Japan) during the second half of the 20th century//In PICES SCIENTIFIC REPORT No. 20. pp.71-76.

Andreev, A. G., and V. I. Baturina (2006), Impacts of tides and atmospheric forcing variability on dissolved oxygen in the subarctic North Pacific, *J. Geophys. Res.*, 111, C07S10, doi:10.1029/2005JC003103.

Шунтов В.П., Темных О.С. 2008. МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА БИОТЫ МАРОЭКОСИСТЕМ БЕРИНГОВА МОРЯ И ФАКТОРЫ...//ИЗВ. ТИПРО. Т.155. СС.33-65.

McFarlane G., Krovnin A., Megrey B. and Kishi M. 2002. BASS/MODEL WORKSHOP TO REVIEW ECOSYSTEM MODELS FOR THE SUBARCTIC PACIFIC GYRES//In PICES SCIENTIFIC REPORT No. 20. pp.1-7.

Динамика экосистем Берингова и Чукотского морей. 2000. М. Н. С. 358. Под. Ред. Израэля Ю.А., Цыбань А.В., Гребмайер Д.

NOAA ([https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php));

Eriksen et al., 2023 (PLoS One. 2023 Mar 8;18(3):e0281596.eCollection 2023)

Tanaka Y., Nakata.A.1999. Results of direct current measurements in the La Perouse Strait (the Soya Strait), 1995-1998//In PICES Scientific Report No. 12. Eds. Lobanov V., Nagata Y. and Riser S. pp.173-176.

Ebuchi N., Fukamachi Y., Ohshima K., Mitsudera H., Nishioka J., Takatsuka T., Ono K., Ishikawa M., Daibo T., Shirasawa K., Wakatsuchi M. 2024. Long-term observation of the Soya Warm Current using HF ocean radars: relationship between the Soya Warm Current variability and the sea level anomalies in the Soya/La Perouse Strait.//Journal of Oceanography. 80:239–249 <https://doi.org/10.1007/s10872-024-00724-w>

Романов А.А., Романов А.А.2025. Основные параметры модели мезомасштабной изменчивости Охотского моря по данным спутниковой альтиметрии. Журнал ИКИ РАН.Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса ( в печати).

Шевченко Г. В., Ложкин Д. М.2024. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКА ЯВНОГО ТЕПЛА НА ПОВЕРХНОСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА И ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5. Океанологические исследования. 2024.Т.52. № 3.С.С.77–94

Романов А.А., Романов А.А.2023. Особенности циркуляции северо-западной части Тихого океана по данным спутниковой альтиметрии//Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20. №5. С. 232–245

РГ. 2024. <https://rg.ru/2024/11/25/programma-prioritet-2030-pomogaet-peterburgskomu-politehu-v-sozdanii-inzhenernogo-specnaza.html>

Munk, Walter и Worcester, Peter. 1989. An Oceanographic Time Capsule. Oceanography.Т. 2(1).pp. 48-49.

# Список литературы к слайду № 16

Байталюк А.А., Радченко В.И., Антоненко Д.В., Старовойтов А.Н., Новиков Ю.В. Состояние запасов и перспективы промысла дальневосточной сардины *Sardinops melanostictus* (Temminck & Schlegel, 1846). В кн.: Рыбохозяйственный комплекс России: 300 лет российской академической науке. Мат-лы II Международной научно-практической конференции (27-28 марта 2024 г., г. Москва), ФГБНУ «ВНИРО» / Под редакцией Колончина К.В., Булатова О.А., Межонова А.В., Трубы А.С. М.: Изд-во ВНИРО, 2024. С. 47-52.

Соловьева Д. В., Регель К. В., Павлюков К. Г., Павлюков Г. К. Случай массовой гибели тонкоклювого буревестника *Puffinus tenuirostris* (Temminck, 1835) на Западной Чукотке //

Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2020. № 2. С. 93–97. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2020-2-93-97>

Chiba, S., Batten, S.D., Yoshiki, T., Sasaki, Y., Sasaoka, K., Sugisaki, H., Ichikawa, T. Temperature and zooplankton size structure: climate control and basin-scale comparison in the North Pacific // *Ecology and Evolution*. 2015. 5(4): 968–978. <https://doi.org/10.1002/ece3.1408>

Dunmall, K.M., Bean, C.W., Berntsen, H.H., Ensing, D., Erkinaro, J., Irvine, J.R., Kendall, N.W., Kitching, T., Langan, J.A., Millane, M., Oxman, D.S., Radchenko, V.I., Thorstad, E.B., Utne, K.R. Invading and range-expanding pink salmon inform management actions for marine species on the move // *ICES Journal of Marine Science*. 2025. Vol. 82 (1), fsae199, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae199>

Ladd, C., Eisner, L.B., Salo, S.A., Mordy, C.W., and Iglesias-Rodriguez, M.D. 2018. Spatial and temporal variability of coccolithophore blooms in the eastern Bering Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. <https://doi.org/10.1029/2018jc014302>

Stewart, J.D., Joyce, T.W., Durban, J.W., Calambokidis, J., Fauquier, D., Fearnbach, H., Grebmeier, J.M., Lynn, M., Manizza, M., Perryman, W.L., Tinker M.T., Weller D.W. Boom-bust cycles in gray whales associated with dynamic and changing Arctic conditions // *Science*. 2023. Vol. 382 (6667): 207-211. <https://doi.org/10.1126/science.adi1847>