

# Модельное исследование вклада ветра в межгодовую изменчивость водообмена между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами

Лебедев К.В., Филюшкин Б.Н., Щепёткин А.Ф.

Институт океанологии им.

П.П.Ширшова РАН

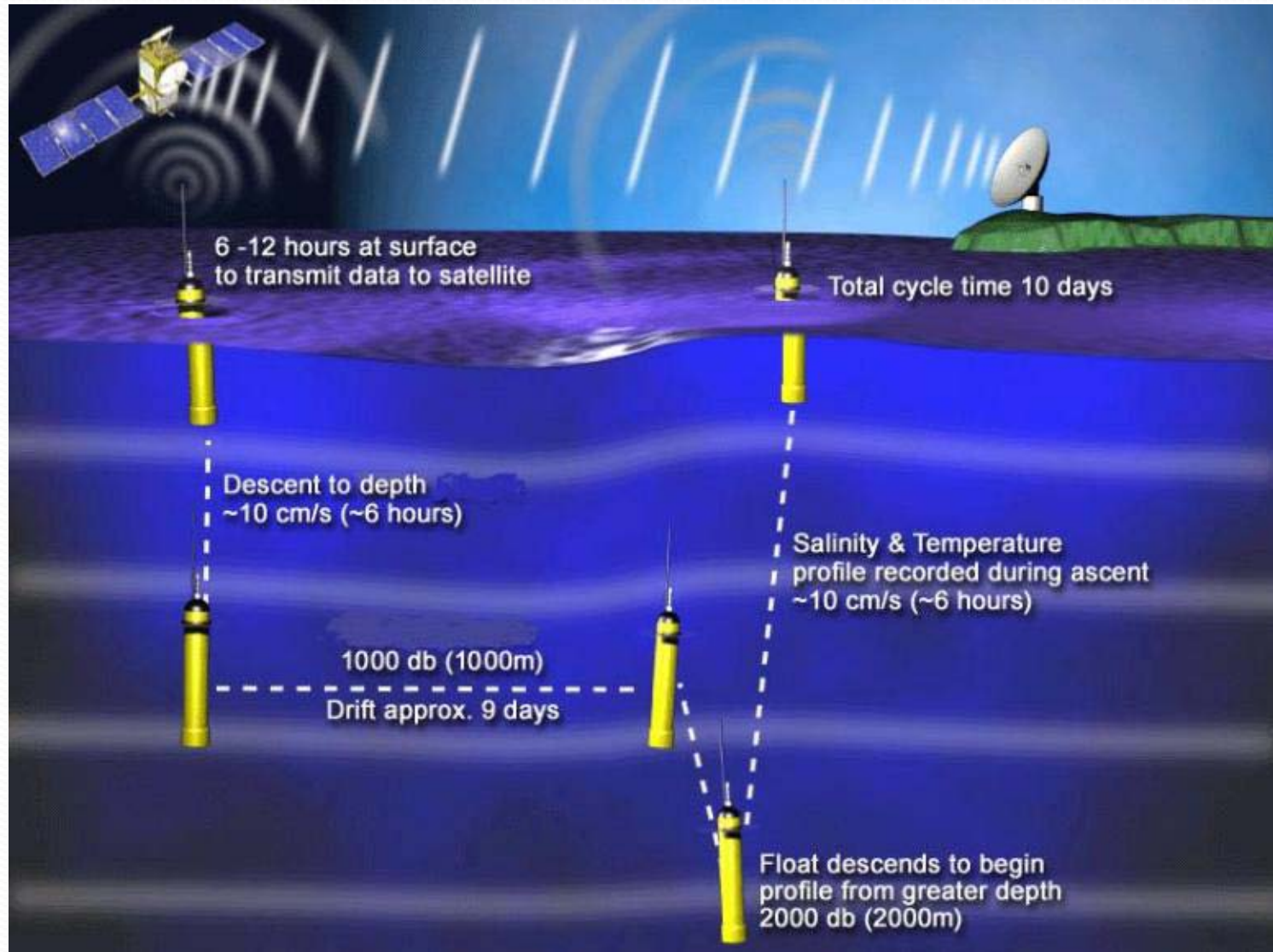
Москва, ИО РАН

18 мая 2021

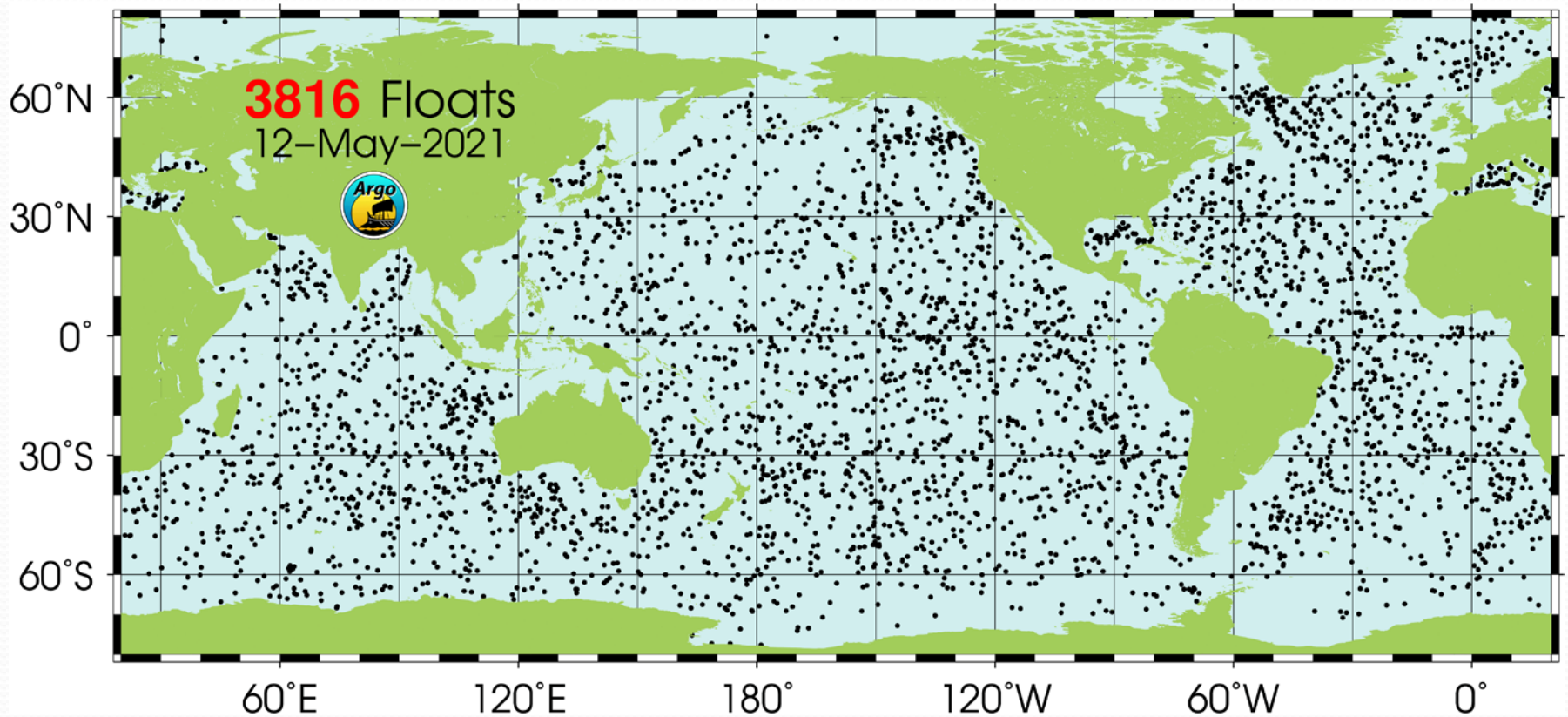
Воды Северной Атлантики, несущие в Арктический регион большое количества тепла и соли, взаимодействуют с холодными и менее солеными водами морей Северного Ледовитого океана. Эти процессы взаимодействия различных водных масс в основном происходят в пределах Норвежского и Гренландского морей. Поступление большого количества тепла и соли с водами Северной Атлантики, с одной стороны, создает уникальную переходную область с особым региональным климатом, когда в арктических широтах в течение всего года моря свободны ото льда. Более того, эта область определяет умеренный климат Западной Европы, а характер и величина затора вод из Атлантического океана тесно связаны с изменчивостью индекса Североатлантического колебания (Лебедев, 2016). С другой стороны, большое количество соли в верхних слоях приводит к развитию вертикальной конвекции и формированию промежуточных и глубинных вод высокой плотности для Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики, которые в значительной мере определяют циркуляцию вод в глубинах Атлантического океана. В связи с тем, что количество гидрофизических наблюдений в приполярных районах ограничено, представляется крайне важным ответить на вопрос о критичности неполноты знаний термохалинных характеристик для корректного численного моделирования особенностей межгодовой изменчивости циркуляции в этом районе.

Проблема недостатка гидрофизических наблюдений в исследуемом районе частично решается за счет появления в последние годы ограниченного количества дрейфующих измерителей программы Арго. Целью международного проекта Арго является создание и поддержание постоянно действующей глобальной сети океанографических станций на основе дрейфующих буй-измерителей. Работа измерителей происходит по следующей схеме. Буй дрейфует около 10 суток на заданной глубине, затем опускается на глубину 2 км и всплывает на поверхность, измеряя температуру и соленость. Во время нахождения на поверхности данные передаются на спутники, которые определяют точное местоположение прибора, после чего буй снова опускается на глубину. Энергии батарей хватает на 3-4 года работы. С 2005 г. измерения с помощью поплавков Арго стали вести на большей части акватории Мирового океана (по состоянию на сегодняшний день в Мировом океане непрерывно работает около 4000 измерителей Арго). Постоянно пополняющиеся массивы измерений позволяют решать задачи реконструкции и мониторинга состояния океана в режиме, близком к реальному времени, и исследовать особенности океанской динамики и ее изменчивости.

# Цикл поплавка Argo



## Argo status



Target of 3000 floats has been reached in Nov 2007  
Nominal density of the array - 1 float per  $3^{\circ} \times 3^{\circ}$  bin



# AMIGO

ocean climate modeling



<http://argo.ocean.ru/>

Арго-Модель Исследования Глобального Океана (**АМИГО**), состоит из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Argo и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей. Такая методика позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Argo полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений. Выполненные расчеты представлены ежемесячными, сезонными, годовыми и среднеклиматическими полями. Созданная по результатам проведенных модельных расчетов в [Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН](#) база океанографических данных АМИГО охватывает 10-летний период с 2005 по 2014 гг.

**Лебедев К.В. Арго-Модель Исследования Глобального Океана (АМИГО)**  
**Океанология. 2016. Т. 56. N. 2. С. 186-196.**

## Вариационная интерполяция данных на регулярную одноградусную сетку

Принцип вариационной интерполяции состоит в минимизации отклонений между проинтерполированными на регулярную сетку полями  $A_g$  и данными нерегулярно расположенных измерений  $A_d$ . Минимизация проводится таким образом, чтобы полученное решение проходило максимально близко к данным измерений.

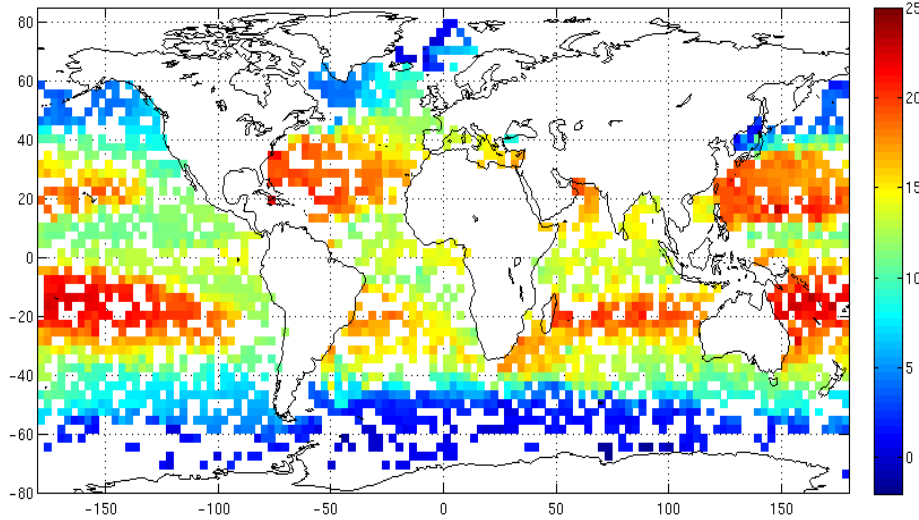
Минимизируемый функционал

$$F = \sum_{n \in L} (A_{g-d}^n - A_d^n)^2 + C_1 \sum_{i,j} (A_g^{i,j} - A_c^{i,j})^2 + C_2 \sum_{i,j} \left( (dX^j)^2 \Delta A_g^{i,j} \right)^2,$$

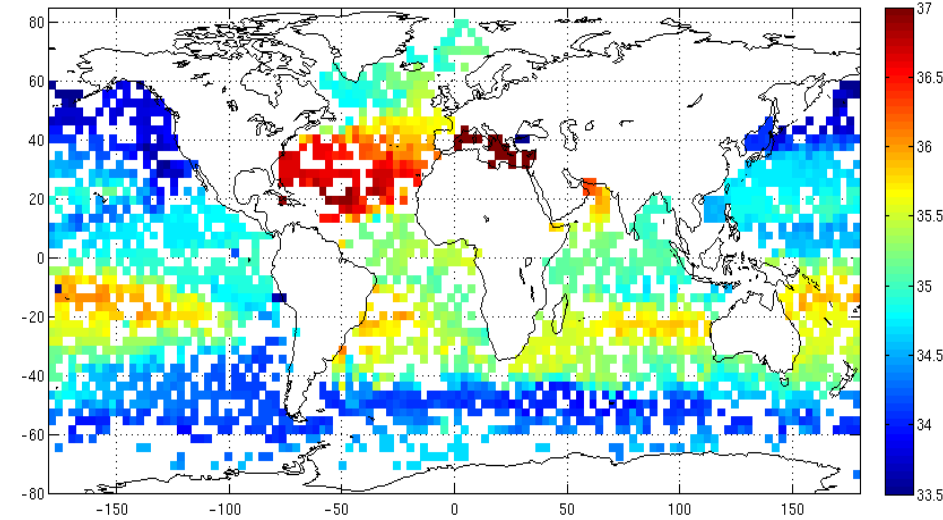
где  $A_g$  - интерполируемая переменная Argo (T, S и т.д.) в узлах регулярной сетки,  $A_{g-d}$  - линейная интерполяция в точку измерения  $A_d$  значений переменной  $A_g$  из четырех окрестных узлов регулярной сетки,  $A_c$  - климатические данные в узлах регулярной сетки,  $dX$  - зональный шаг сетки,  $L$  - временной интервал (месяц, сезон, год и т.п.).

# Температура и соленость на глубине 200 м, полученная осреднением по 3x3 «квадратам» (верх), и вариационно проинтерполированная (низ)

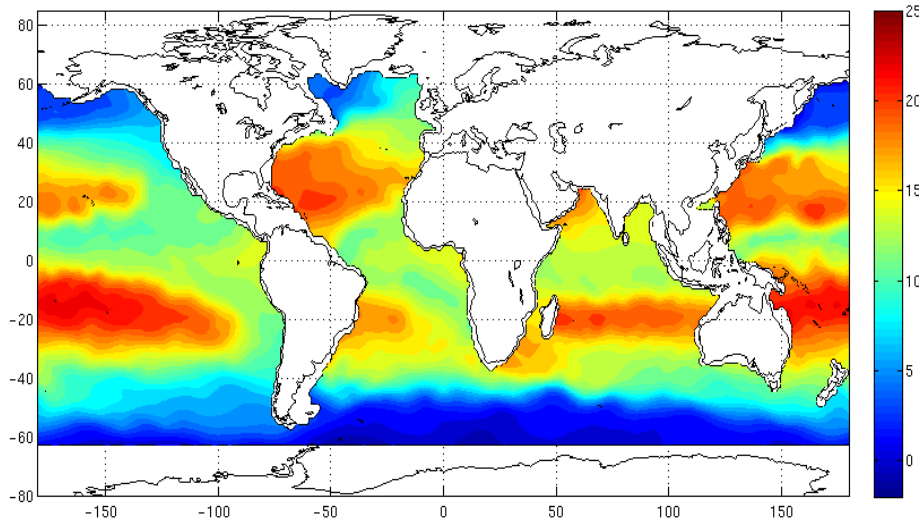
January 2010 mean 3x3 Temperature 0200 m. – 8775 profiles in 2226 squares



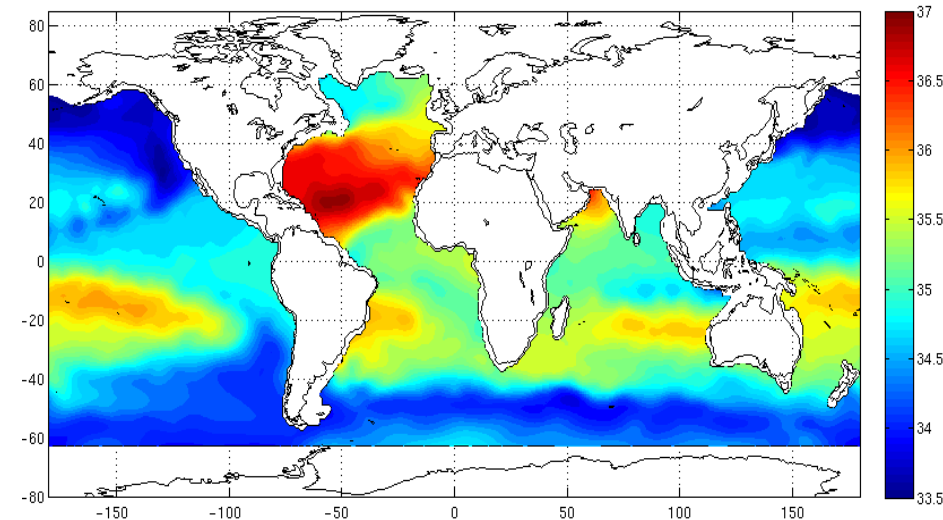
January 2010 mean 3x3 Salinity 0200 m. – 8775 profiles in 2226 squares



T at 0200m in 2010 Jan



S at 0200m in 2010 Jan





# Модель общей циркуляции океана

Версия модели ИВМ (Ю.Л. Демин и Р.А. Ибраев)

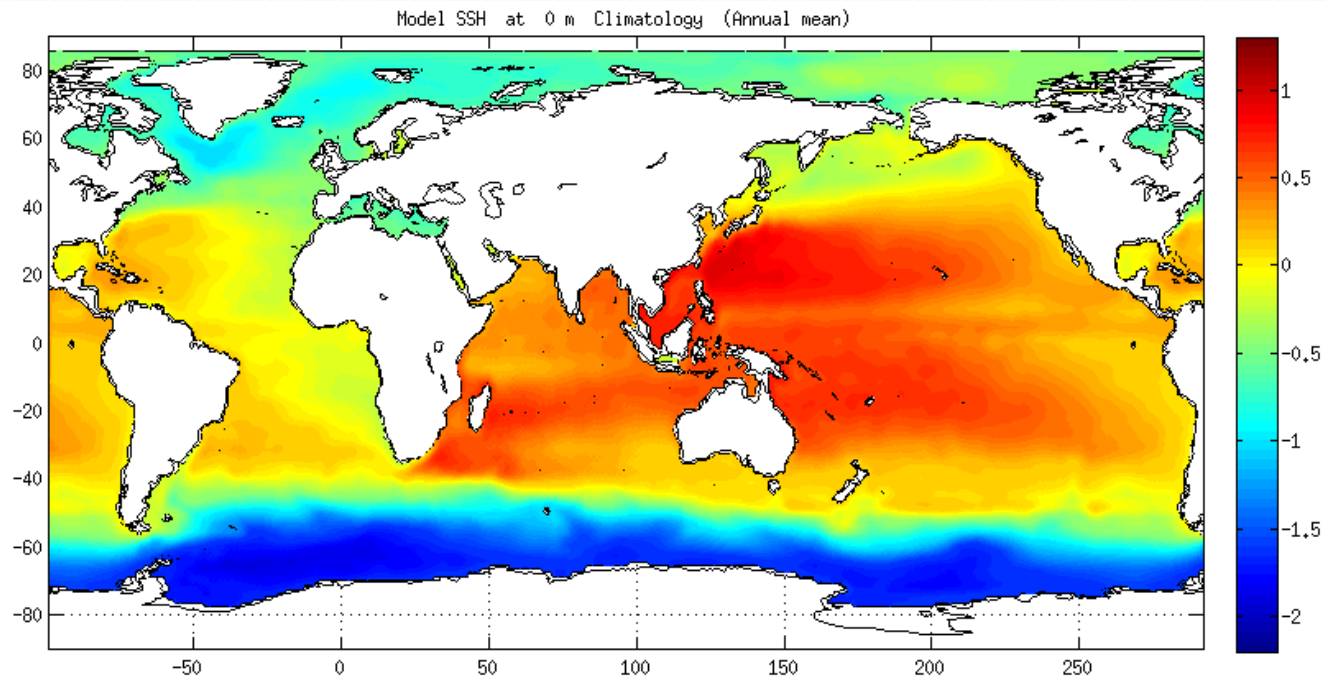
Пространственное разрешение  $1^\circ$  по долготе и широте

Северная граница области расчетов  $85,5^\circ$  с.ш.

32 горизонта по вертикали, максимальная глубина океана 5750 м

Корректировка рельефа дна в ряде ключевых районов Мирового океана (Флоридский пролив, западная граница Гольфстрима, пролив Нэрса, Берингов пролив, Индонезийские проливы и других)

Ветер ECMWF ERA-Interim

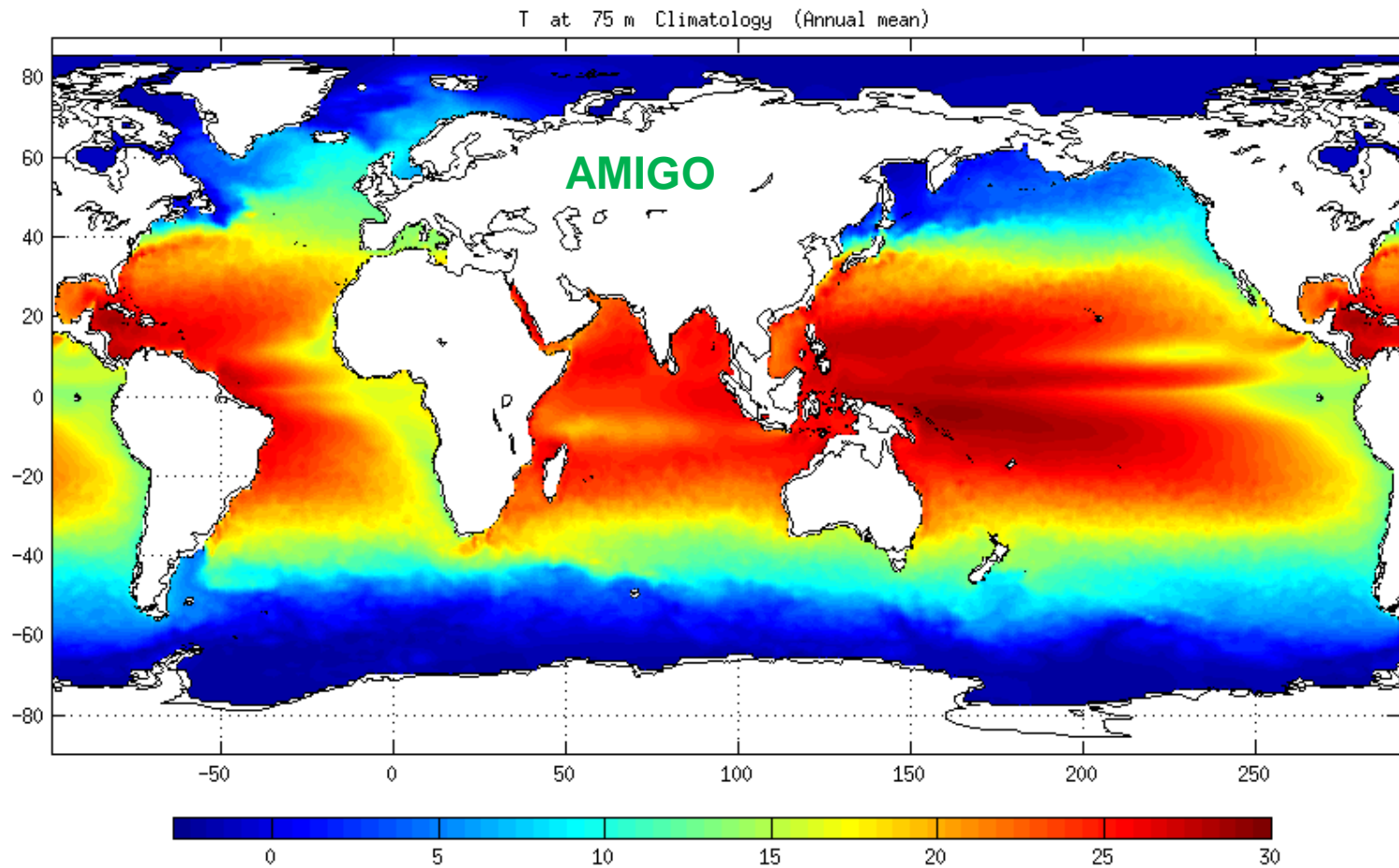


Модель общей циркуляции океана применяется в режиме диагноза и адаптации заданных в начальный момент гидрологических полей. Метод гидродинамической адаптации был впервые предложен в 1983 году в работе А.С. Саркисяна и Ю.Л. Демина для расчета сбалансированных между собой и с рельефом дна и граничными условиями полей температуры, солёности плотности и течений.

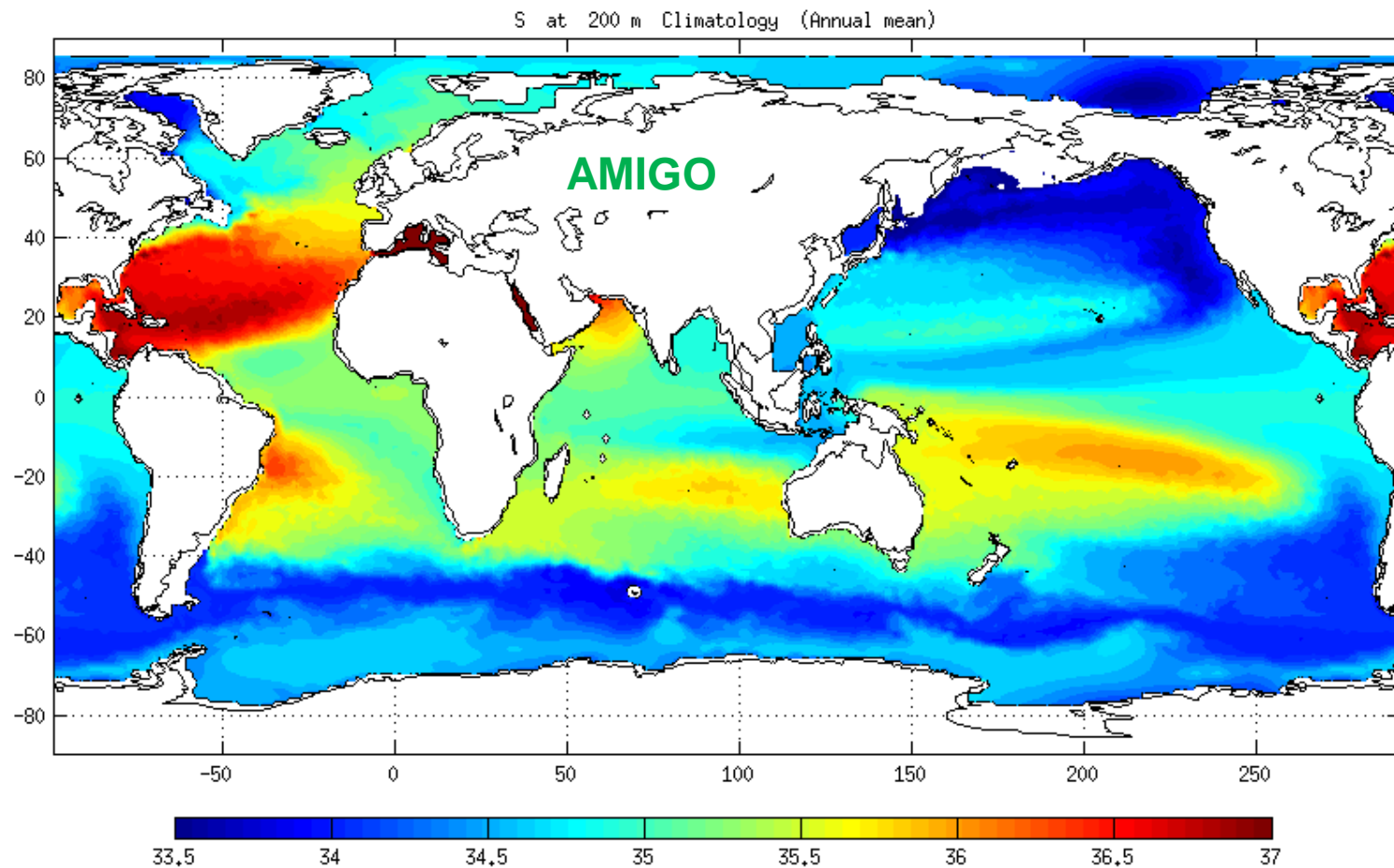
Критерием окончания адаптации является выход энергии системы на квазистационарное состояние. В качестве дополнительного критерия может использоваться сравнение модельного поля динамического уровня с измерениями (данные спутниковой альтиметрии Aviso).

Выполненные расчеты охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представлены ежемесячными (120 полей), сезонными (40 полей), годовыми (10 полей), а также среднеклиматическими для 2005–2014 гг. данными (17 полей, включающие среднеклиматический год, сезоны и месяцы) с пространственным разрешением 1 градус по долготе и широте.

## Среднеклиматическая ТЕМПЕРАТУРА на глубине 75 м

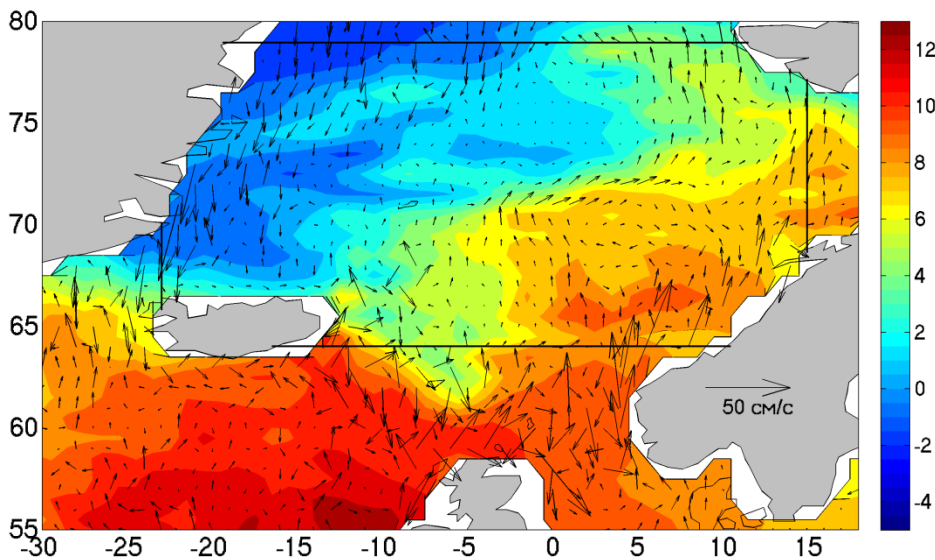


## Среднеклиматическая СОЛЕНОСТЬ на глубине 200 м

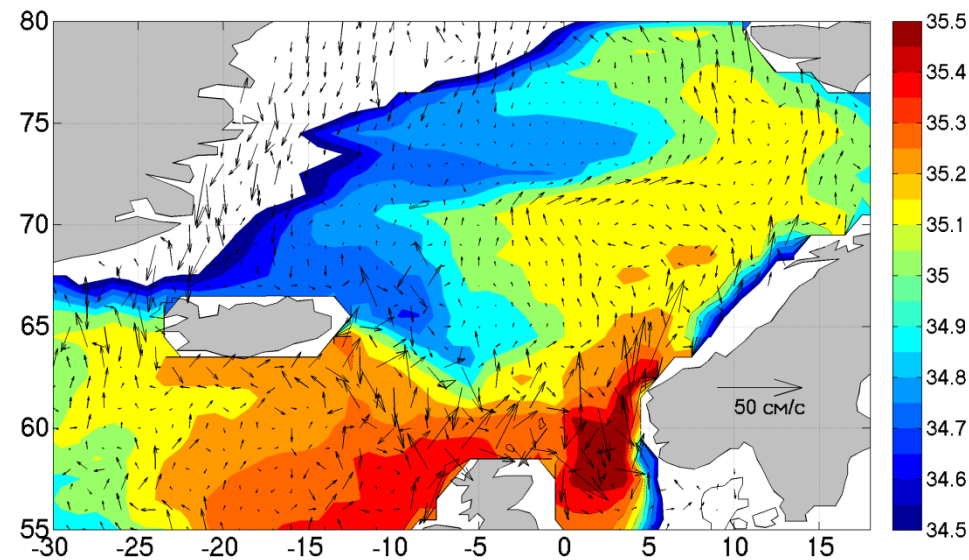


Среднегодовое распределение температуры на глубине 20 м (а) и солености на глубине 50 м (б) по измерениям Арго за период с 2005 по 2014 гг. на фоне поля течений в области Полярных морей (Норвежского и Гренландского).

(а) **Температура** на глубине 20 м



(б) **Соленость** на глубине 50 м

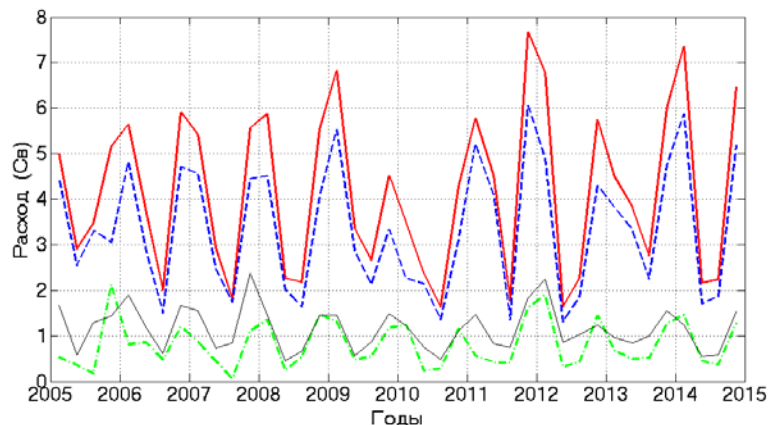


Толстыми черными линиями (а) показано положение разрезов: «Фрам» между Гренландией и Шпицбергенем по 79° с.ш., «Баренц» между Норвегией и Шпицбергенем по 15° в.д., «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64° с.ш., в «Датский» в Датском проливе между Исландией и Гренландией по 23° з.д.

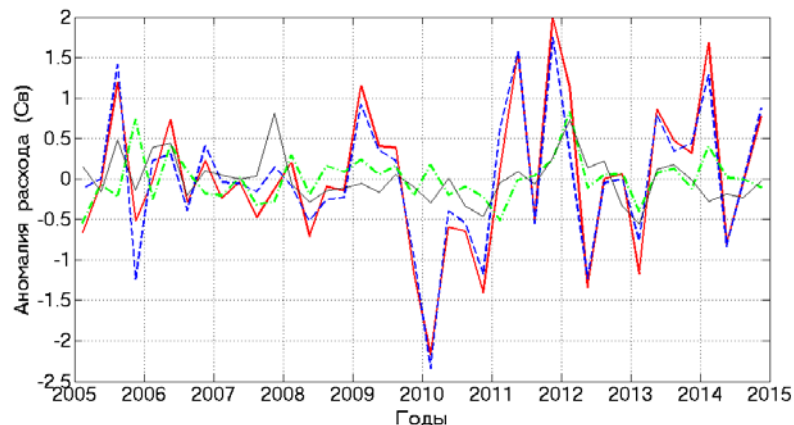
Межгодовая изменчивость переносов через границы исследуемой области Полярных морей проиллюстрирована на рисунке (а)

Для более детального анализа изменчивости расходов из них был удален средний за период 2005–2014 гг. сезонный ход. Полученные в результате аномалии расходов представлены на рисунке (б)

(а)



(б)



Изменчивость значений расхода (а) и аномалий расхода (Св) относительно среднего сезонного хода (б) **на разрезе «Исланд» между Исландией и Норвегией по 64° с.ш. (толстая красная линия)**, **в Датском проливе по 23° з.д. в западном направлении (синяя штриховая линия)**, на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергенom по 15° в.д. (черная тонкая линия), **а также разность между притоком через разрез «Исланд» и оттоком через разрез «Датский» (зеленый штрих-пунктир)**. Данные представлены среднесезонными величинами и охватывают период 2005–2014 гг. по данным АМИГО.

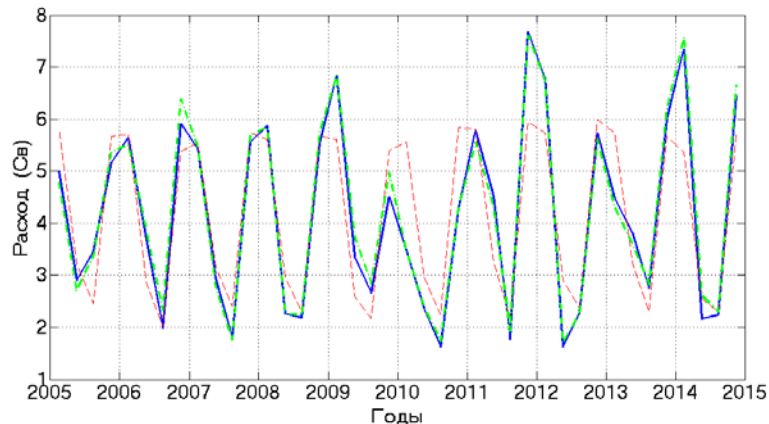
Для изучения вклада ветрового воздействия в изменчивость расхода были выполнены две серии дополнительных численных экспериментов.

В **Эксперименте 1** используемые в расчетах АМИГО поля температуры и солёности были заменены их среднемноголетними аналогами (расчет для января 2005 г. проводился по среднемноголетним для 2005–2014 гг. данным АМИГО для января и т.д.). Поля ветра при этом соответствовали реальным месяцам и сезонам (расчет для января 2005 г. проводился по данным тангенциального напряжения трения ветра за январь 2005 г. и т.д.). Это позволило оценить вклад в изменчивость расхода ветрового воздействия.

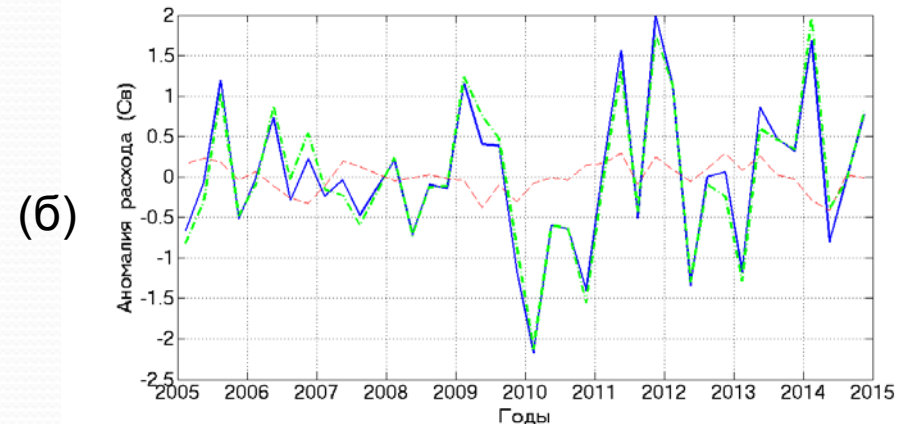
В **Эксперименте 2** используемые в расчетах АМИГО поля тангенциального напряжения трения ветра были заменены их осредненными за 2005–2014 гг. аналогами (для января 2005 г. использовались данные температуры и солёности января 2005 г. и осредненный за январь 2005–2014 гг. ветер и т.д.). Целью этих расчетов была оценка вклада изменчивости термohалинных полей в изменчивость расхода.

# Разрез «Исланд»

Межгодовая изменчивость переносов через границы исследуемой области Полярных морей проиллюстрирована на рисунке (а)



Для более детального анализа изменчивости расходов из них был удален средний за период 2005–2014 гг. сезонный ход. Полученные в результате аномалии расходов представлены на рисунке (б)



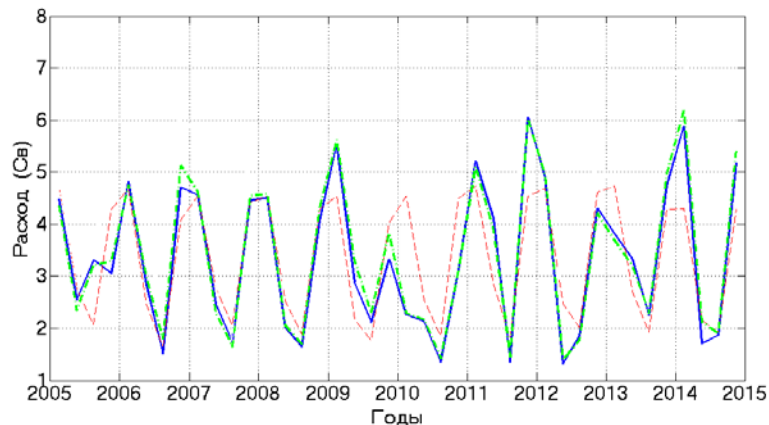
Изменчивость значений расхода (а) и аномалий расхода (Св) относительно среднего сезонного хода (б) на разрезе «Исланд» между Исландией и Норвегией по  $64^\circ$  с.ш.

Результаты расчетов АМИГО представлены синей сплошной линией,  
результаты Эксперимента 1 представлены зеленой штрих-пунктирной линией,  
результаты Эксперимента 2 изображены красной штриховой линией.

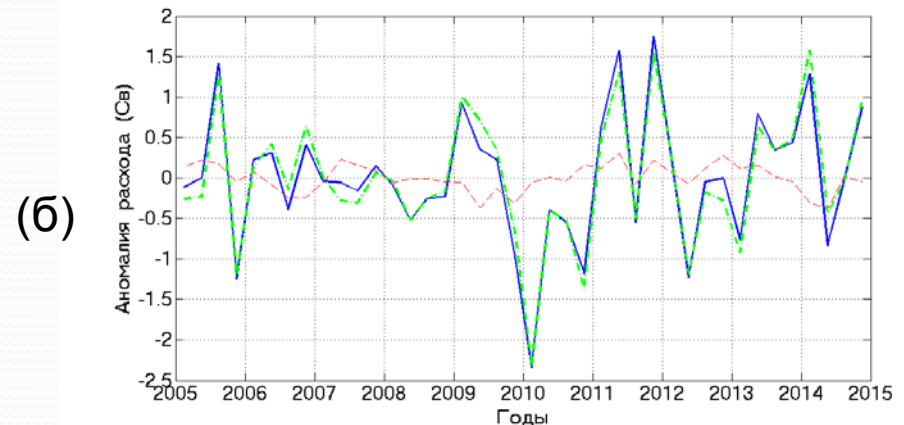


# Разрез «Датский»

Межгодовая изменчивость переносов через границы исследуемой области Полярных морей проиллюстрирована на рисунке (а)



Для более детального анализа изменчивости расходов из них был удален средний за период 2005–2014 гг. сезонный ход. Полученные в результате аномалии расходов представлены на рисунке (б)



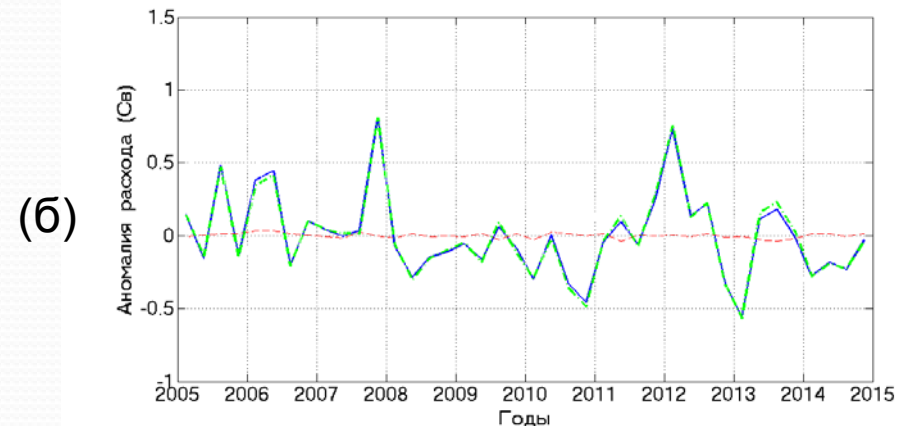
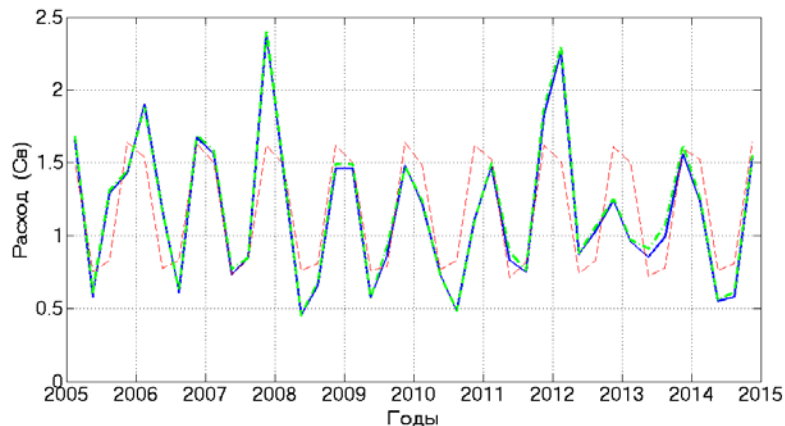
Изменчивость значений расхода (а) и аномалий расхода (Cv) относительно среднего сезонного хода (б) в Датском проливе по  $23^\circ$  з.д. **в западном направлении.**

Результаты расчетов АМИГО представлены синей сплошной линией, результаты Эксперимента 1 представлены зеленой штрих-пунктирной линией, результаты Эксперимента 2 изображены красной штриховой линией.

# Разрез «Баренц»

Межгодовая изменчивость переносов через границы исследуемой области Полярных морей проиллюстрирована на рисунке (а)

Для более детального анализа изменчивости расходов из них был удален средний за период 2005–2014 гг. сезонный ход. Полученные в результате аномалии расходов представлены на рисунке (б)



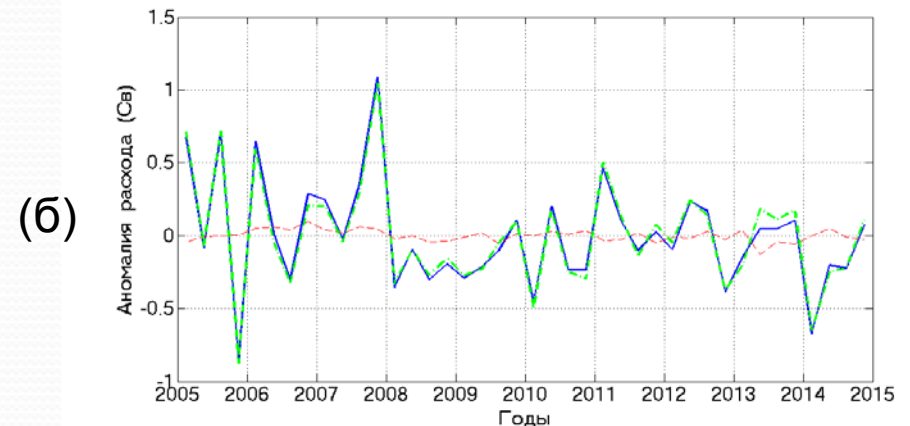
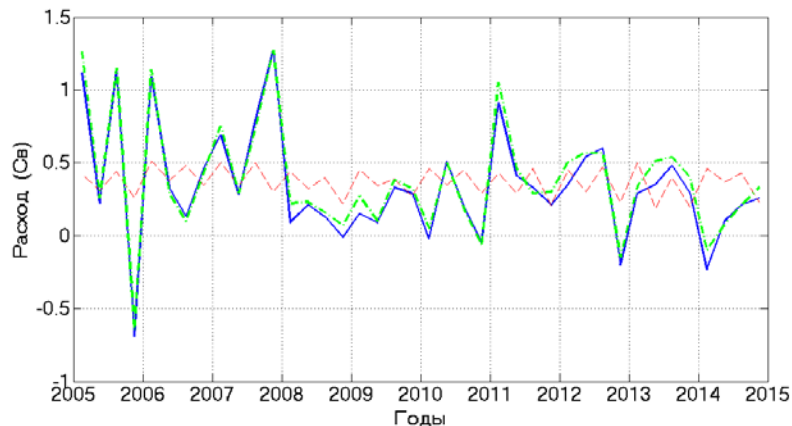
Изменчивость значений расхода (а) и аномалий расхода (Св) относительно среднего сезонного хода (б) на разрезе «Баренц» между Норвегией и Шпицбергенем по  $15^\circ$  в.д.

Результаты расчетов АМИГО представлены синей сплошной линией,  
результаты Эксперимента 1 представлены зеленой штрих-пунктирной линией,  
результаты Эксперимента 2 изображены красной штриховой линией.

# Разрез «Фрам»

Межгодовая изменчивость переносов через границы исследуемой области Полярных морей проиллюстрирована на рисунке (а)

Для более детального анализа изменчивости расходов из них был удален средний за период 2005–2014 гг. сезонный ход. Полученные в результате аномалии расходов представлены на рисунке (б)



Изменчивость значений расхода (а) и аномалий расхода (Св) относительно среднего сезонного хода (б) в проливе Фрама по  $79^{\circ}$  с.ш. **в южном направлении.**

Результаты расчетов АМИГО представлены синей сплошной линией, результаты Эксперимента 1 представлены зеленой штрих-пунктирной линией, результаты Эксперимента 2 изображены красной штриховой линией.

Представленные результаты численных экспериментов наглядно демонстрируют, что межгодовая изменчивость водообмена Полярных морей с окружающими океанами главным образом формируется под влиянием изменчивости полей тангенциального напряжения трения ветра и при этом слабо зависит от межгодовой изменчивости термохалинных полей. Похожий вывод (но для синоптических масштабов времени) был сделан ранее в работе (Иванов, Лебедев, 1996), в которой анализировалась изменчивость полей течений северной части Атлантического океана в модельных расчетах с использованием реальных ежесуточных полей ветра. Полученные выводы находятся в хорошем соответствии с выводами ряда работ о наличии четко выраженной связи изменчивости расходов течений в исследуемом регионе с изменчивостью атмосферного индекса Североатлантического колебания (Филюшкин и др., 2013; Лебедев, 2016; Raj et al., 2018; Лебедев, Филюшкин, Кожелупова, 2019).

# Основные выводы:

1. Модельные расчеты АМИГО с использованием данных Argo за 2005–2014 гг. позволили оценить межгодовую изменчивость расходов на разрезах, ограничивающих область Полярных морей. Изменчивость расходов имеет четко выраженный сезонный характер, с максимальными значениями осенью–зимой и минимумами весной–летом. Изменчивость расхода через пролив Фрама содержит полугодовую составляющую, при том, что среднее поступление воды через пролив Фрама оказалось близким к нулю, составив всего лишь  $0,3 \pm 0,6$  Св. Средний расход через разрез от Исландии до Норвегии по  $64^\circ$  с.ш. получился равным  $4,2 \pm 2,1$  Св, при этом диапазон межгодовых колебаний зимних расходов составил  $4,5–7,7$  Св, а летних –  $1,6–2,9$  Св. Вынос воды через Датский пролив оказался равным  $3,4 \pm 1,7$  Св с диапазоном межгодовых колебаний зимних расходов  $3,3–6,0$  Св, а летних –  $1,3–2,5$  Св. Средний перенос в Баренцево море между Норвегией и Шпицбергенем составил  $1,1 \pm 0,7$  Св при относительно небольшом диапазоне межгодовых колебаний:  $1,2–2,4$  Св зимой и  $0,5–0,9$  Св летом.

2. Численный эксперимент с заменой в расчетах АМИГО реальных сезонных полей тангенциального напряжения трения ветра на их осредненные за 2005–2014 гг. аналоги показал, что изменчивость расходов через ограничивающие область Полярных морей разрезы начинает в этом случае носить в основном сезонный характер, а межгодовая изменчивость становится слабовыраженной. На основании выполненной серии численных экспериментов с моделью АМИГО получен вывод о том, что межгодовая изменчивость термохалинных полей Полярных морей оказывает слабое влияние на изменчивость расходов через ограничивающие их разрезы.

3. Численный эксперимент с заменой в расчетах АМИГО реальных сезонных полей температуры и солёности на их среднесезонные для периода 2005–2014 гг. аналоги показал, что изменчивость расходов через ограничивающие Полярные моря разрезы получается практически идентичной изменчивости, полученной на основе оригинальных расчетов АМИГО. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что основным фактором, определяющим межгодовую изменчивость водообмена Полярных морей с окружающими океанами, является изменчивость полей тангенциального напряжения трения ветра.