

Исследование переносов массы, тепла и солей в Бенгальском заливе на основе данных Арго и численного моделирования

Лебедев К.В.

**Институт океанологии им.
П.П.Ширшова РАН**

Москва, ИКИ РАН
15-19 ноября 2021

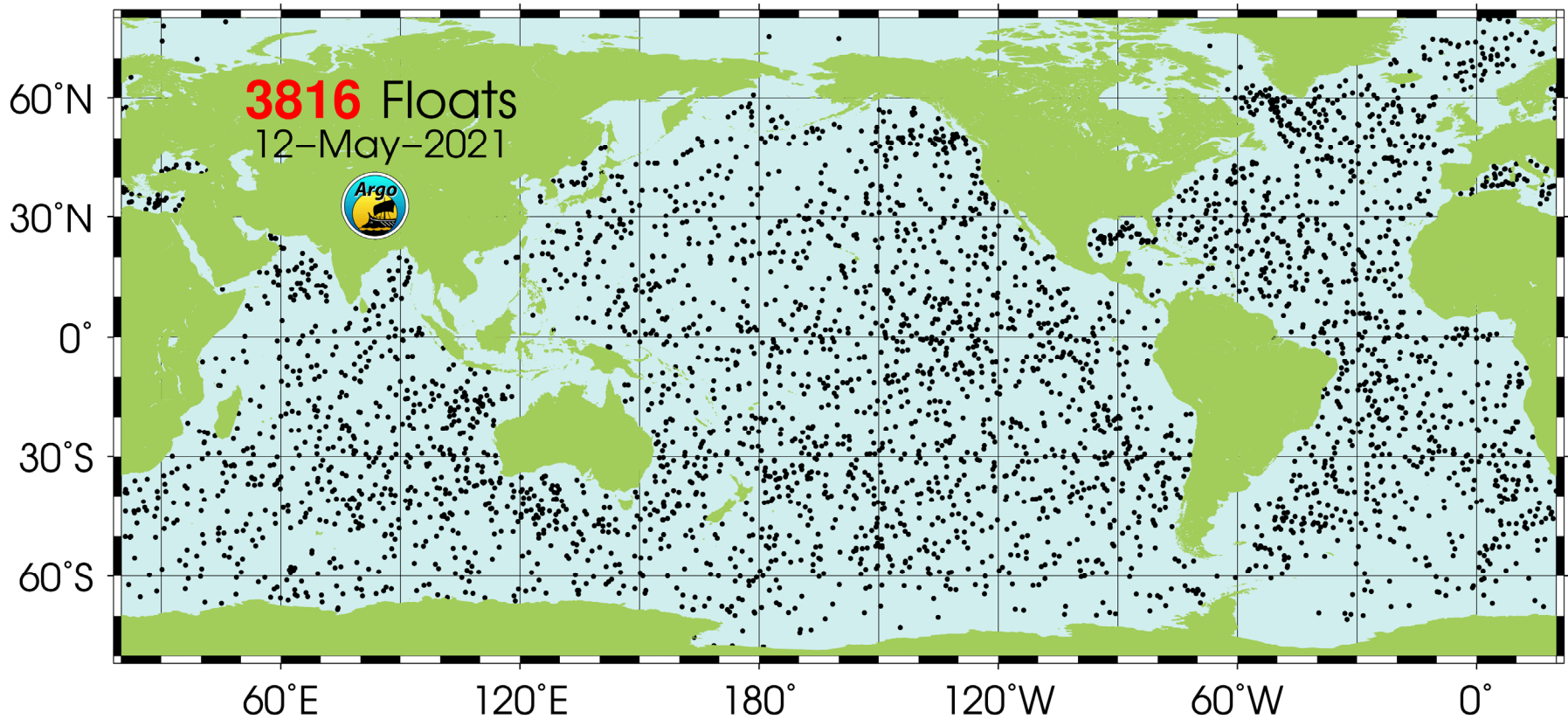
Бенгальский залив, в который впадают такие крупные реки, как Ганг, Брахмапутра, Кришна, Годавари, Кавери, Маханади и Иравади, является самым большим заливом в мире. Муссонный характер господствующих над заливом ветров определяет смену направления поверхностной циркуляции при переходе с летнего на зимний режим. Это приводит не только к высокой сезонной изменчивости водообмена Бенгальского залива с Индийским океаном, но также и к значительной его межгодовой изменчивости.

Целью данной работы является оценка сезонной и межгодовой изменчивости водообмена (переносы масса, тепла и соли) Бенгальского залива с Индийским океаном.

Наступление в конце XX века эры спутниковых наблюдений за поверхностью океана и развитие в первые годы XXI века проекта Арго, направленного на сбор с использованием спутников информации о толще океана, дает уникальные возможности непрерывного мониторинга состояния Мирового океана. На основе данных спутниковых наблюдений оцениваются различные гидрофизические и биологические параметры поверхностного слоя океана (температура, соленость, возмущение уровня поверхности, волнение, цветность, концентрация хлорофилла и т.д.). В частности, возмущение уровня поверхности океана, в значительной степени связанное с динамикой всей толщи океана, измеряется со спутников-альтиметров. Около 4000 поплавков Арго осуществляют на сегодняшний день автономное зондирование верхней двухкилометровой толщи океана от Антарктики до Шпицбергена с 10-дневным временным интервалом. Общее число профилей, накопленных в рамках программы Арго, летом в 2020 году превысило 2 миллиона.

Накопленные массивы измерений Арго в комбинации с данными спутниковой альтиметрии позволяют сегодня успешно решать задачи реконструкции и мониторинга состояния океана в режиме, близком к реальному времени, и исследовать особенности океанской динамики и ее внутри и межгодовой изменчивости.

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

20:50

<http://www.argo.ucsd.edu>



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.

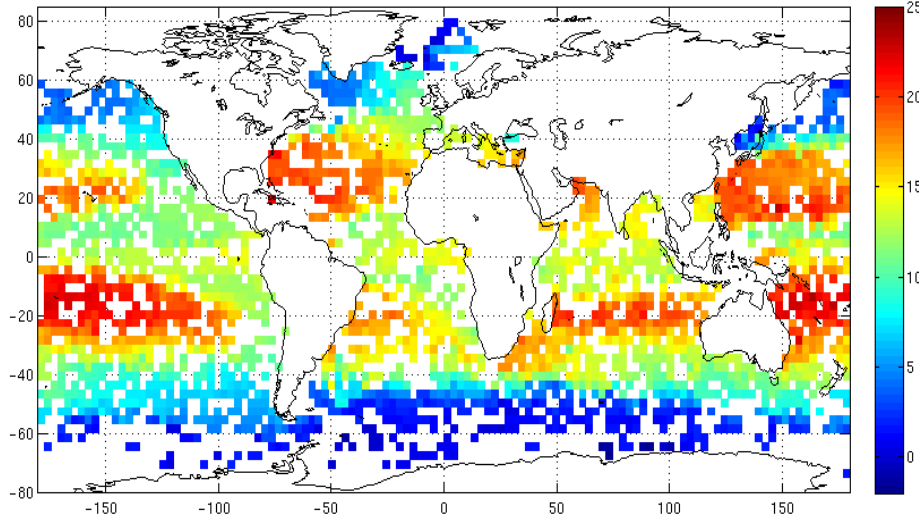
Минимизируемый функционал

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

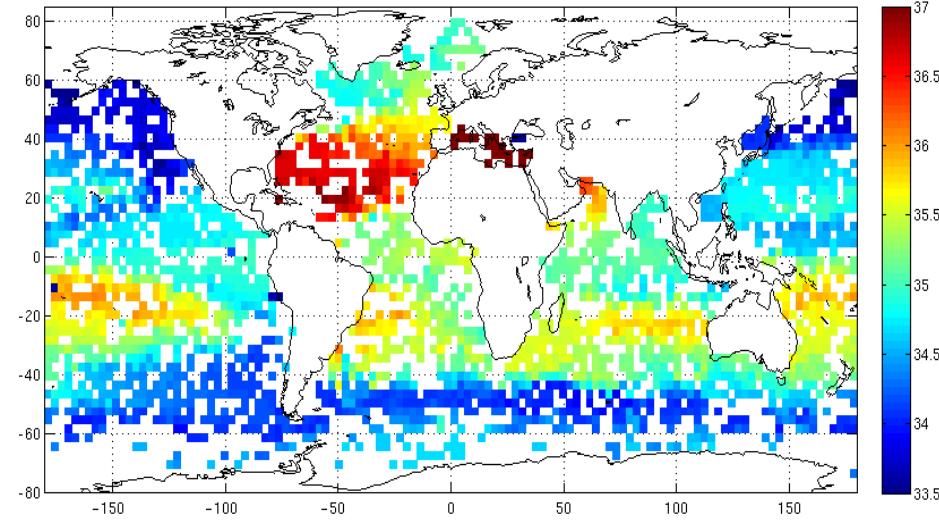
где A_g - интерполируемая переменная Argo (T, S и т.д.) в узлах регулярной сетки, A_{g-d} - линейная интерполяция в точку измерения A_d значений переменной A_g из четырех окрестных узлов регулярной сетки, A_c - климатические данные в узлах регулярной сетки, dX - зональный шаг сетки, L - временной интервал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

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

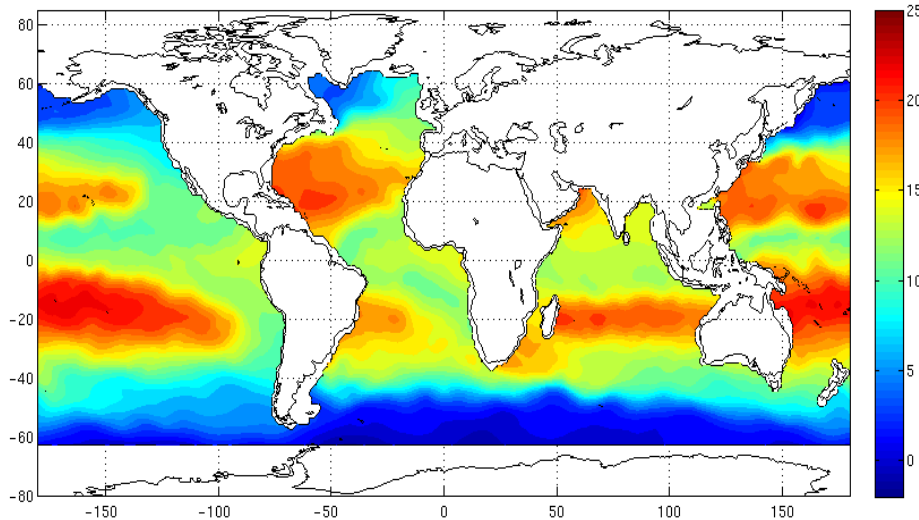
January 2010 mean 3x3 Temperature 0200 m. – 8775 profiles in 2226 squares



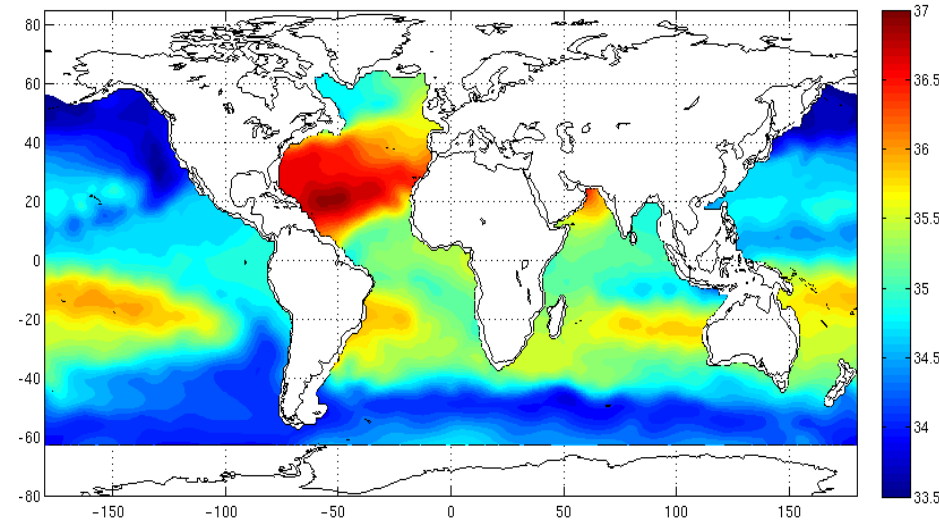
January 2010 mean 3x3 Salinity 0200 m. – 8775 profiles in 2226 squares



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)

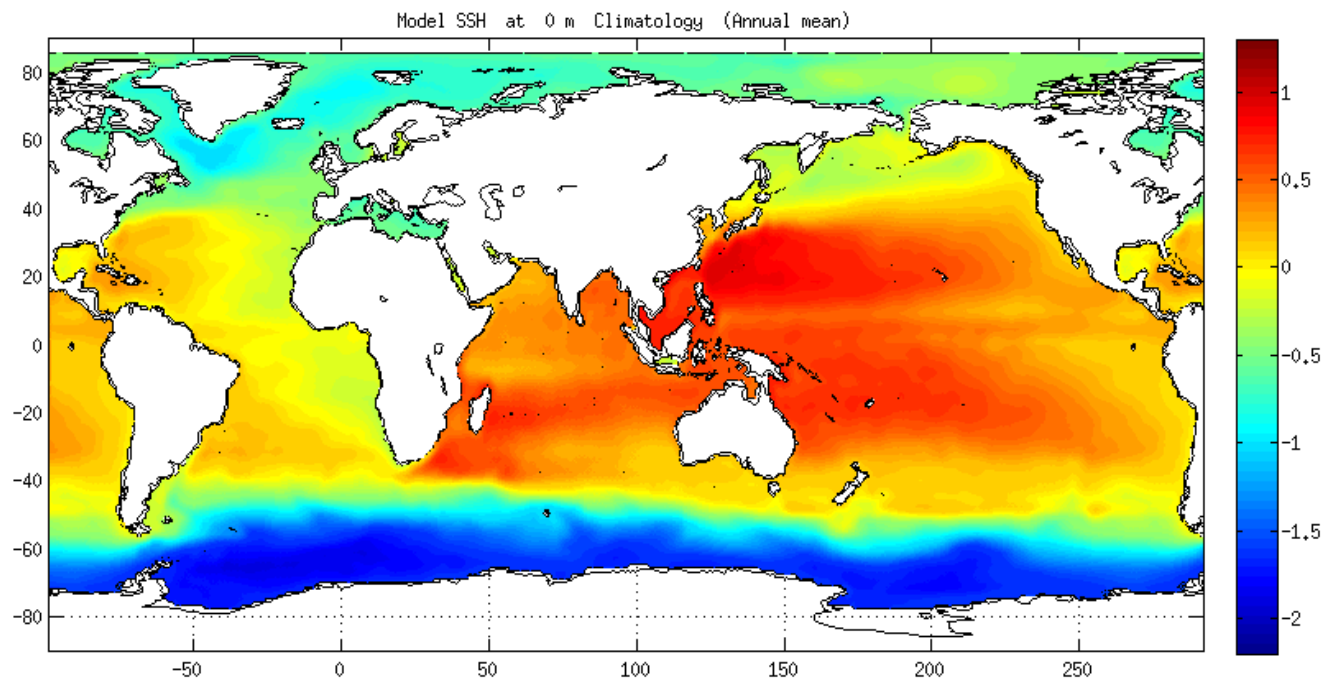
Пространственное разрешение 1° по долготе и широте

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*).

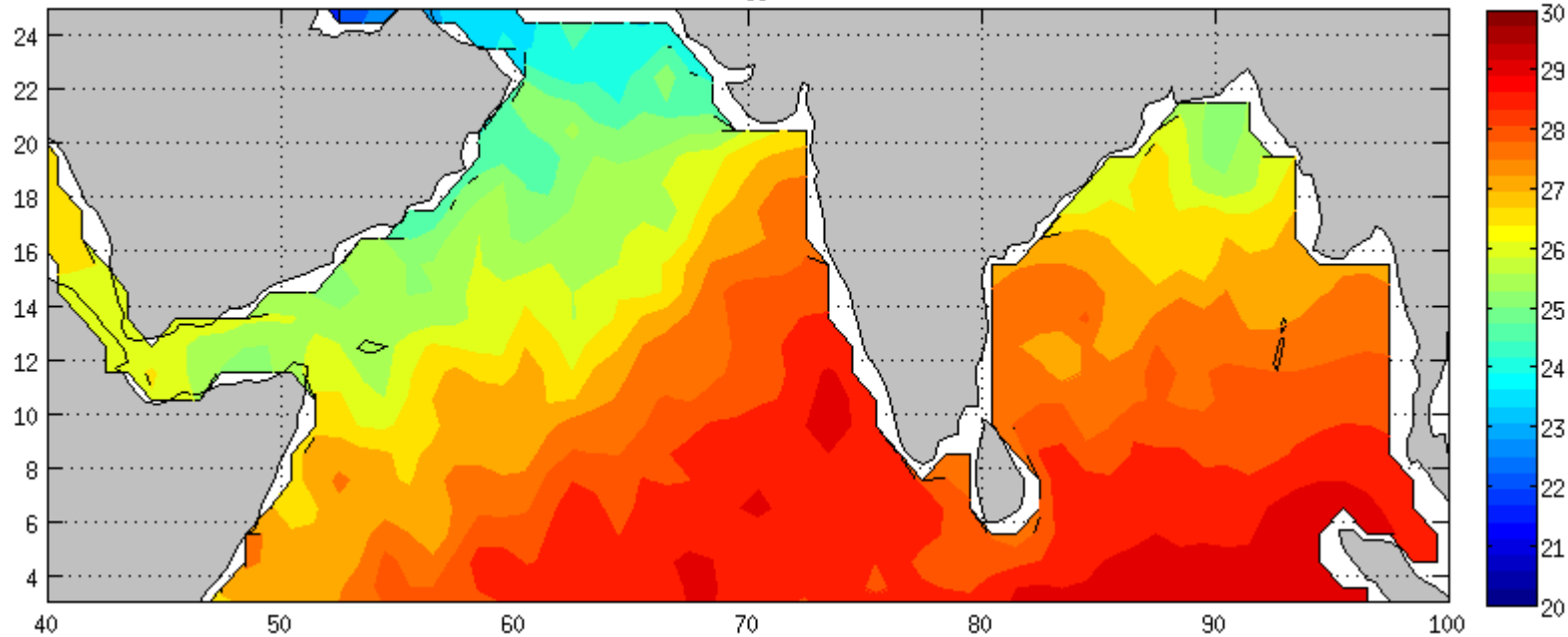
Выполненные расчеты охватывают 10-летний период с 2005 по 2014 гг. и представлены ежемесячными (120 полей), сезонными (40 полей), годовыми (10 полей), а также среднеклиматическими для 2005–2014 гг. данными (17 полей, включающие среднеклиматический год, сезоны и месяцы) с пространственным разрешением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

Карты температуры, солёности и течений северной части Индийского океана

В работе используются вариационно проинтерполированные на одноградусную сетку данные Арго, находящиеся в созданной в Институте океанологии РАН базе АМИГО, а также данные спутниковой альтиметрии AVISO.

На рисунках хорошо виден ярко выраженный муссонный характер циркуляции северной части Индийского океана.

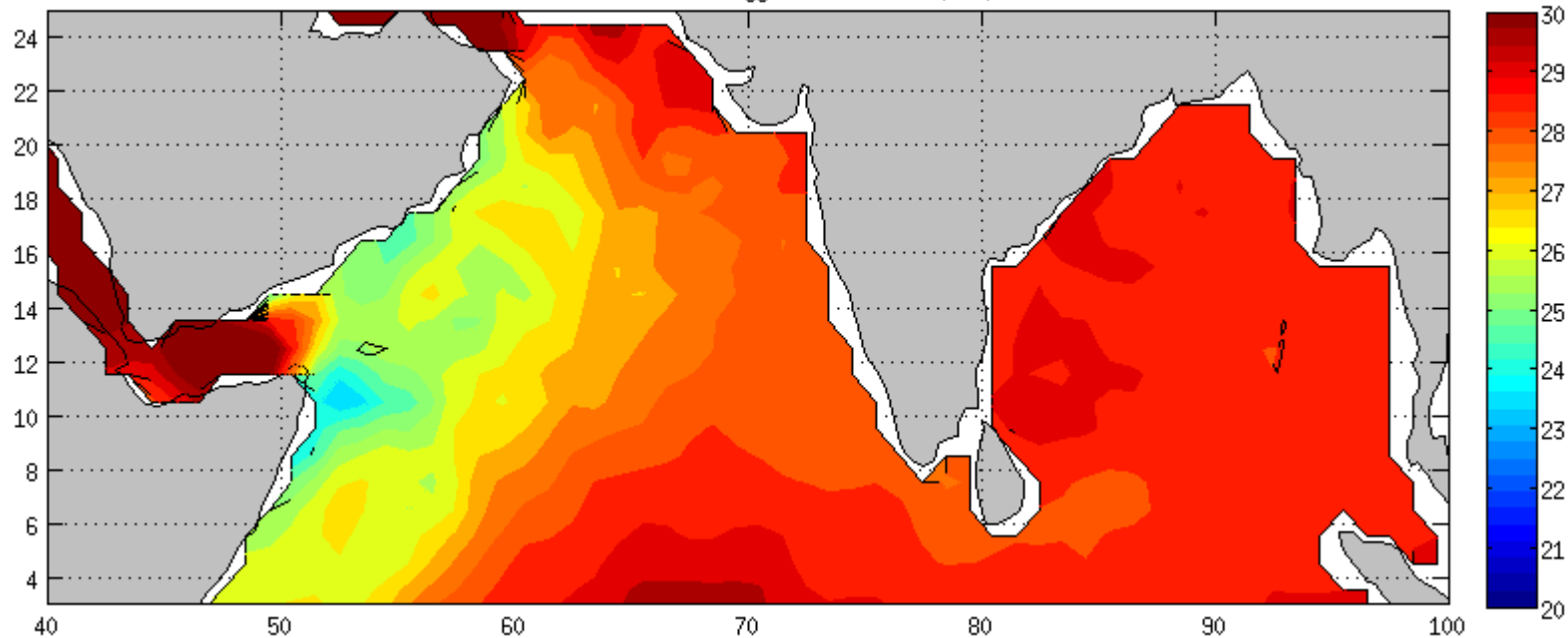
T at 0 m Climatology for Winter (JFM)



Зима

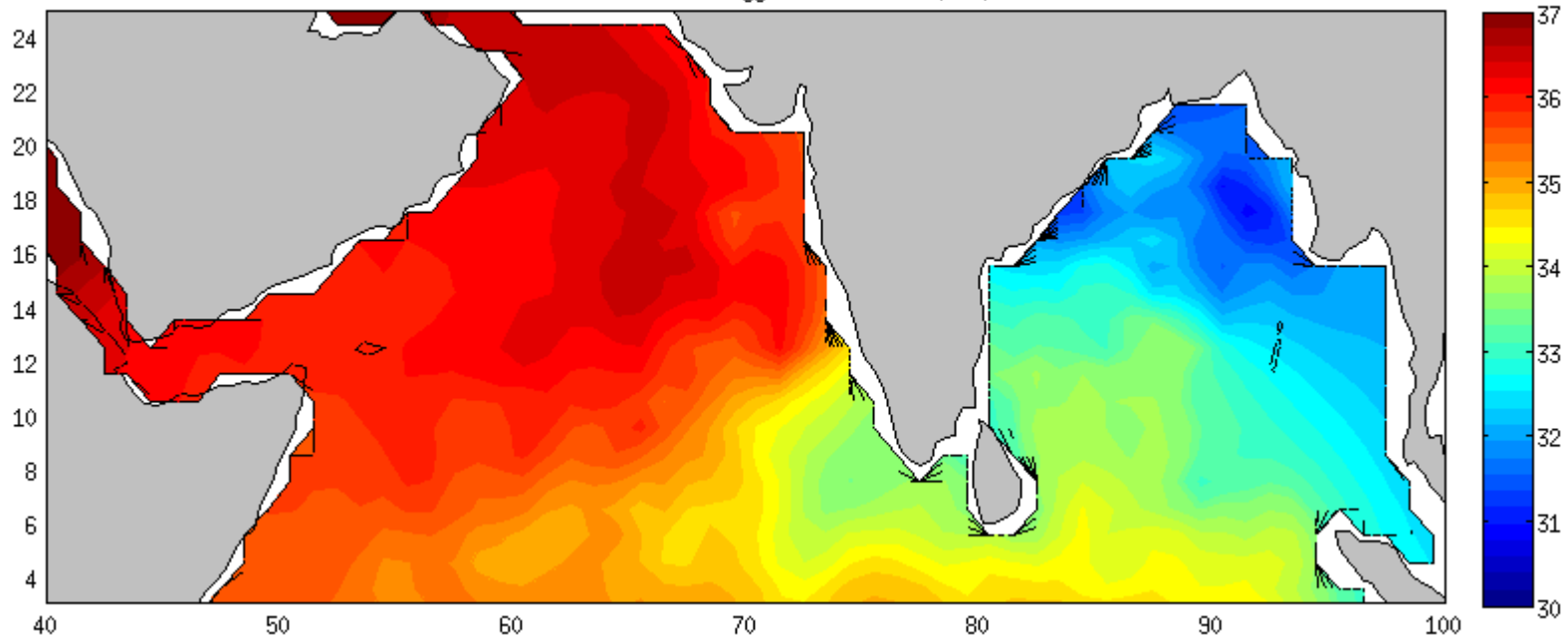
Температура на поверхности Индийского океана по данным Арго

T at 0 m Climatology for Summer (JAS)



Лето

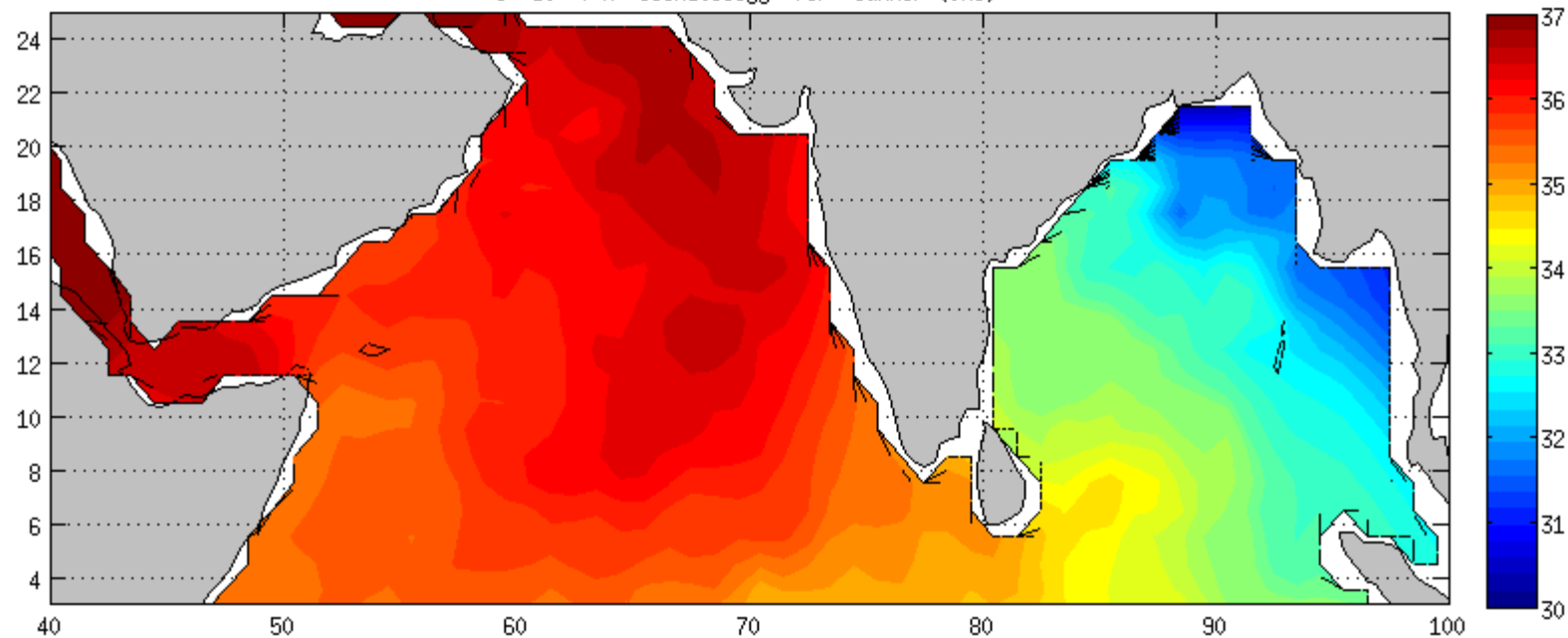
S at 0 m Climatology for Winter (JFM)



Зима

Соленость на поверхности Индийского океана по данным Арго

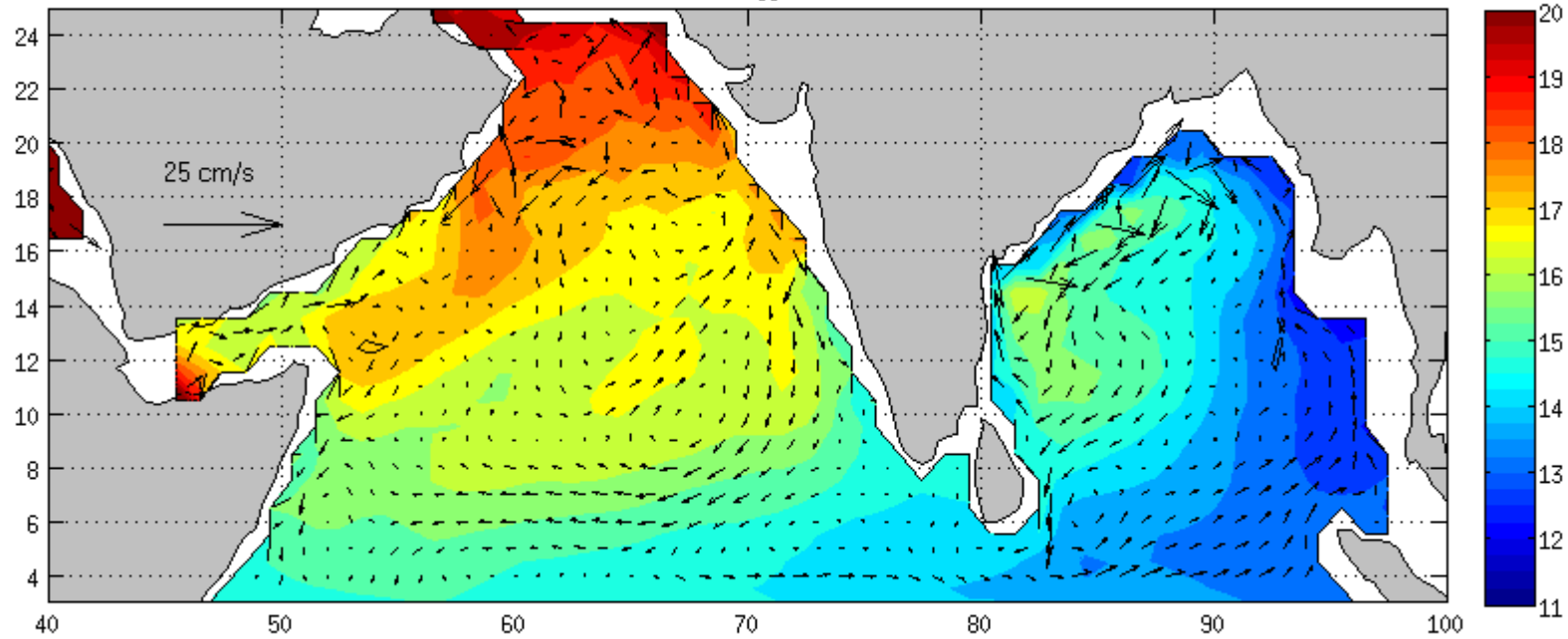
S at 0 m Climatology for Summer (JAS)



Лето

На картах для глубины 200 метров хорошо видно, как в период действия летнего юго-западного муссона резко усиливается Сомалийское течение. В то время как в период действия зимнего северо-восточного муссона расход Сомалийского течения становится крайне слабым. Также хорошо видно, как циркуляция в Бегальском заливе меняет знак на противоположный при смене зимнего сезона на летний. Такие значительные изменения в течениях приводят к сильной изменчивости полей температуры и солёности, что также очень хорошо видно на рисунках для глубины 200 метров.

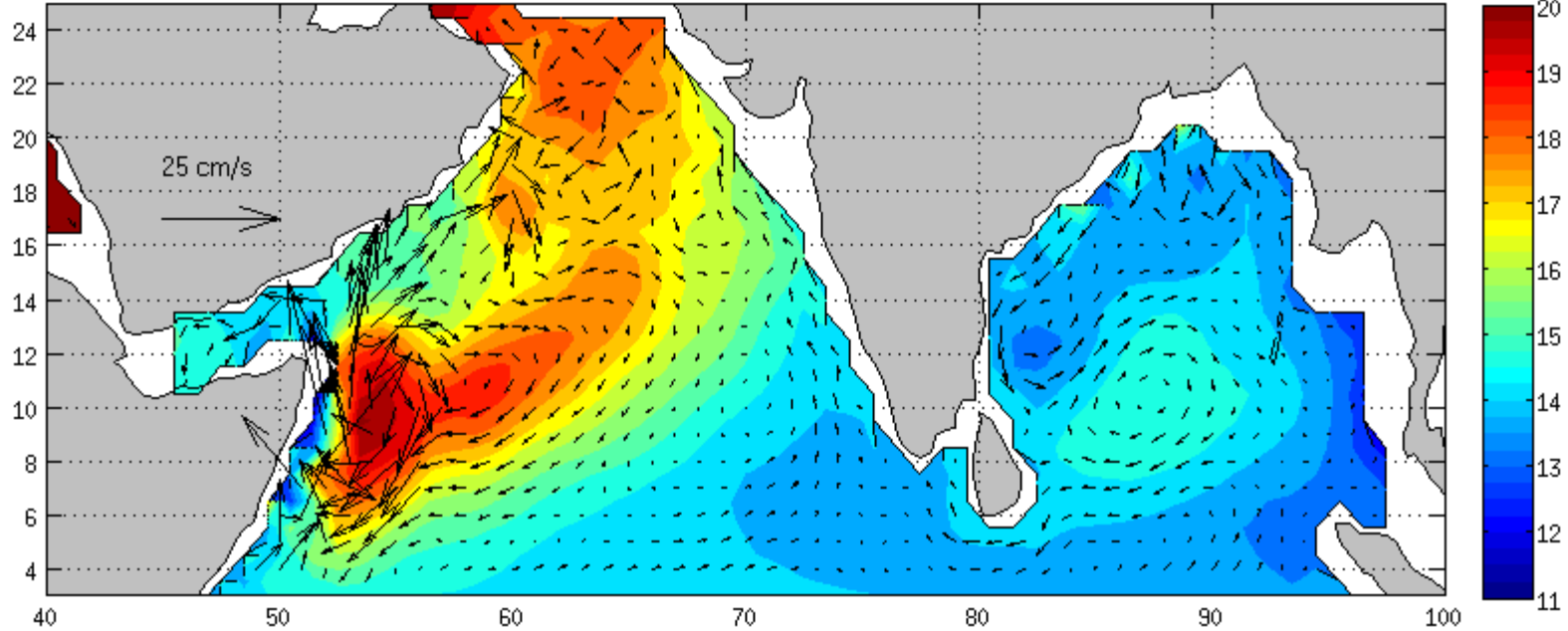
T at 200 m Climatology for Winter (JFM)



Зима

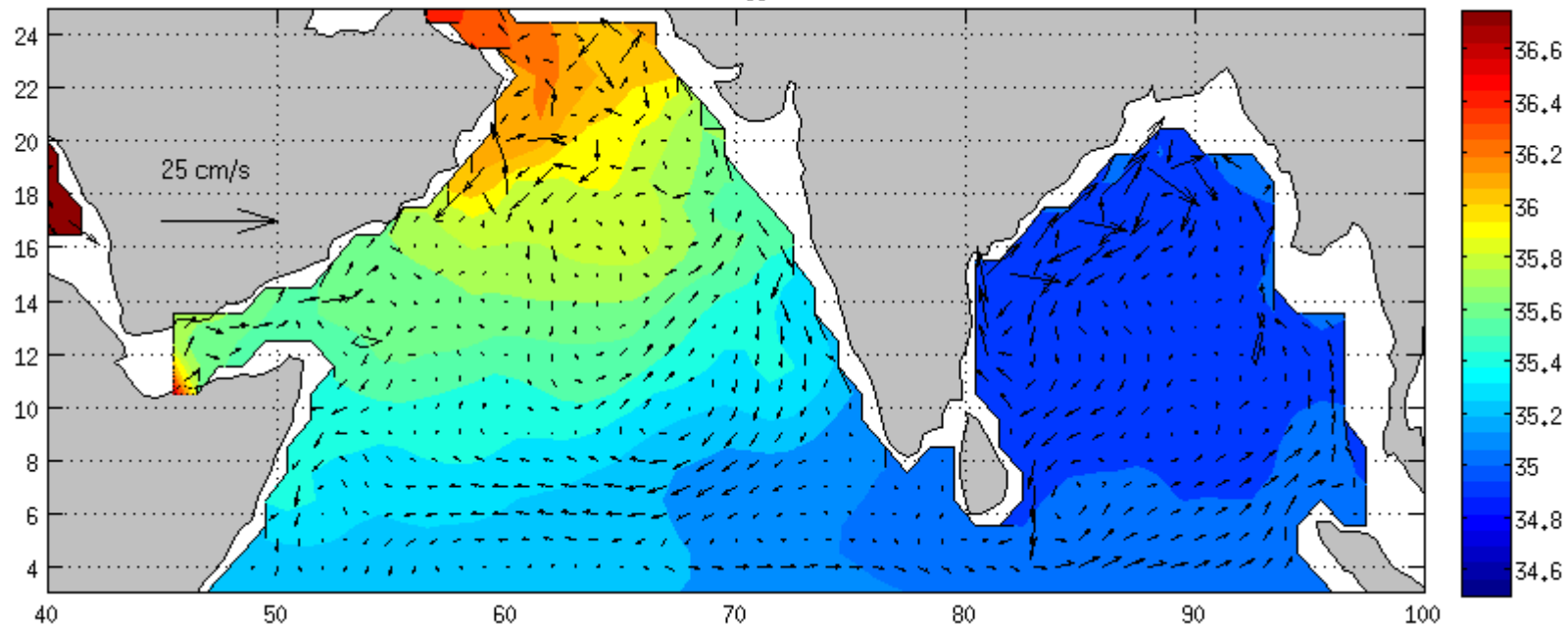
Температура и течения на глубине 200 м по данным Арго и альтиметрии

T at 200 m Climatology for Summer (JAS)



Лето

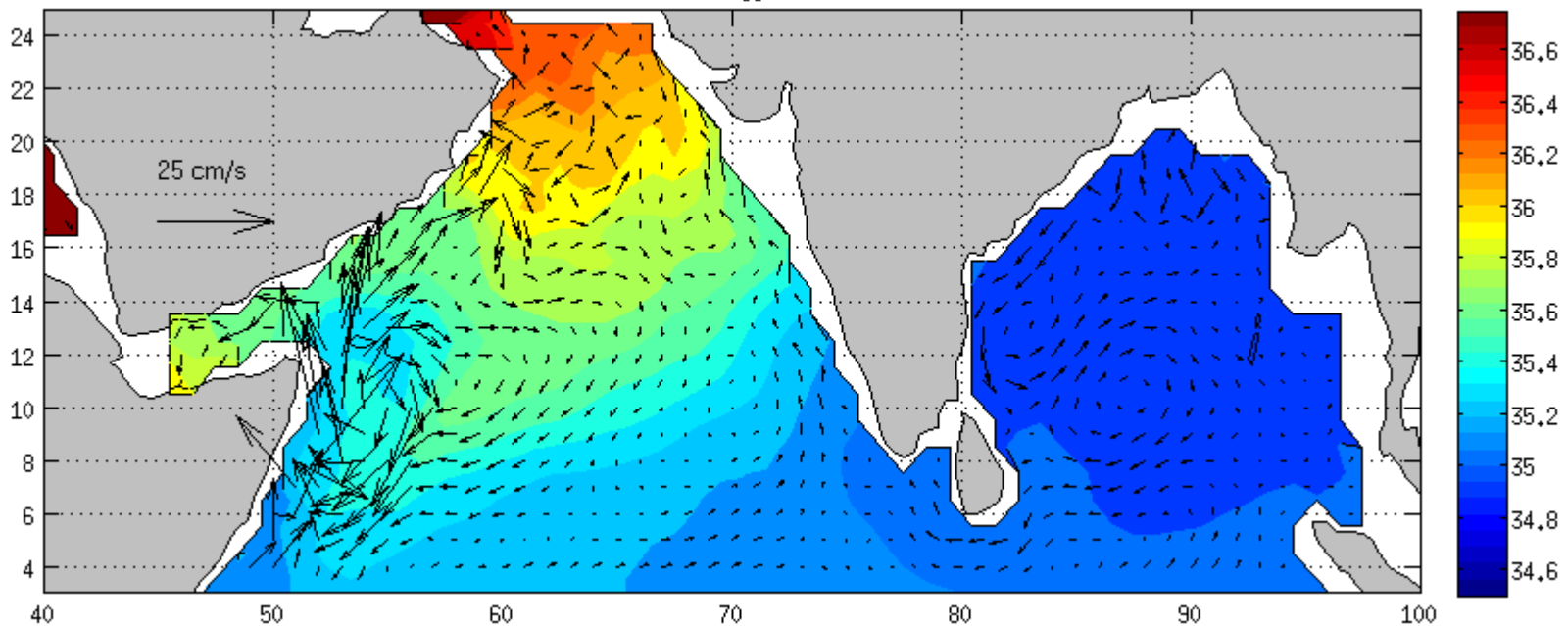
S at 200 m Climatology for Winter (JFM)



Зима

Соленость и течения на глубине 200 м по данным Арго и альтиметрии

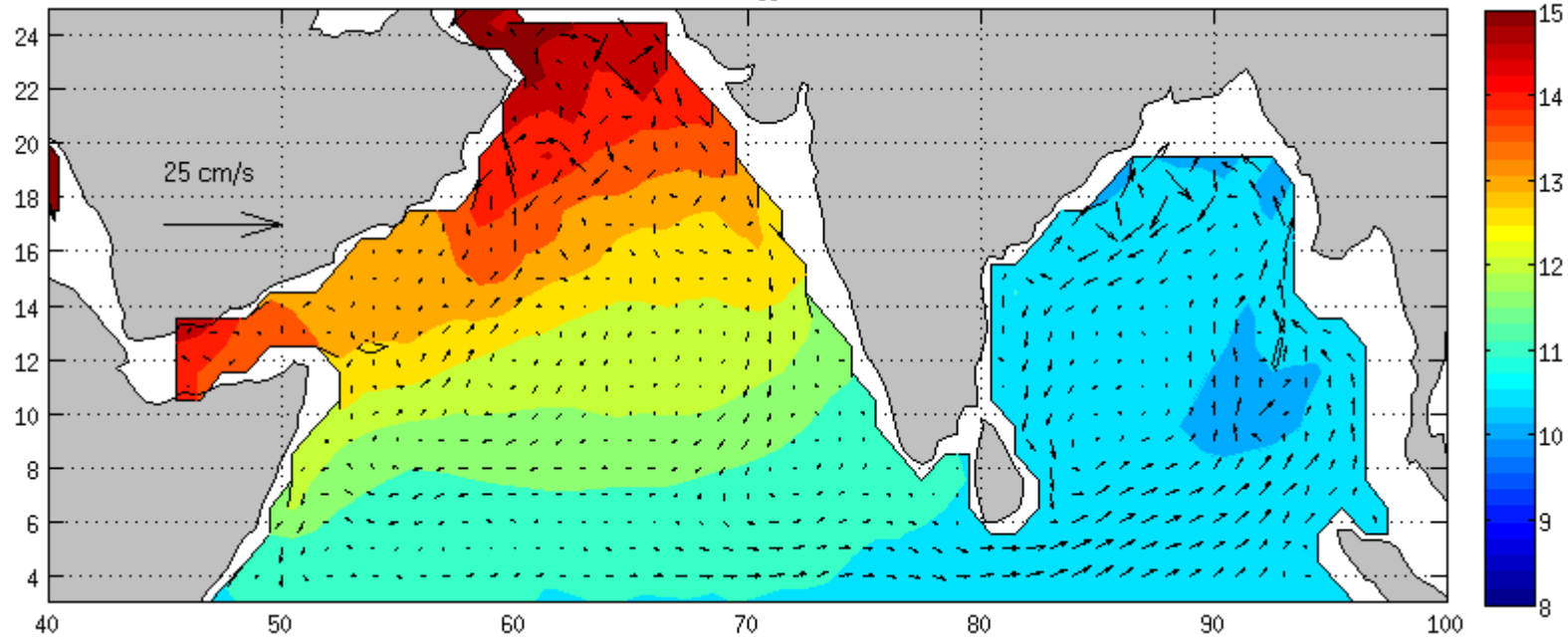
S at 200 m Climatology for Summer (JAS)



Лето

На глубине 400 метров скорости течений заметно ослабевают по сравнению с верхними горизонтами. Межсезонная изменчивость полей температуры и солености на этой глубине уже не носит такого ярко выраженного характера, как на глубине 200 метров.

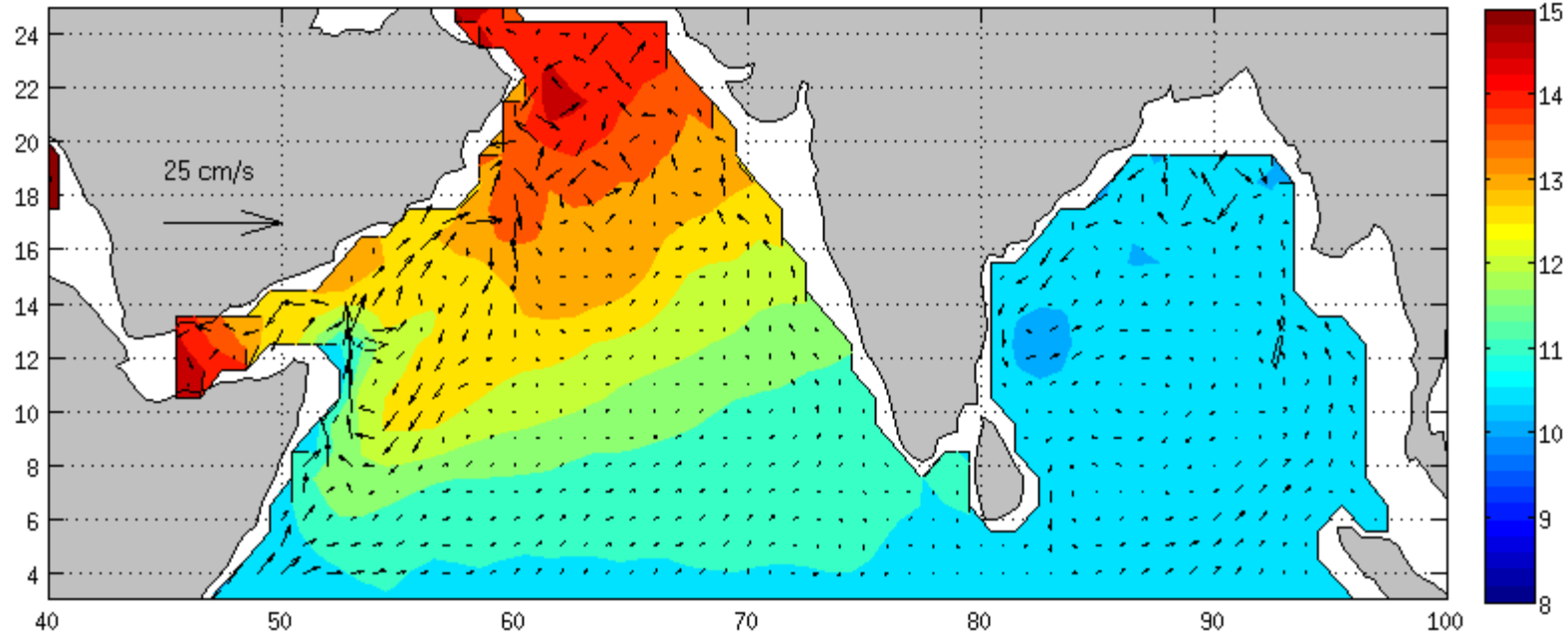
T at 400 m Climatology for Winter (JFM)



Зима

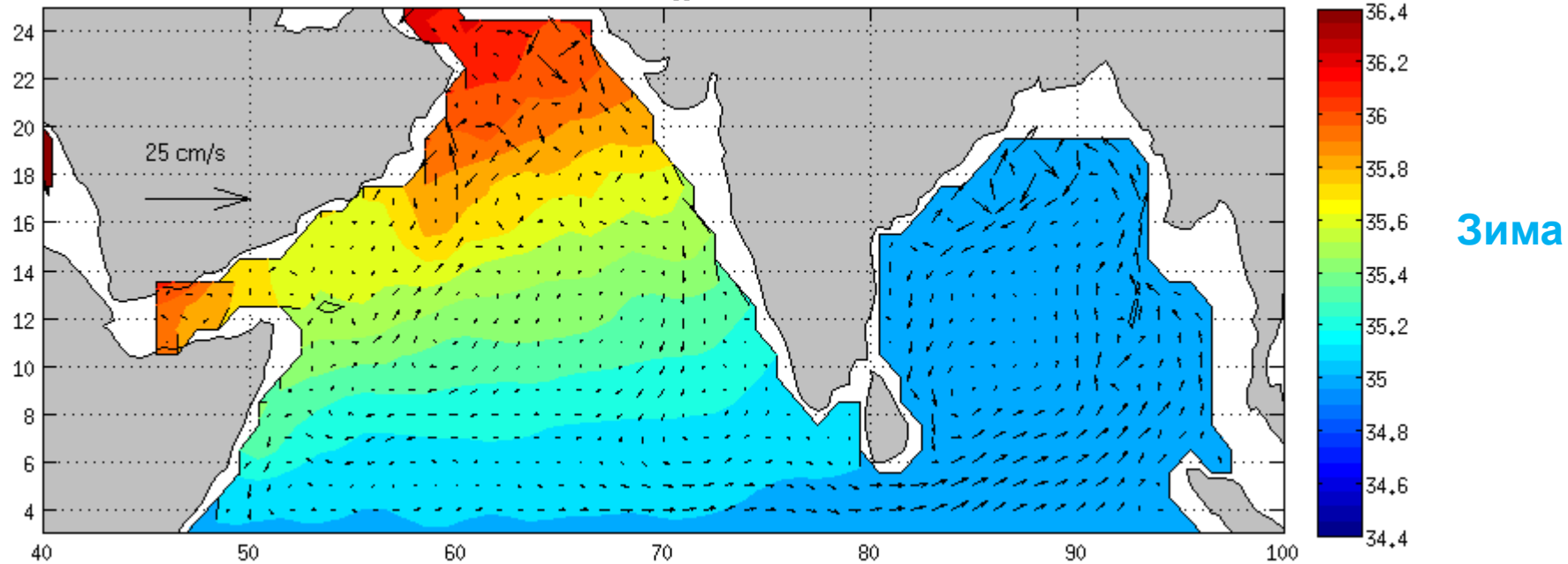
Температура и течения на глубине 400 м по данным Арго и альтиметрии

T at 400 m Climatology for Summer (JAS)



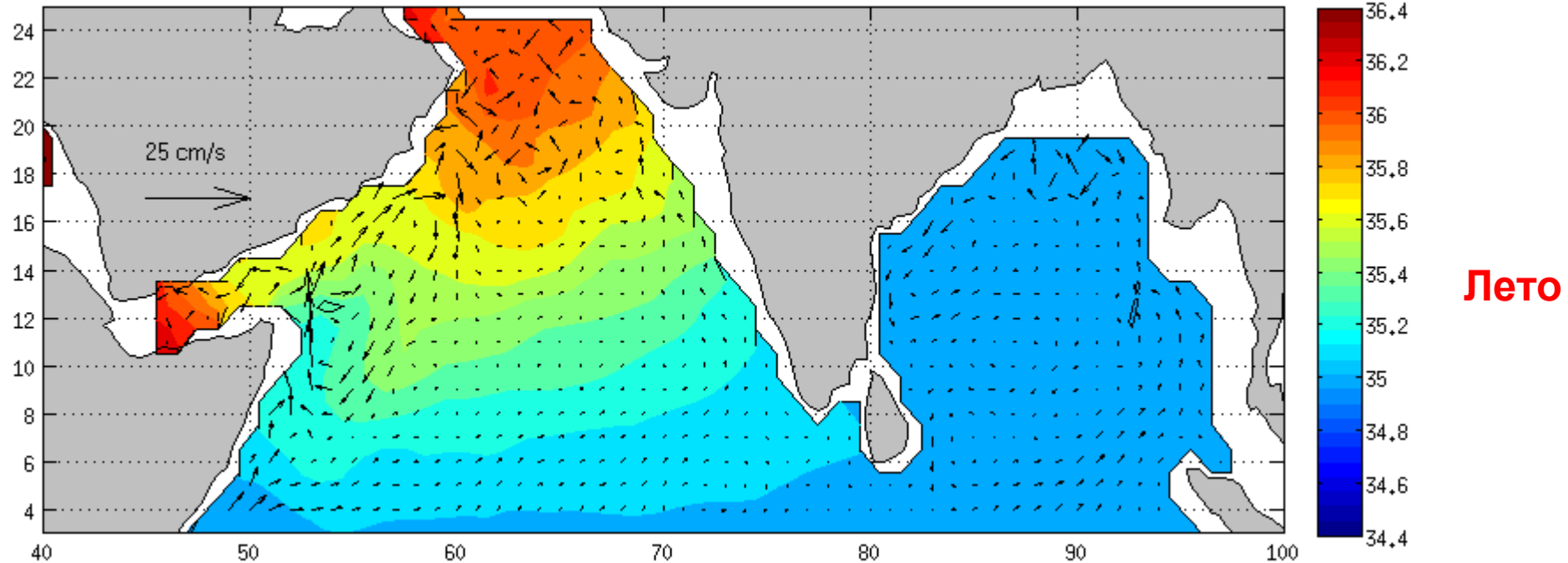
Лето

S at 400 m Climatology for Winter (JFM)

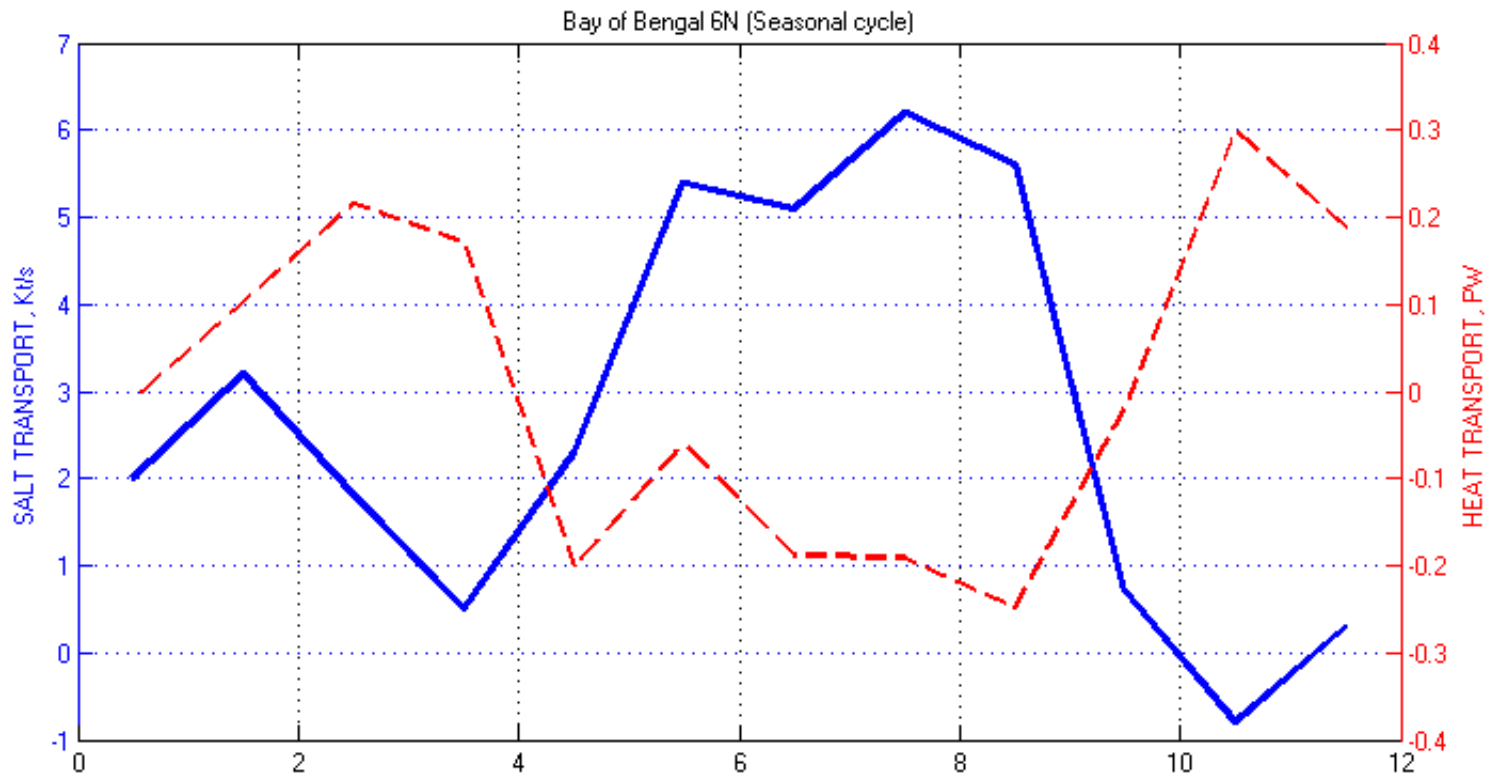


Соленость и течения на глубине 400 м по данным Арго и альтиметрии

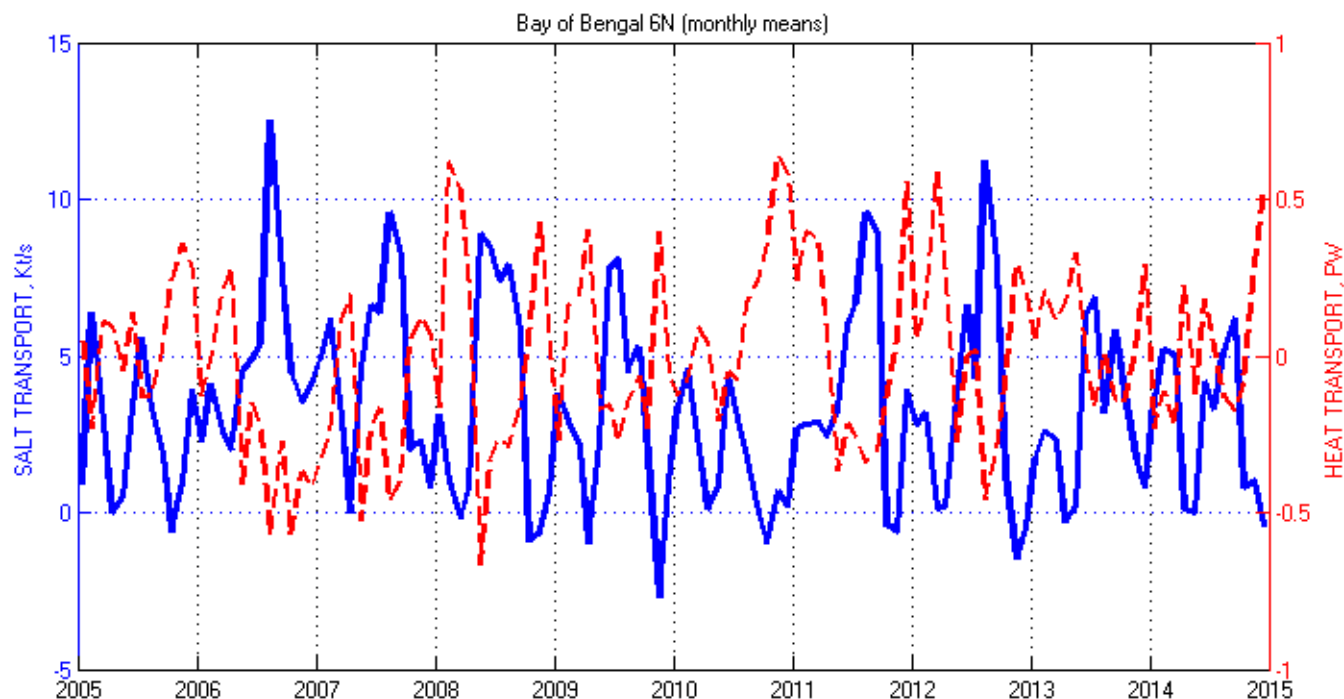
S at 400 m Climatology for Summer (JAS)



Климатический водообмен Бенгальского залива с Индийским океаном



Межгодовая изменчивость водообмена Бенгальского залива с Индийским океаном на основе данных Арго.



Как видно из рисунка поступление в Бенгальский залив тепла и соли, как и в случае среднеклиматических данных, почти всегда находятся в противофазе друг другу. Максимумы поступления соли наблюдаются летом, достигая величин в 13 кт/с. Минимум переноса соли, как правило, имеет небольшие отрицательные значения и приходится на конец года, когда наблюдаются максимумы переноса тепла, достигающие величин 0,6 ПВт. Минимумы переноса тепла приходятся на лето и опускаются до отрицательных значений в -0,6 ПВт.

Основные выводы:

По результатам проведенных модельных исследований можно сделать следующие основные выводы :

1. Модельные расчеты АМИГО с использованием данных Argo за 2005–2014 гг. позволили оценить обмен теплом и солью между Бенгальским заливом и Индийским океаном и его изменчивость.

2. Проведённая с использованием данных независимых измерений баланса пресной воды в Бенгальском заливе валидация полученных результатов показала их хорошее качественное и количественное соответствие рассчитанными по данным Argo поступлениям в залив соли из Индийского океана.

3. Поступление в Бенгальский залив соли и тепла из Индийского океана находятся, как показали расчеты, в противофазе друг с другом. Это, на наш взгляд, связано с тем, что в периоды повышенного поступления в залив тепла возрастает испарение, что приводит к сокращению поступления из атмосферы пресной воды. Снижение поступления в залив пресной воды приводит, в свою очередь, к снижению поступления соли, необходимой для сохранения баланса.