

# Исследование распространения красноморских вод в северо-западной части Индийского океана по наблюдениям поплавков Арго

Лебедев К.В., Филюшкин Б.Н., Кожелупова Н.Г.  
Институт океанологии им.  
П.П.Ширшова РАН

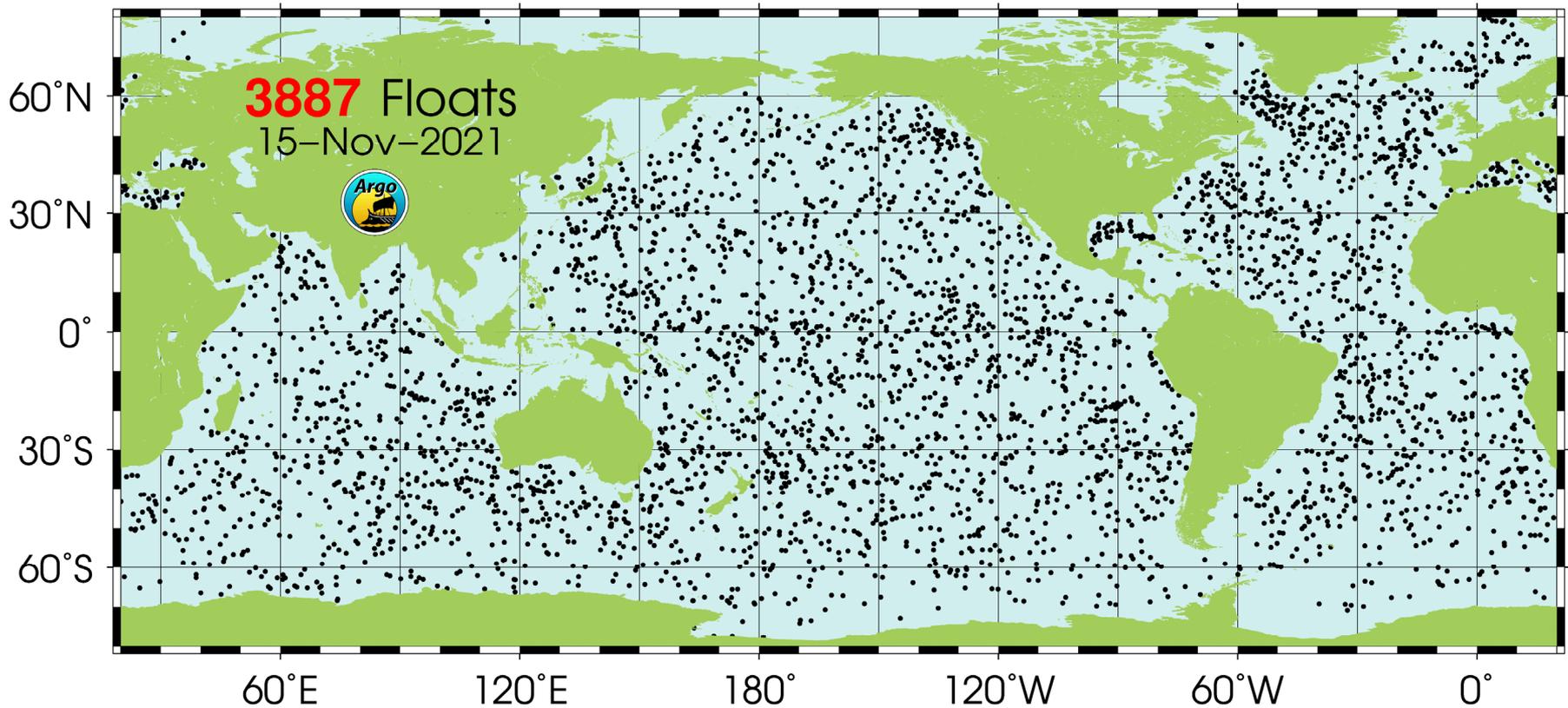
Москва, ИКИ РАН

16 ноября 2021

Появление в начале XXI века постоянно действующей глобальной сети океанографических наблюдений на основе дрейфующих измерителей международной программы Argo предоставляет ученым-океанологам уникальные возможности непрерывного мониторинга состояния Мирового океана. С 2005 г. измерения с помощью поплавков Argo стали вести на большей части акватории Мирового океана: около 4000 поплавков Argo осуществляют на сегодняшний день автономное зондирование до глубин 2 км с 10-дневным временным интервалом. Общее число профилей, накопленных в рамках программы Argo, превышает два миллиона.

Разработанная в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН Argo-модель исследования глобального океана (АМИГО), состоящая из блока вариационной интерполяции на регулярную сетку данных профилирования дрейфующих измерителей Argo и блока модельной гидродинамической адаптации вариационно проинтерполированных полей, позволяет получать по нерегулярно расположенным данным измерений Argo полный набор океанографических характеристик: температуру, соленость, плотность и скорость течений (Лебедев, 2016, 2017).

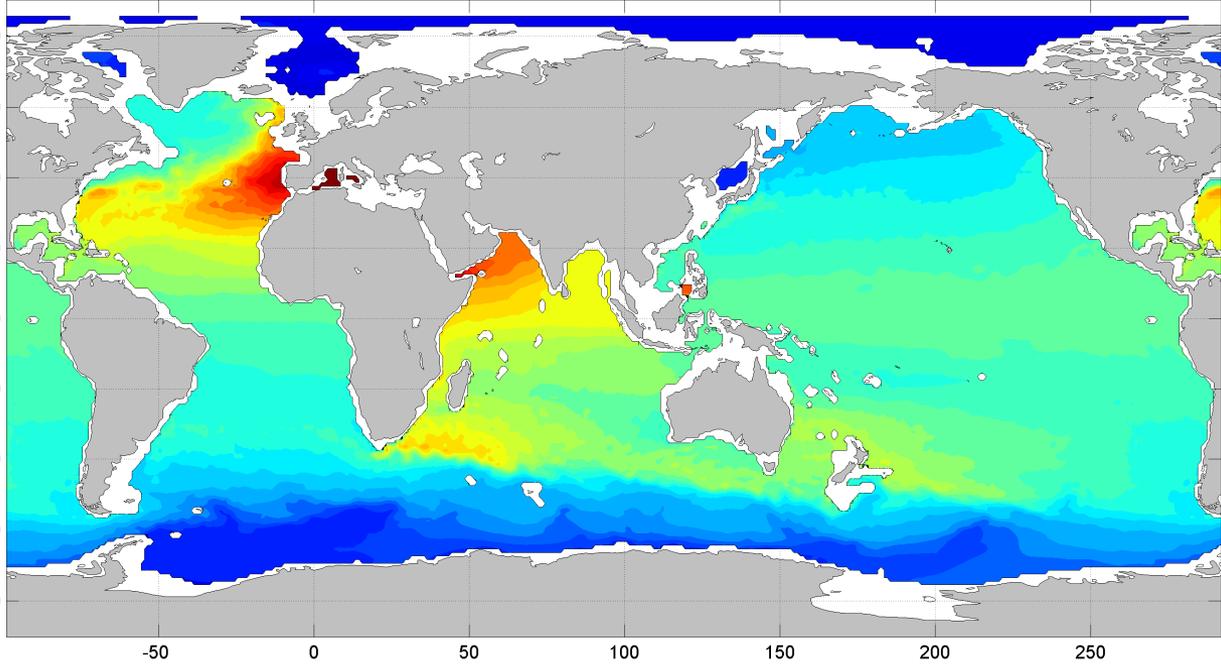
# Argo status



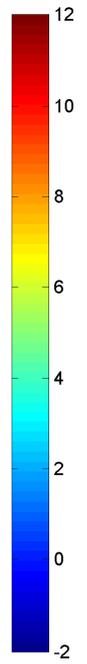
Target of 3000 floats has been reached in Nov 2007  
Nominal density of the array - 1 float per  $3^\circ \times 3^\circ$  bin

08:04

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

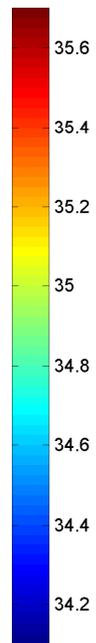
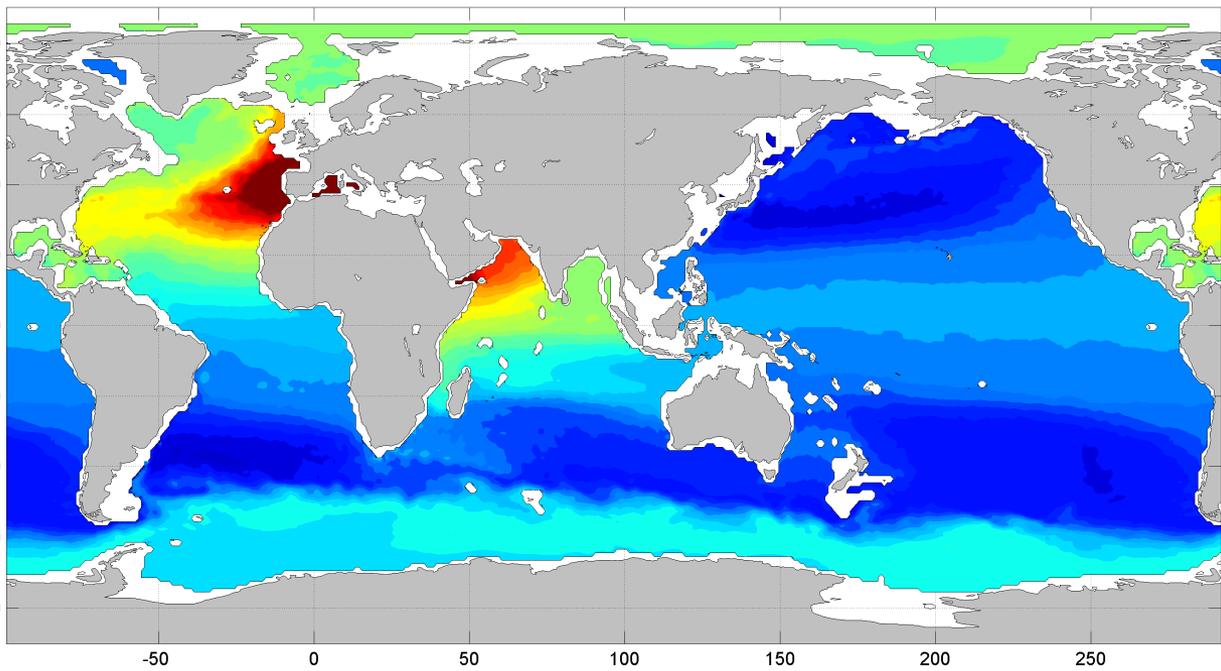


Среднегодовое поле температуры и солёности на 1000 м



Температура

На картах распределения температуры и солёности в Мировом океане, построенных на основе данных измерений Арго (Лебедев, 2017), на глубинах 500-1000 м отчётливо выделяются две области их аномальных значений. Это (1) северо-восточная часть Атлантического океана, прилегающая к Гибралтарскому проливу, и (2) северо-западная часть Индийского океана с Аденским и Оманскими заливами.

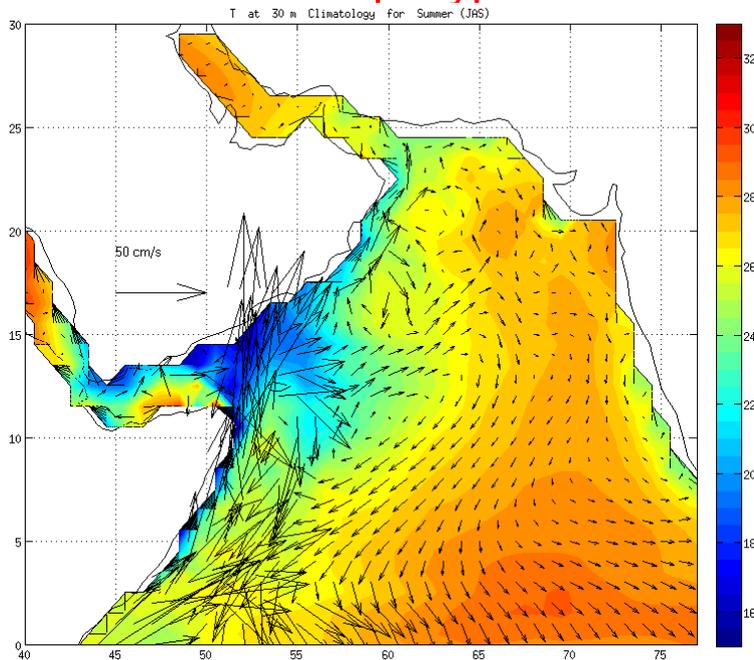


Солёность

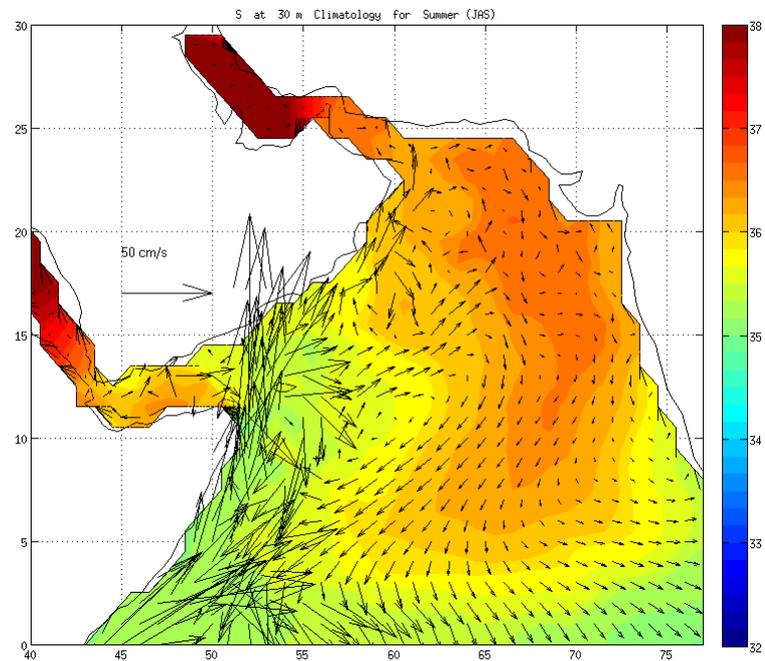
Динамика вод в северо-западной части Индийского океана в значительной степени определяется скоростями муссоновых ветров (далее муссон) и их продолжительностью. Направление ветра прямо противоположно (СВ и ЮЗ) и длительность их действия приблизительно равна (около 4 месяцев). Северо-восточные ветры зимнего муссона (далее зима) имеют наибольшую скорость до 6-7 м/с, тогда как юго-западный летний муссон (далее лето) до 12-13 м/с. Именно эти ветры формируют квазиустойчивую (до 3-4 месяцев) циркуляцию, проникающую на большие глубины, особенно в северо-западной части района. В дальнейшем при анализе будем использовать среднее для трехмесячных сезонов. Это ограничение связано с малым числом в исследуемом районе Арго измерений для расчета среднемесячных величин, а также с фактом, что наблюдаемая периодичность изменчивости гидрологических ситуаций по времени жизни близка к этому периоду.

## ЛЕТО 30 м

### Температура



### Соленость

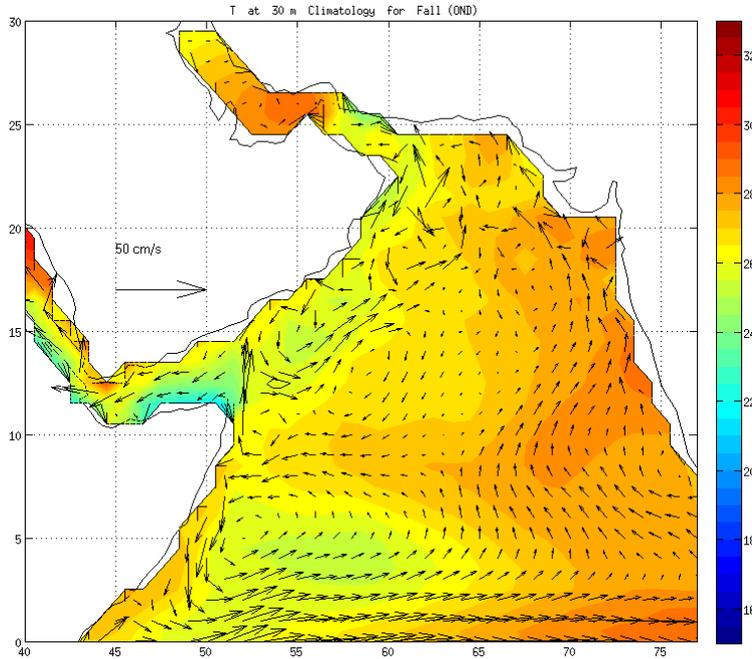


На летних картах выделяются следующие основные динамические структуры. Вдоль Африканского побережья возникает сильное Сомалийское течение (1),двигающееся на север со скоростями до 100 см/с на этом горизонте, переходящее на севере в Восточно-Арабское течение (2), достигающего Оманского залива со скоростью около 10-30 см/сек. В восточной части залива возникает слабое, порядка 5 см/сек, Западно-индийское течение,двигающееся на юг. Южнее центральной части Восточно-арабского течения возникает течение Финдлатера со скоростями до 10 см/сек (4), также связанное с обширной зоной прибрежного апвеллинга и с понижением поверхностной температуры на 5°C.

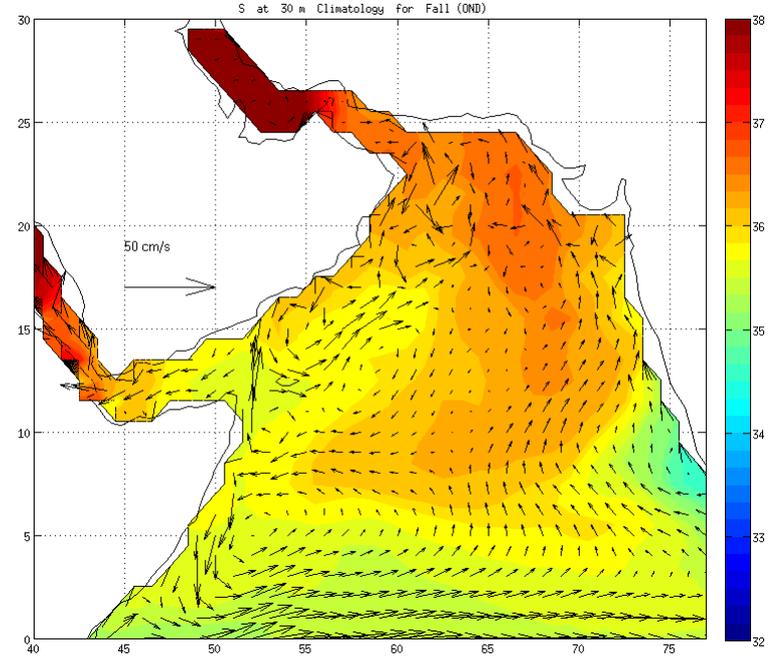
Поля температуры и солёности оказались под сильным влиянием летнего муссона: западная часть общего антициклонического круговорота стала более холодной и менее солёной, чем в восточной. Так вдоль африканского берега, начиная с 3 с.ш. до Аденского залива и захватывает западную часть Аравийского полуострова, наблюдается прибрежный апвеллинг с понижением температуры до 18°C и солёности до 35.4. Тогда как восточная половина области отмечается температура до 27°C и солёность выше 36.5 епс.

## ОСЕНЬ 30 м

### Температура



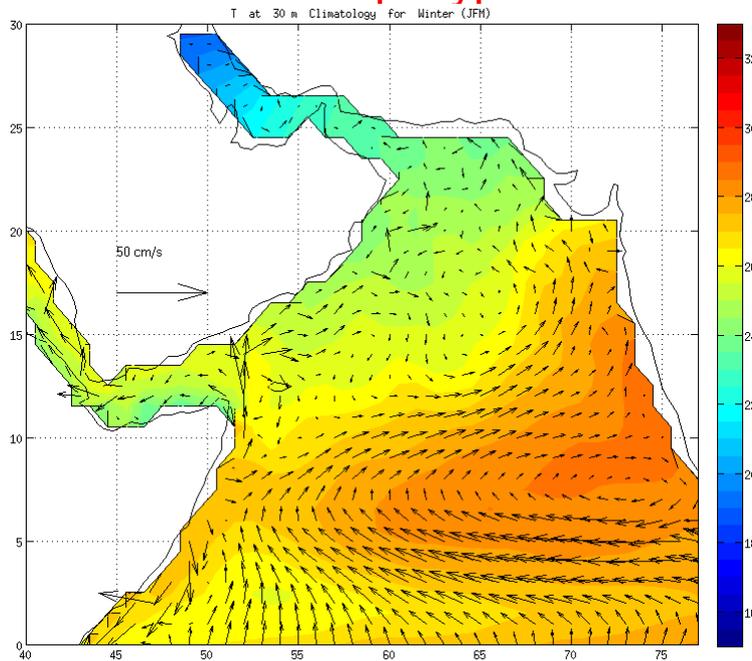
### Соленость



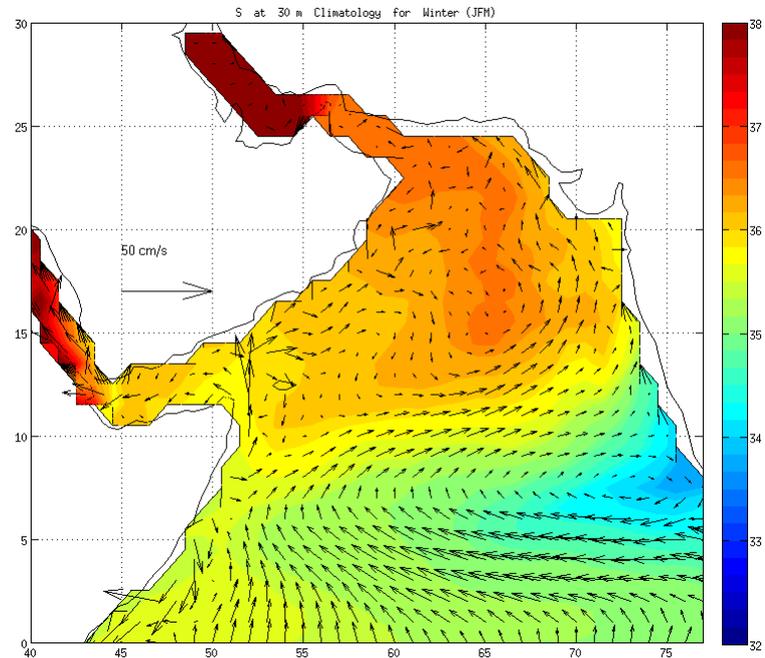
В осенние месяцы с октября по декабрь практически исчезает ярко выраженная динамика течения в западной части исследуемой области и устанавливаются крупные круговороты разных знаков вращения с малыми скоростями (5-10 см/сек) занимающими всю область. Сомалийское течение наблюдается вдоль африканского берега от 2 до 7 с.ш,двигающегося в южном направлении со скоростями 10-25 см/сек. В начальной стадии зимнего муссона отмечается более сильное течение (10-20 см/сек), где в прибрежной зоне отмечается апвеллинг с понижением температуры и солености. Скорость ветра зимнего муссона достигает своего максимума с января по март.

## ЗИМА 30 м

### Температура



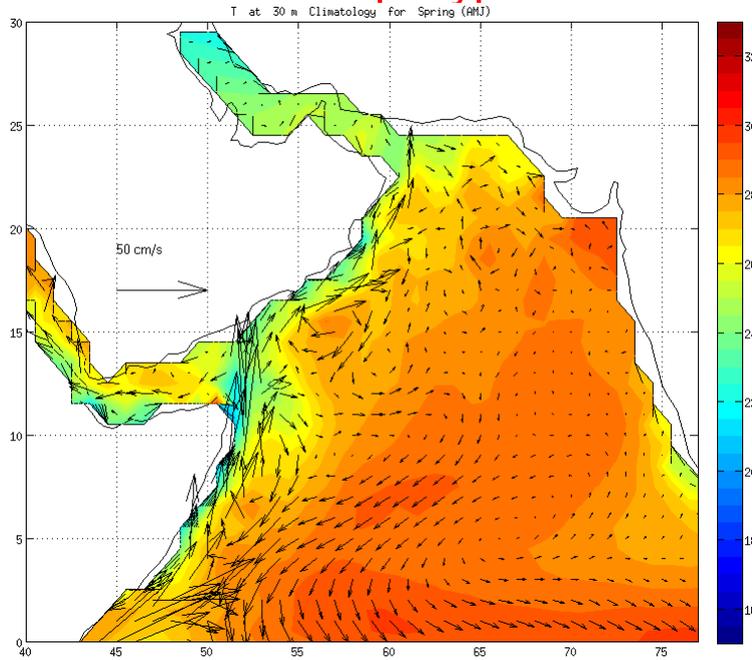
### Соленость



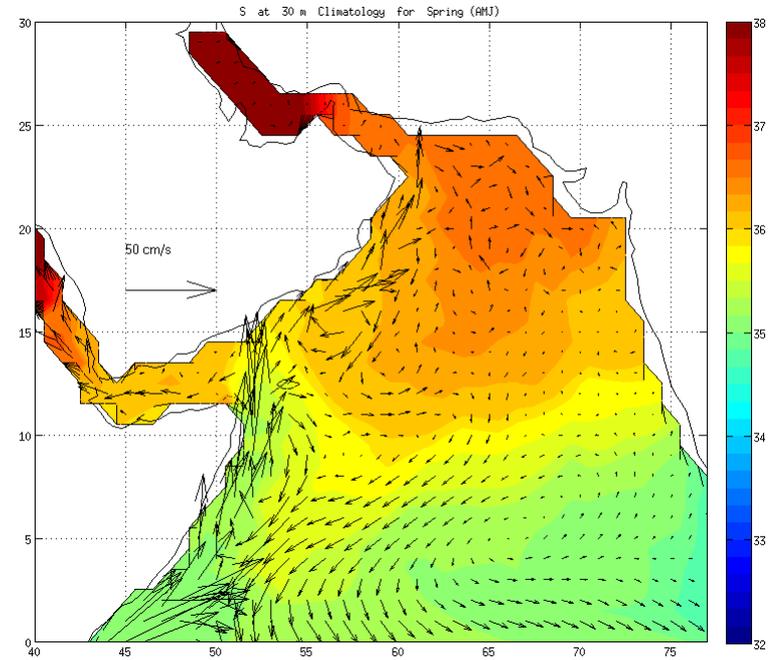
Зимний муссон перестраивает полностью динамическую картину при этом ощутимо падают величины скорости и течения: Сомалийское течение прослеживается только начиная с 6° с.ш. и направлено на юг узкой струей со скоростью 10 см/сек. Вся южная часть района от 2° до 7° с.ш. занято северным экваториальным течением,двигающимся на запад. Огромный слабовыраженный (4-10 см/сек) циклон занимает северо-восточную часть северной половины области. Восточно-арабское течение (10-16 см/сек) хорошо выражено только в западной половине. Северо-восточный муссон способствует обильному поступлению очень соленых вод Персидского залива (больше 36.7) и относительно прохладных (ниже 26°C). Основной объем теплых вод на север поступает северо-экваториальным течением и струями Индийского западно-прибрежного течения.

## ВЕСНА 30 м

### Температура



### Соленость



Весенний сезон, в нашем случае продолжается с апреля по июнь, в значительной степени напоминает летнюю картину. Начинает формироваться Сомалийское течение,двигающееся на север со скоростью 40 см/сек и начинает формироваться система антициклонических круговоротов в западной части области. Увеличиваются скорости восточно-арабского течения до 15-20 м/сек. На западе вдоль побережья Африки начинает развиваться область апвеллинга, продвигающийся летом прибрежным районом Аравийского полуострова.

Горизонт 300 м отмечается максимальным значением солености вод Персидского залива (ПЗВ), поступающих в Индийский океан (ИО) из Оманского залива, в летний и зимний сезоны. В действительности плюм соленых и теплых вод существует в течение всего года. На юг эти воды распространяются до 15° с.ш. на западе, на востоке до 20° с.ш. Особенно четко его границы выражены по солености от значения 36,0 на севере и 35,6 на юге и соответственно по температуре от 16 до 14° С. Фактически эта центральная часть водной массы ПЗВ, выделенная на глубинах 200-400 м с диапазоном температур 15-19° С и солености 35,1-37,9. В зоне плюма почти во все сезоны отмечается повышенная активность горизонтальных течений (около 3-5 см/сек) особенно выделяется в осенний сезон, когда горизонтальная скорость достигает 10 см/сек. Это возможно связано с началом действия зимнего муссона и развитием вертикальных движений в поверхностных слоях – даунвеллинг и конвекция. Воды Аденского залива на этом горизонте наблюдаются только в глубине залива. А вдоль Африканского побережья отмечается полоса более холодных вод (12-13° С), вызываемая процессами летнего апвеллинга.

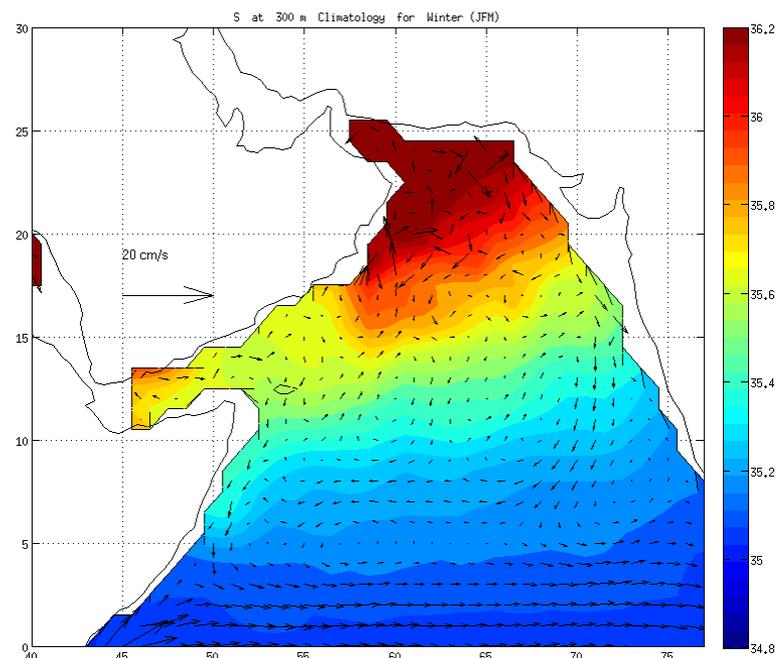
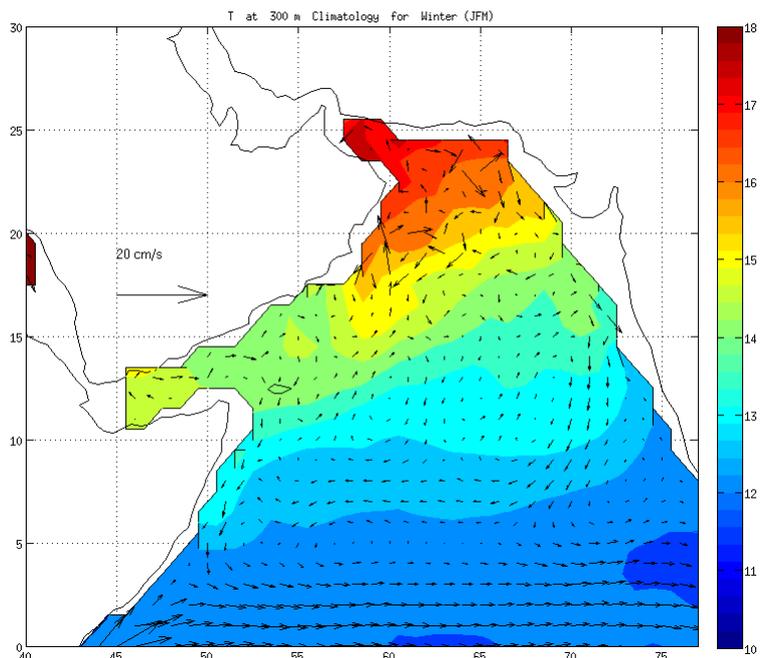
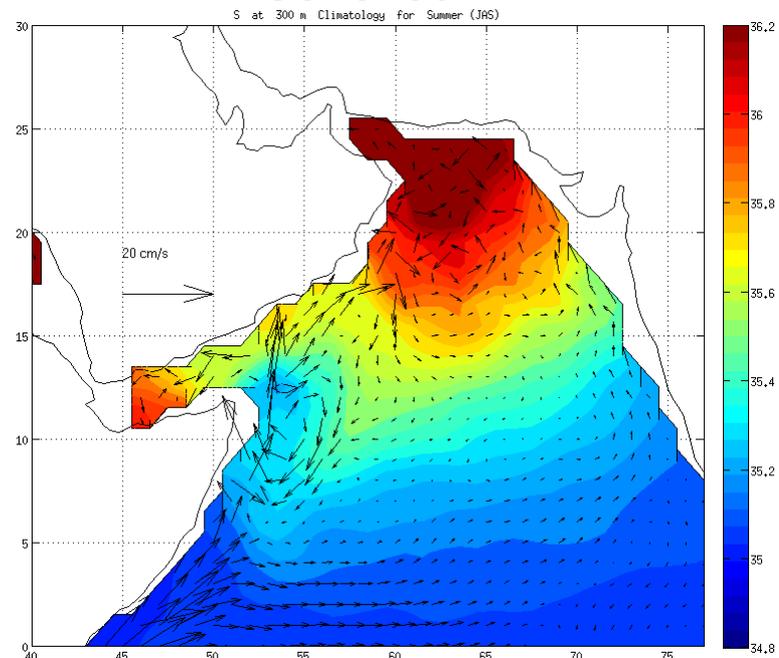
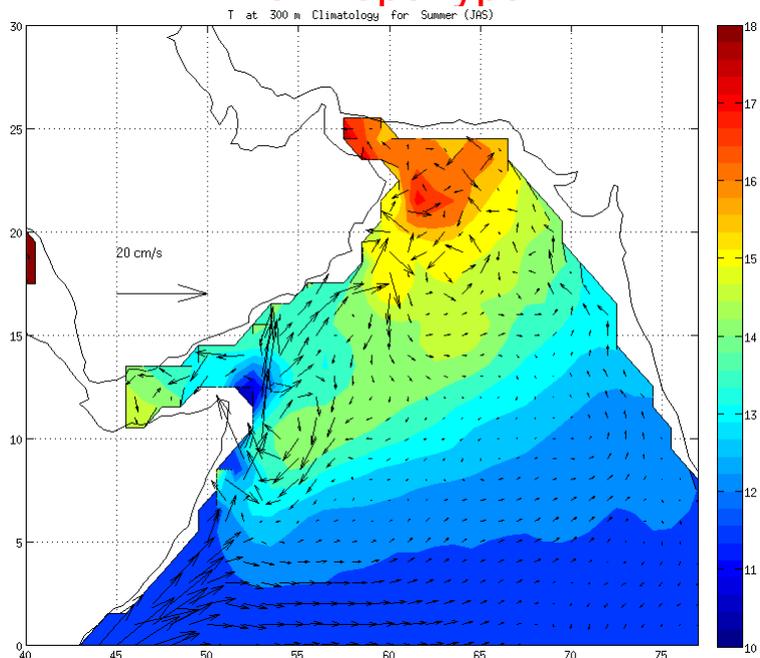
# Температура

## 300 м

# Соленость

## ЛЕТО

## ЗИМА



На горизонте 600 м был отмечен максимум солености и температуры КМВ, вытекающих из Аденского залива. Отчетливо видно, что воды, поступающих из двух источников – Аденского и Оманского заливов, определяют гидрологию Аравийского моря. Воды Красного моря (КМВ) занимают глубины 500-800 м. Температура меняется в диапазоне 9-11°C и соленость – 35,1-35,7. Эта вторая основная водная масса, которая определяет гидрологию Аравийского моря. Здесь следует заметить, что слой больших значений солености наблюдается на глубинах от 600-800 м. Начиная с этой глубины, заметно усиливается вынос КМВ из Аденского залива в течение всего года, но особенно зимой (температуры > 13°C, солености >35,8).

Летом на этом горизонте на месте Сомалийского течения наблюдается слабый поток, направленный на юг, (скорость , 2 см/сек), но в западной части Аравийского моря отмечается антициклонический круговорот диаметром более 300 км со скоростью около 4 см/сек. Зимой по всей акватории скорости падают и в восточной половине области развивается обширный циклонический круговорот с очень маленькими скоростями (<2 см/сек). Резюмируя, отметим, что наибольшая динамическая активность наблюдается в Аральском море летом и осенью: течение возрастает до 5 см/сек, а осенью в Оманском заливе возрастает до 10 см/сек.

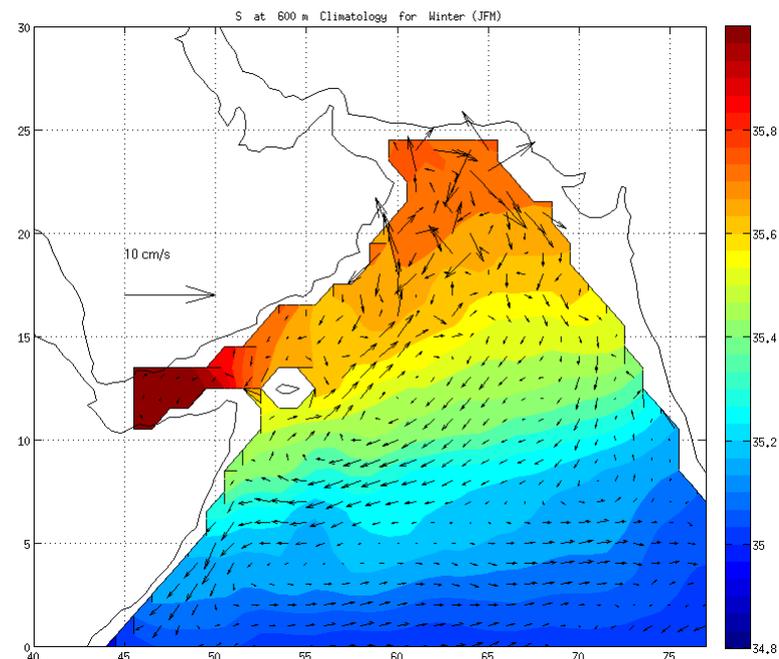
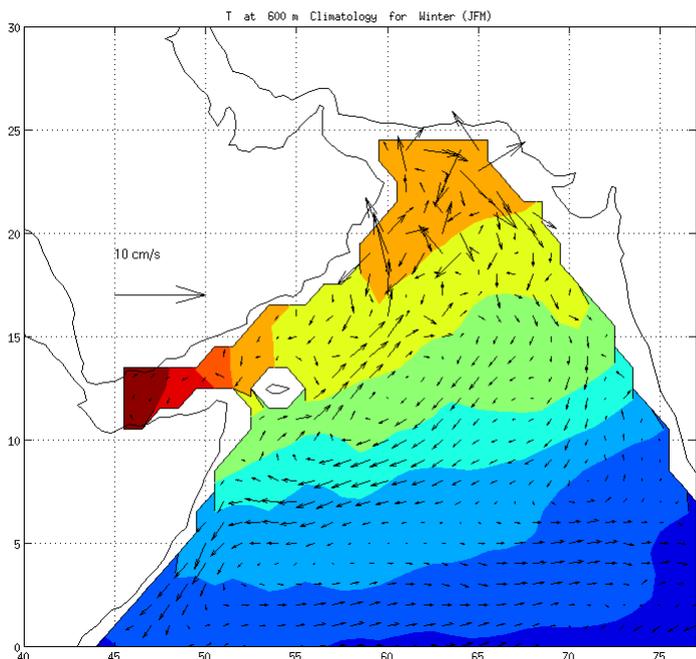
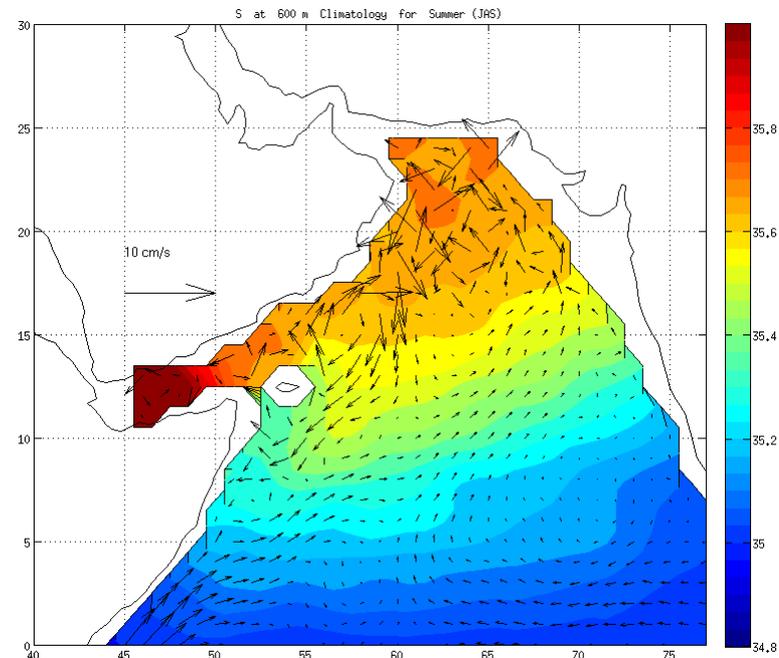
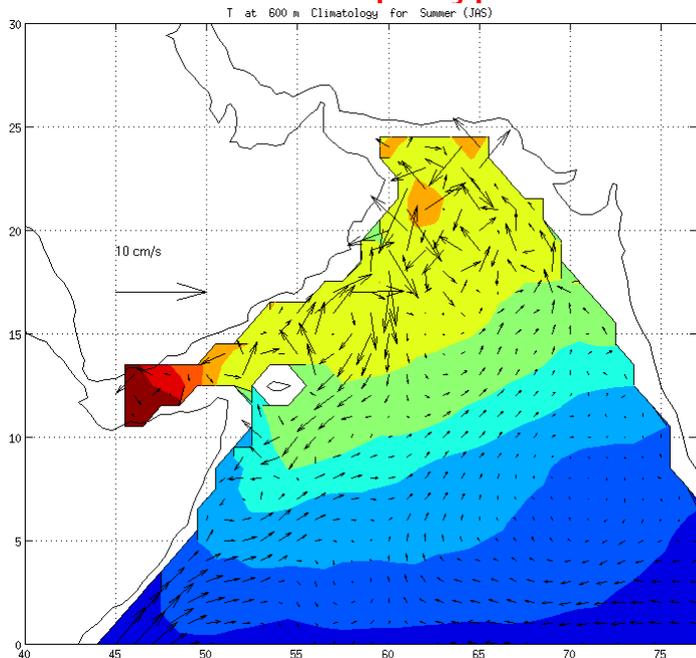
# Температура

## 600 м

# Соленость

## ЛЕТО

## ЗИМА



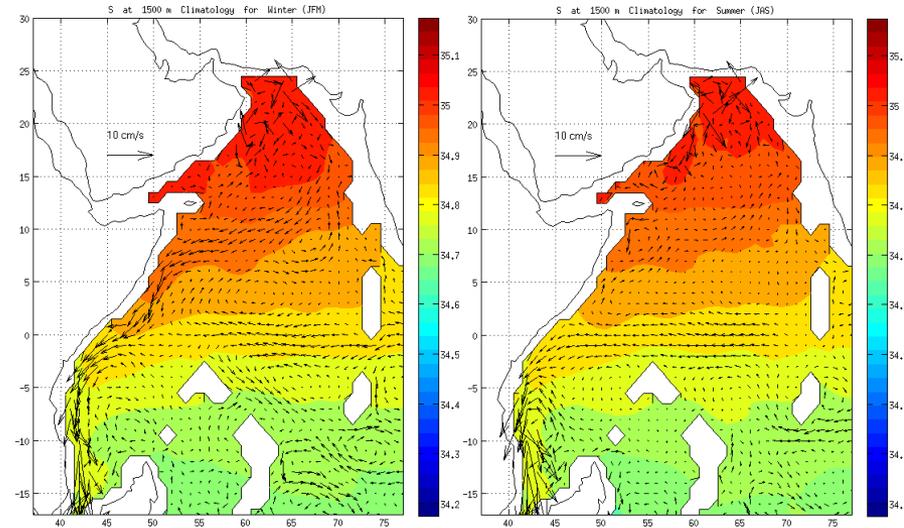
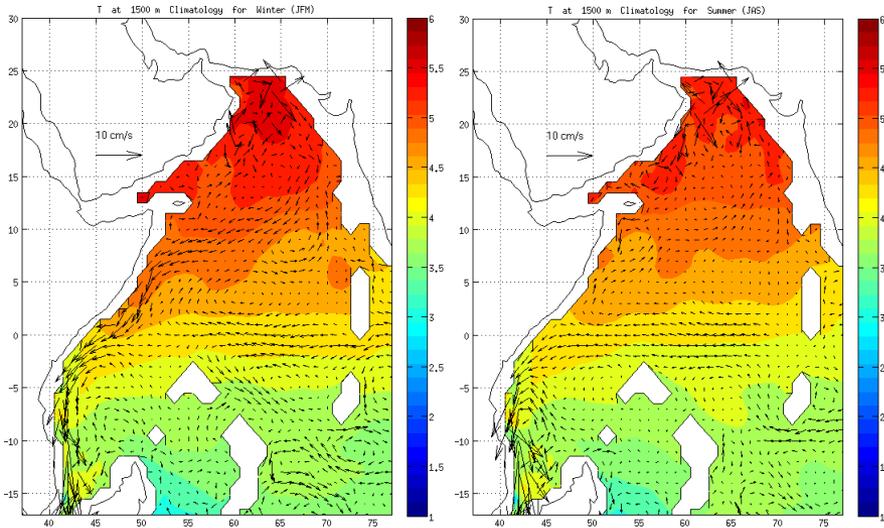
Совместный анализ полей течений на горизонтах 30-500 м в период летнего муссона дает возможность проследить затухание скорости Сомалийского течения с глубиной. (100, 60, 20 см/сек (30, 200 и 400 метрах). А также определить положение центра антициклона, сформированного этим течением. Этот вихрь обнаруживается на глубинах до 500 м в квадрате с координатами 9-10° с.ш. и 53-54° в.д. При этом его положение меняется в разные годы. Кроме того влияние летнего муссона сказывается и на больших глубинах. Так на 600 м в западной части Аральского моря (15° с.ш. и 57° в.д.) формируется антициклон диаметром около 300 км с орбитальными скоростями 3-5 см/сек. Следует заметить, что проявление этого вихря, только с очень малыми орбитальными скоростями, прослеживается до глубины 1500 м.

В период летнего муссона в северо-восточной части области на глубинах 800 м формируется крупный антициклон. Его северная струя, проходящая по южной границе Аравийского моря, захватывает более соленые и теплые КМВ, и на 7° с.ш. начинает двигаться на запад, перенося эти воды до Африки. Далее эти воды двигаются на юг в виде устойчивого глубинного восточно-африканского течения. Струя этого течения выделяется и на глубине 1750 м, причем она пересекает экватор и доходит до 15° ю.ш. Таким образом, КМВ на глубинах от 1000 до 1750 м наблюдаются в Индийском океане южнее экватора.

# Температура

## 1500 м

# Соленость



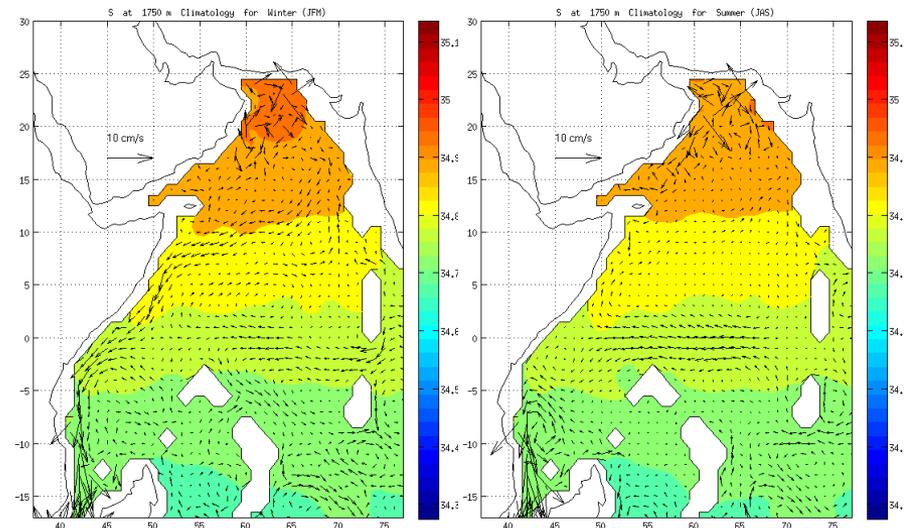
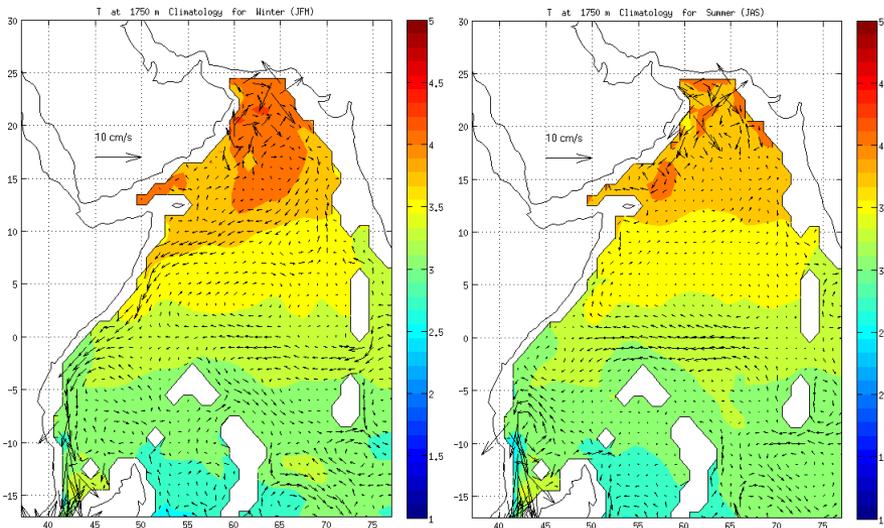
## ЗИМА

## ЛЕТО

## ЗИМА

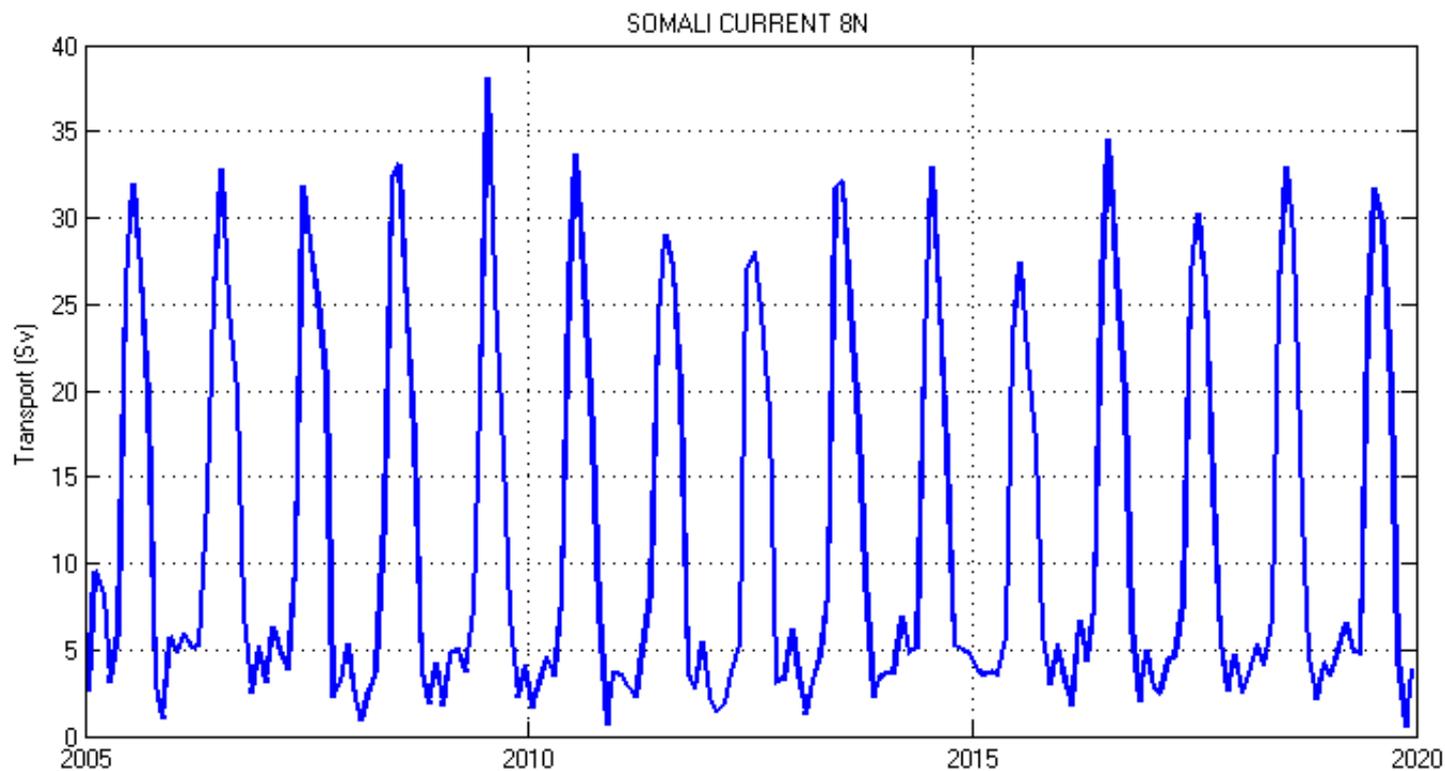
## ЛЕТО

## 1750 м



## Расход Сомалийского течения

Данные представлены среднемесячными значениями расхода, полученными по результатам расчетов АМИГО для периода 2005-2019 гг.



## **Основные выводы:**

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы :

1. Модельные расчеты АМИГО с использованием данных Арго за 2005–2019 гг. позволили детально проанализировать особенности четырехмерного распространения вод Красного моря (КМВ) и Персидского залива (ПЗВ) и изучить их сезонную изменчивость.

2. Основная динамика этого района определяется летним муссоном: формируется сильное Сомалийское течение и самый большой антициклонический вихрь в Мировом океане – Great Whirl, а также отдельные вихри синоптических масштабов в Аравийском море.

3. Показано, что в период зимнего муссона преобладают крупные циклонические круговороты с существенно меньшими значениями скоростей. Анализ полей гидрологических характеристик позволил более четко определить характер распространения аномальных вод КМВ и ПЗВ по данным температуры и солёности.

4. Показано, что КМВ и ПЗВ занимают большие глубины (больше 800 м) в северо-восточной части Индийского океана и на глубинах 1000-1500 м формируют круговое циклоническое течение, которое на широте  $10^\circ$  движется на запад и уже около Африканского побережья в виде узкой струи устремляется на юг, пересекает экватор и достигает 15-го градуса ю.ш.