

Глобальная ветротермохалинная циркуляция Океана

Р.Ю. Тараканов

В настоящей работе приводится краткий обзор состояния исследования Глобального океанского конвейера (ГОК), как элемента Глобальной циркуляции океана, связывающего термоклин и абиссаль. В частности, отмечается, что существование ГОК не может быть обусловлено только действием термохалинных факторов. Помимо них необходимо также и ветровое воздействие на океан. Причем районом такого воздействия, определяющим саму конфигурацию ГОК, является Южный океан. Кроме того, для самого существования ГОК в его нынешнем виде принципиальное значение имеет конфигурация материков текущей геологической эпохи.

Ключевые слова: Глобальный океанский конвейер, ветротермохалинная циркуляция, абиссаль, термоклин.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-00283) и федеральных бюджетных ассигнований (государственное задание №0128-2021-0002).*

Введение

Океан можно условно разделить на термоклин (верхние примерно 1500 м) и абиссаль, ниже указанного горизонта. Все течения термоклинного слоя формируются, главным образом, за счет ветрового воздействия на океан, а также обмена между океаном и атмосферой теплом и пресной водой, и приспособления поля плотности в толще океана к этому воздействию. Течения в абиссали океана обусловлены, в основном, горизонтальной неоднородностью поля плотности. При этом абиссаль Мирового океана заполняется плотной холодной водой с поверхности в высоких широтах всего в нескольких районах Мирового океана – в Северной Атлантике и в нескольких районах континентального шельфа вокруг Антарктиды. Этот переход воды из термоклина в абиссаль определяет нисходящие ветви элемента крупномасштабной циркуляции Мирового океана, который обычно называют Глобальным океанским конвейером (ГОК) (например, [1]). Задача исследования пространственной структуры и интенсивности ГОК – одна из главных проблем макро-океанологии ввиду очень существенного влияния ГОК на климат Земли и его изменчивость.

Несколько более детально механизм формирования течений в термоклине можно описать следующим образом, следуя, например, работе [2]. Трение атмосферы о поверхность океана, за счет, главным образом, опрокидывания ветровых волн, обеспечивает передачу энергии от атмосферы тонкому поверхностному слою океана размером порядка длины

самых волн, то есть несколько десятков метров. В условиях вращения Земли направление возбуждаемого таким образом течения в этом тонком слое идет не по ветру, а меняется с глубиной, практически полностью затухая к основанию этого слоя. При этом полный суммарный по глубине поток такого течения, называемого чисто дрейфовым течением (ЧДТ), направлен строго перпендикулярно (!) к ветру, вправо – в Северном полушарии, влево, в Южном (отметим, что указанное обстоятельство интуитивно совершенно не очевидно неподготовленному человеку). Естественно, что ЧДТ тем сильнее, чем сильнее ветер. Поскольку характерные интенсивность и направление ветра меняются главным образом с широтой, то соответственно меняются интенсивность и направление ЧДТ, что, в свою очередь, создает эффект сгона-нагона воды в верхнем слое океана. В Мировом океане это обеспечивает диапазон перепада уровня свободной поверхности океана (относительно поверхностей равного геопотенциала) примерно 3 м. Некоторый дополнительный эффект в этот перепад вносят осадки/испарение за счет



ТАРАКАНОВ

Роман Юрьевич

профессор РАН,
Институт океанологии им.
П.П. Ширшова РАН

притока/оттока воды и теплообмен с атмосферой за счет теплового расширения/сжатия воды.

Если бы вода в океане была однородна по плотности, то в описанных условиях на любой глубине (более точно – геопотенциальной поверхности в глубине океана) существовал бы одинаковый для данной географической точки горизонтальный градиент давления, то есть разница в весах столбов вышележащей воды. В реальном океане плотность воды меняется по пространству, в том числе по глубине – чем глубже, тем плотнее вода. В местах нагона ЧДТ вынужденным образом возникает движение воды вертикально вниз и изолинии плотности воды прогибаются вниз, в местах сгона – наоборот, движение вверх и подъем этих изолиний вверх. За счет указанного эффекта средняя плотность более высокого столба воды оказывается меньше, чем более низкого, и с увеличением глубины веса столбов разной высоты постепенно выравниваются, становясь одинаковыми примерно на глубине 1500 м. Таким образом в реальном океане в верхнем примерно 1500-метровом слое формируется убывающий с глубиной градиент давления, направленный навстречу потоку ЧДТ.

Этот градиент является силой, которая в силу третьего закона Ньютона требует компенсации – либо в виде ускорения частиц воды, либо в виде стационарной силы. Такой стационарной силой на большей части пространства Мирового океана (за исключением узкой экваториальной области и некоторых узких областей на краях океанов) является связанная с вращением Земли сила Кориолиса. При этом соответствующая этой силе скорость движения частиц воды направлена перпендикулярно градиенту давления. Причем даже в той части верхнего слоя океана, где существует ЧДТ, эта скорость примерно на порядок больше скорости ЧДТ. В результате полное течение верхнего

примерно 1500-метрового слоя океана, состоящее из ЧДТ и течения, балансирующего градиент давления, направлено, как правило, по ветру (!), хотя существуют примеры, когда оно направлено и навстречу ему.

Холодные воды, опускающиеся в глубину в высоких широтах, будучи плотнее окружающих вод, формируют горизонтальную неоднородность поля плотности, а следовательно, и горизонтальный градиент давления, нарастающий с глубиной. Из-за вращения Земли этот градиент компенсируется силой Кориолиса. Таким образом, в Северном полушарии опускающиеся плотные воды отклоняются вправо, то есть стремятся прижаться правой стороной потока к склону, а в Южном – влево. Далее эти воды распространяются в низкие широты, также прижимаясь, соответственно, вправо и влево и перетекая из котловины в котловину. Поскольку плотность вод в океане определяется соленостью и температурой, такую циркуляцию можно назвать термохалинной.

Чтобы в Мировом океане поддерживалась реально наблюдаемая структура плотностной стратификации (то есть реальное пространственное распределение плотности), интенсивность опускания вод в глубину Мирового океана в полярных областях должна составлять 25–30 Св [3]. Скорость перемещения объема воды в Мировом океане принято измерять в величине, называемой «Свердруп» (сокращенно Св, 1 Св равен $10^6 \text{ м}^3/\text{с}$); единица измерения названа в честь Харальда Свердрупа, норвежского океанографа, автора одного из первых учебников по океанологии: *The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology*, 1942. Интенсивность опускания воды на севере Атлантики (североатлантическая ячейка ГОК), по разным оценкам, составляет 14–18 Св (например, [1, 4–6]). Оценки опускания воды в Антарктике варьируются в гораздо более широких пределах и могут отличаться, по разным источникам, в несколько раз. Наиболее достоверными представляются оценки, полученные на основе баланса трассеров (фреоны, радиоуглерод, квазиконсервативный фосфатный комплекс и др.) непосредственно в Антарктике – 15–20 Св [7–9].

Временные периоды распространения воды в рамках ГОК составляют сотни и даже тысячи лет. Так, самый большой возраст (то есть промежуток времени от последнего контакта с атмосферой) глубинной воды оценивается в 1500 лет в северо-восточной части Тихого океана [10]. Глубины океана в этом смысле сохраняют сигнал о воздействии на него атмосферы (колебаний потоков тепла, пресной воды, растворенных газов и пр.) на сопоставимых промежутках времени. Это значит, что ГОК может быть

до известной степени ответственен за тысячелетние колебания климата Земли.

Термохалинный ГОК

Отметим, что общепринятых физической концепции крупномасштабного распространения абиссальных вод и представления об обратном подъеме вод из абиссали в верхний слой океана на настоящий момент не существует. Первая и наиболее популярная схема ГОК (рис. 1) была опубликована в работе [11]. Однако еще ранее в работе [12] было дано словесное описание ГОК, по существу идентичное схеме на рис. 1. Еще значительно ранее в работе [13] и независимо от нее в работе [14] были представлены связывающие верхний слой и абиссаль схемы циркуляции вод Атлантического океана (рис. 2 и 3).

В схеме Брёкера (рис. 1) приводным механизмом ГОК является термохалинное воздействие (нагрев/охлаждение, осадки/испарение, ледотаяние/ледообразование) атмосферы на океан, в данном

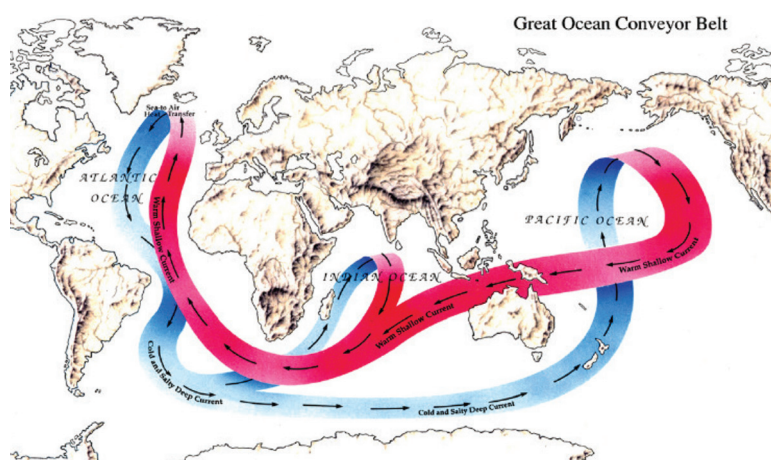


Рис. 1. Схема Глобального океанского конвейера в концепции [11]. Красным цветом показана верхняя теплая ветвь конвейера, синим – нижняя холодная.

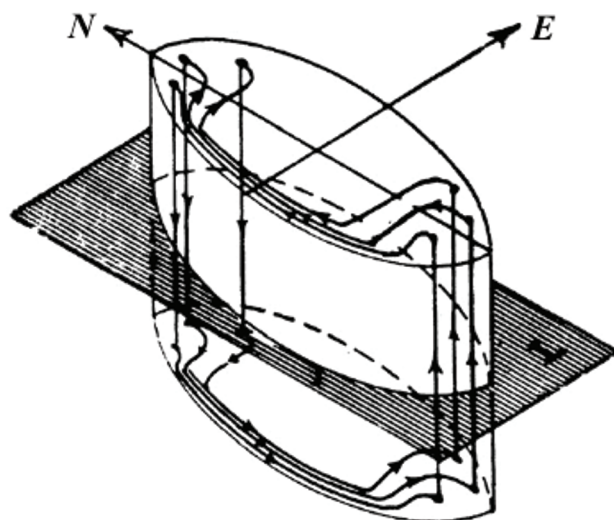


Рис. 2. Схема «внутренней» циркуляции вод Атлантики по [13].

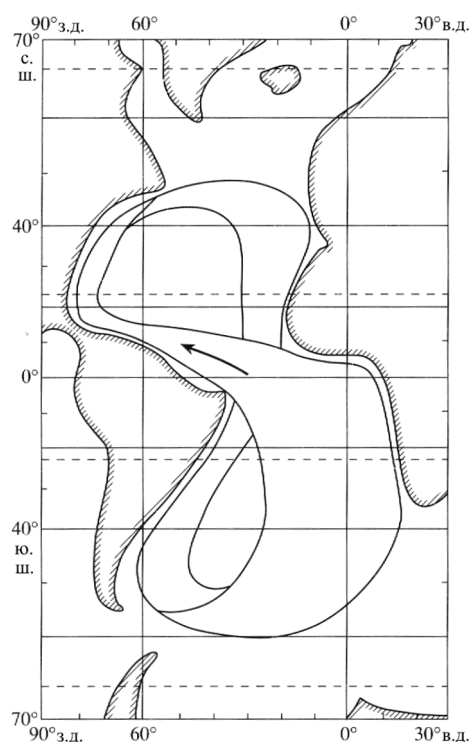


Рис. 3. «Главная петля Атлантики» – рисунок и подпись к нему из [14].

случае – охлаждение поверхностных вод, поступающих из низких широт Атлантики, которые были осолонены по ходу своего движения за счет превышения испарения над осадками в этих широтах. Опустившаяся в глубину вода следует на юг вдоль изопикнических поверхностей (поверхностей равной плотности) и включается в систему Глубинного западного пограничного течения Атлантического океана [15]. В Южном полушарии эта вода включается, в свою очередь, в систему Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), опоясывающего Антарктиду с запада на восток, а затем распространяется на север по обширным акваториям Индийского и Тихого океанов. Именно здесь в описываемой схеме происходит обратный переход вод из абиссали в термоклин. Затем через Индонезийские проливы и в обход Африки с юга уже в термоклине вода возвращается в Северную Атлантику.

Результаты ряда исследований показывают, что схема Брёкера физически несостоятельна (например,

[16]). В частности, оценки коэффициента вертикального турбулентного обмена в основании термоклина, полученные на основе инструментальных измерений с помощью красителей, а также с помощью акустических измерений, оказались не менее чем на порядок меньше необходимых для эффективной реализации перехода из абиссали в термоклин [17–20].

Ветротермохалинный ГОК

Одновременно со схемой Брёкера постепенно развивалась альтернативная идея компенсации опускания вод в глубину в Северной Атлантике, которая на сегодняшний день приобретает всё больший вес. Согласно этой идее, подъем вод из глубины происходит не на обширных акваториях Индийского и Тихого океанов, а в Южном океане в ходе движения вдоль изопикнических поверхностей в полосе АЦТ. На *рис. 4* показан разрез нейтральной плотности, поверхности которой аппроксимируют изоэнтропийные поверхности в океане, то есть поверхности, при движении вдоль которых не совершается работа против силы Архимеда.

На *рис. 5* представлена схема ГОК (рисунок взят из работы [1], автором внесены некоторые изменения), пожалуй, наиболее полно отражающая современное представление о структуре конвейера и основанная на упомянутой выше идее. Схема построена на выполненных в указанной работе расчетах и обобщении информации о структуре ГОК, содержащейся в многочисленных работах последних лет.

Приводным механизмом, обеспечивающим показанную на *рис. 5* конфигурацию ГОК, является воздействие на поверхность океана западного ветра, опоясывающего антарктический континент. В результате в тонком поверхностном слое (до 50 м глубиной) формируется направленный на север поток ЧДТ, сгоняющий воду от Антарктиды

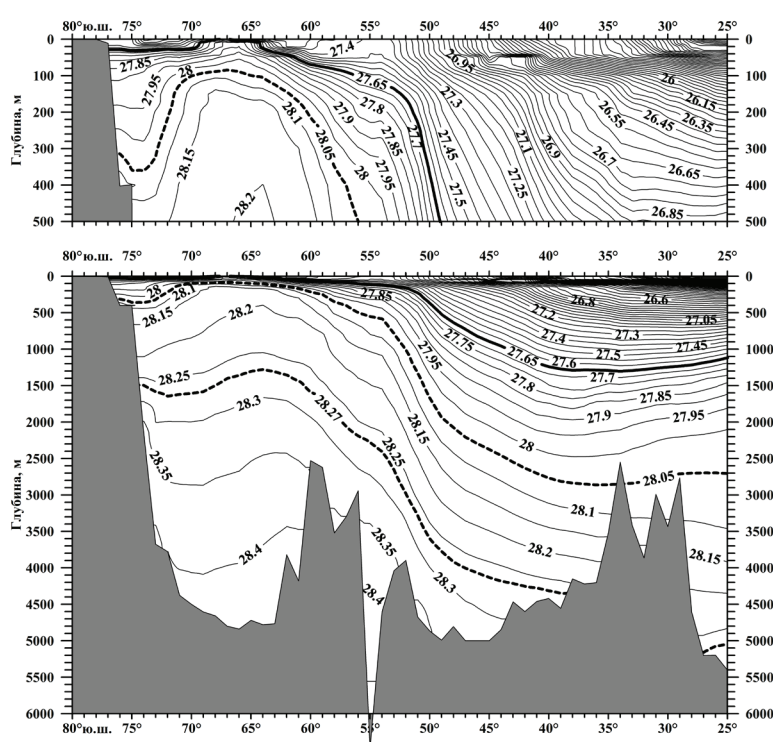


Рис. 4. Среднеклиматическое распределение нейтральной плотности σ_t на разрезе через Южный океан по меридиану 30° з.д. по данным [21].

в сторону экватора. Этот сгон компенсируется изопикническим подъемом воды с глубин 1500–3500 м из умеренных широт в сторону Антарктики [22]. На *рис. 5* этот подъем условно показан черной стрелкой в одном месте, хотя в реальности подъем происходит по всей циркумполярной области (от зеленой полосы к розовой). Указанный подъем, в свою очередь, балансируется двумя направленными на север потоками. Один находится в верхнем слое океана, другой – в придонном слое. Вторым поток формируется за счет охлаждения и уплотнения воды на антарктическом шельфе [23]. Замыкание верхней (так называемой термоклинной) ячейки ГОК происходит за счет опускания вод в Северной Атлантике, как показано на *рис. 1*, и формирования затем направленного потока вод на средних глубинах. За счет смешения придонных вод антарктического происхождения с вышележащими промежуточными водами Тихого и Индийского океанов с последующим формированием направленного к Антарктике потока вод на средних глубинах, а также смешения с глубинными североатлантическими водами происходит замыкание нижней (абиссальной) ячейки ГОК. При этом в Атлантике возвратный, направленный на юг поток (зеленые стрелки) является общим для верхней и нижней ячеек. В Тихом и Индийском океанах верхняя и нижняя ячейки ГОК сплетены друг с другом (здесь зелеными стрелками показан направленный на север абиссальный поток и возвратный среднеглубинный). В целом ГОК представ-

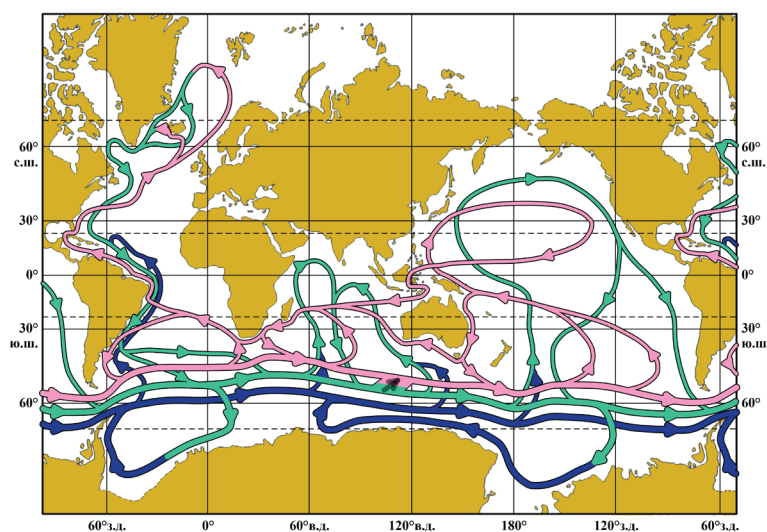


Рис. 5. Схема Глобального океанского конвейера (из работы [1] с изменениями). Синим цветом показана нижняя (абиссальная) ветвь антарктической ячейки ГОК; зеленым – верхняя (она же нижняя ветвь североатлантической ячейки); розовым цветом – термоклинная ветвь североатлантической ячейки ГОК. Подъем воды условно показан в одном месте Антарктики (черная стрелка), хотя на самом деле он происходит по всему антарктическому кольцу.

ляет собой единую (!) сложную ячейку, в рамках которой выделяется один «нагреватель» (низкие широты Мирового океана) и два «холодильника» в Северной Атлантике и Антарктике. Отметим, что идея о том, что ЧДТ зоны Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), вызываемое сильными западными ветрами Южного полушария в отсутствие меридиональных барьеров для ветра, является приводным механизмом верхней ячейки ГОК (соответствующей опусканию в Северной Атлантике) была впервые высказана в работе [22].

Причиной, во многом определяющей именно такую конфигурацию ГОК (см. рис. 5), является асимметрия между Южным и Северным полушариями, заключающаяся в двух обстоятельствах:

1. Площадь Мирового океана в Южном полушарии больше, чем в Северном. Причем свободное от преград кольцо воды приходится как раз на зону наиболее сильных западных штормовых ветров, что максимизирует различия между полушариями. В этой зоне формируется огромный, не имеющий аналога по интенсивности в Северном полушарии, направленный к экватору поток ЧДТ.

2. В Южном полушарии находится самое мощное в Мировом океане Антарктическое циркумполярное течение. Оно опоясывает с запада на восток антарктический континент и связывает Индийский, Тихий и Атлантический океаны в единую систему течений. Кроме того, оно проникает на глубину до 1500–2500 м. Будучи замкнутым течением, оно выступает стеной, препятствующей существованию течений, направленных вдоль меридианов (с севера на юг) в верхнем слое океана. По этой причине

ЧДТ не может быть компенсировано течениями в верхнем слое океана. Вместо этого ЧДТ компенсируется двумя путями:

- течениями на глубинах ниже гребней подводных хребтов, пересекающих АЦТ (рис. 6);
- переносом океанскими вихрями, направленным поперечно к АЦТ по всей толще океана.

Указанный баланс определяет Южный океан как основное место перехода глубинных вод в промежуточный слой (на рис. 5 – черная стрелка), компенсирующего их погружение в Северной Атлантике [1]. При этом восходящий к поверхности в Южном океане поток нижней части глубинных вод (черная стрелка на рис. 5) компенсирует также и погружение вод в абиссаль в Антарктике (переход зеленого потока в синий возле моря Росса и в море Уэдделла) [23].

Хотя в описанной выше схеме ГОК сделан акцент на ветровое воздействие на океан, этот ГОК является элементом Глобальной ветротермохалинной циркуляции океана, то есть такой циркуляции, которая формируется всеми тремя факторами – ветровым, термическим и халинным. Причем каждый из этих факторов является необходимым для формирования ГОК в его нынешнем виде. Поясним это утверждение на примере Северной Атлантики. Западное пограничное течение в этой части океана, Гольфстрим, будучи ветровым течением, доставляет в термоклин в высокие широты относительно теплую соленую воду. Повышенная соленость этой воды обусловлена действием халинного фактора (превышением испарения над осадками) в низких широтах Атлантического океана в Северном полушарии. Этой солености оказывается достаточно, чтобы в результате зимнего охлаждения в высоких широтах Атлантики, то есть действия термического фактора, водные массы погружались в глубину океана.

Для существования ГОК принципиальное значение имеет и конфигурация материков текущей геологической эпохи. В частности, это иллюстрируется так называемым «эффектом перекрытия пролива Дрейка». В случае такого перекрытия разорвется Антарктическое циркумполярное течение, что приведет к формированию в поверхностном слое океана потока на юг, компенсирующего направленный на север в Антарктике поток ЧДТ. Это, в свою очередь, приведет к прекращению среднеглубинного потока из Северного полушария в Южное. В этой ситуации в высоких широтах Северной Атлантики сформируется замкнутая циркуляция, в которой будет отсутствовать вынужденный отток глубинных холодных вод и замещающий его приток теплых [25, 26]. Таким образом, в Европе произойдет резкое похолодание климата. Ясно, что в описанном гипотетическом примере разру-

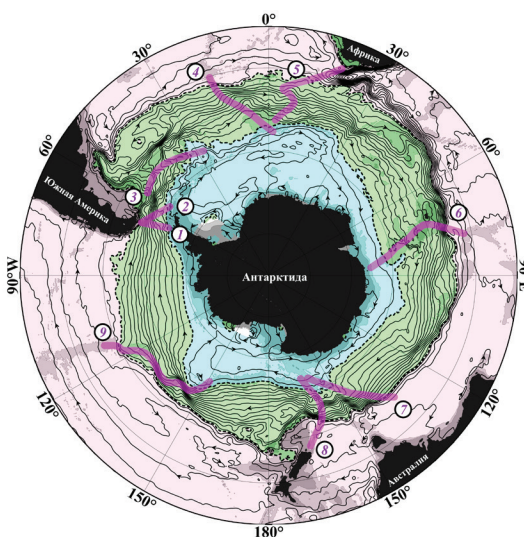


Рис. 6. Средняя абсолютная динамическая топография CNES-CLS09 v.1.1 [24] для Южного океана. Изолинии абсолютной динамической топографии (АДТ) соответствуют линиям тока абсолютных геострофических течений на поверхности океана. Зеленым цветом выделена область замкнутых циркумполярных линий тока, примерно соответствующая зоне АЦТ. Цифрами отмечены основные топографические барьеры на пути АЦТ: 1 – хребет в разломе Хиро и рифт Феникс; 2 – хребет Шеклтона; 3 – хребет Норт-Скотия; 4 – Южно-Атлантический хребет и поднятие Буве; 5 – хребет Агульяс–поднятие Метеор–хребет Шона; 6 – поднятие Кергелен; 7 – Австрало-Антарктический хребет; 8 – горы (хребет) Макуори; 9 – Южно-Тихоокеанское поднятие.

шится вся планетарная система ГОК в ее нынешнем виде.

Литература

1. М.Н. Кошляков, Р.Ю. Тарakanov
Океанология, 2011, 51(5), 773.
2. М.Н. Кошляков М.Н., Р.Ю. Тарakanov
Введение в физическую океанологию, РФ, Москва, МФТИ, 2014, 142 с.
3. W.H. Munk, C. Wunsch
Deep-Sea Res., 1998, 45(12), 1976.
DOI: 10.1016/S0967-0637(98)00070-3.
4. R. Marsh, A.J.G. Nurser, A.P. Megann, A.L. New
J. Phys. Oceanogr., 2000, 30(5), 1013.
DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<1013:WMTITS>2.0.CO;2.
5. A. Ganachaud
J. Geophys. Res., 2003, 108(C7), 3213.
DOI: 10.1029/2002JC001565.
6. W.J. Schmitz, Jr.
On the World Ocean Circulation: Volume II, The Pacific and Indian Oceans. A Global Update, Woods Hole Oceanog. Inst. Tech. Rept., WHOI-96-08, 1996, 237 pp.
7. W.S. Broecker, S.L. Peacock, S. Walker, R. Weiss, E. Fahrbach, M. Schroeder, U. Mikolajevich, E. Heinze, R. Key, T.-H. Peng, S. Rubin
J. Geophys. Res., 1998, 103(C8), 15833. DOI: 10.1029/98JC00248.
8. S. Peacock, M. Visbeck, W.S. Broecker
B Inverse Methods in Global Biogeochemical Cycles, Geophys. Monogr. Ser., 114, Eds P. Kasibhatla, M. Heimann, P. Rayner et al., USA, D.C., Washington, AGU Publ., 2000, pp. 185–195.
DOI: 10.1029/GM114p0185.
9. A.H. Orsi, W.M. Smethie, J.L. Bullister
J. Geophys. Res., 2002, 107(C8). DOI: 10.1029/2001JC000976.
10. T. DeVries, F. Primeau
J. Phys. Oceanogr., 2011, 41(12), 2381.
DOI: 10.1175/JPO-D-10-05011.1.
11. W.S. Broecker
Natural History Mag., 1987, 97, 74.
12. С.С. Ланно
В Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы, РФ, Москва, Моск. отд. Гидрометеоздата, 1984, с. 125–129.
13. H.M. Stommel
Deep-Sea Res., 1957, 4, 149. DOI: 10.1016/0146-6313(56)90048-X.
14. М.Н. Кошляков
Изв. АН СССР, Сер. геогр., 1958, №4, 11.
15. W.J. Schmitz, M.S. McCartney
Rev. Geophys., 1993, 31(1), 29. DOI: 10.1029/92RG02583.
16. J. Marshall, K. Speer
Nature Geosci., 2012, 5, 171–180. DOI: 10.1038/ngeo1391.
17. J.M. Toole
Int. WOCE Newsl., 1997, 28, 25.
18. E. Kunze, E. Firing, J. Hummon, T. Chereskin, A.M. Thurnherr
J. Phys. Oceanogr., 2006, 36(8), 1553. DOI: 10.1175/JPO2926.1.
19. J.R. Ledwell, A.J. Watson, C.S. Law
J. Geophys. Res., 1998, 103, 21499.
DOI: 10.1029/98JC01738.
20. J.R. Ledwell, L.C. St Laurent, J.B. Girton, J.M. Toole
J. Phys. Oceanogr., 2011, 41, 241.
DOI: 10.1175/2010JPO4557.1.
21. V. Gouretski, K.P. Koltermann
WOCE Global Hydrographic Climatology: A Technical Report, Nr. 35/2004, FRG, Hamburg und Rostok, Bundesamt Fur Seeschiffahrt Und Hydrographie, 2004, 52 pp.
(https://rda.ucar.edu/datasets/ds285.4/docs/bsh35_re.pdf).
22. J.R. Toggweiler, B. Samuels
Deep-Sea Res. Pt. I, 1995, 42(4), 477.
DOI: 10.1016/0967-0637(95)00012-U.

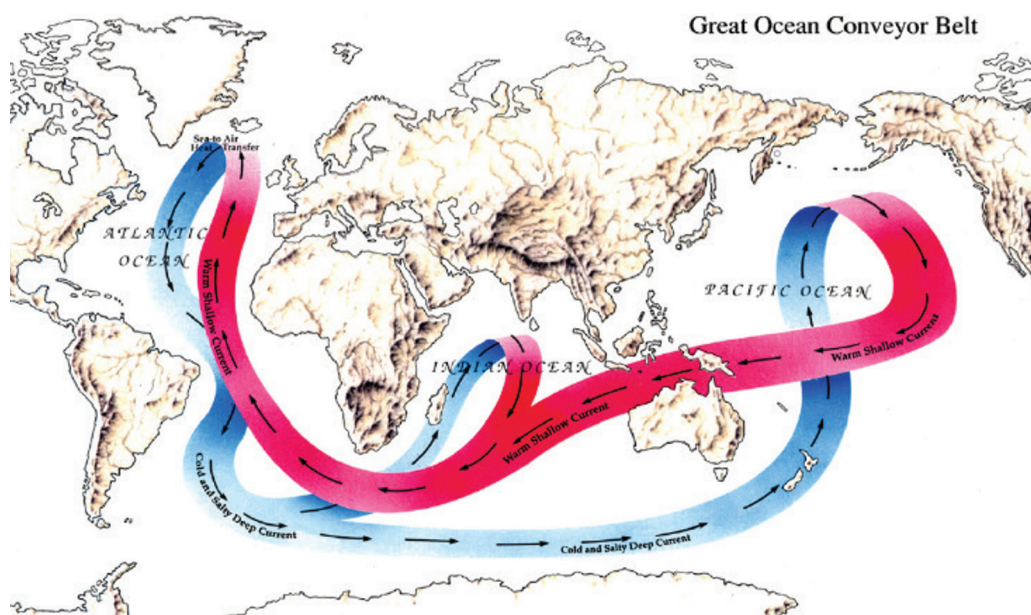
- English |||

Roman Yu. Tarakanov

Abstract

Keywords: Global Ocean Conveyor Belt, Windthermohaline Circulation, Abyss, Thermocline.

Images & Tables



36

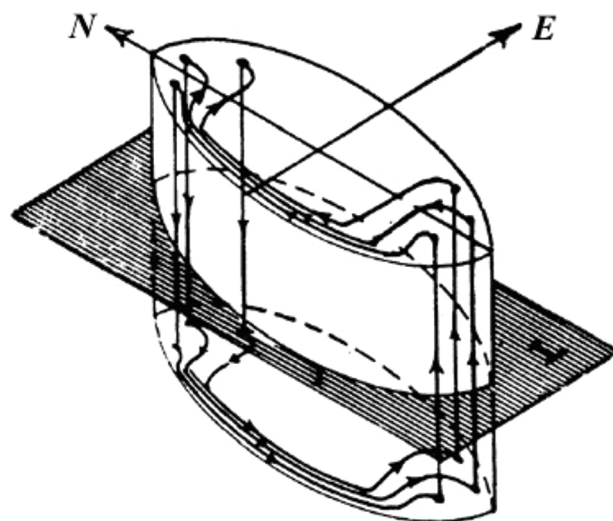


Fig. 2. Scheme of the “internal” circulation of the Atlantic Ocean according to [13].

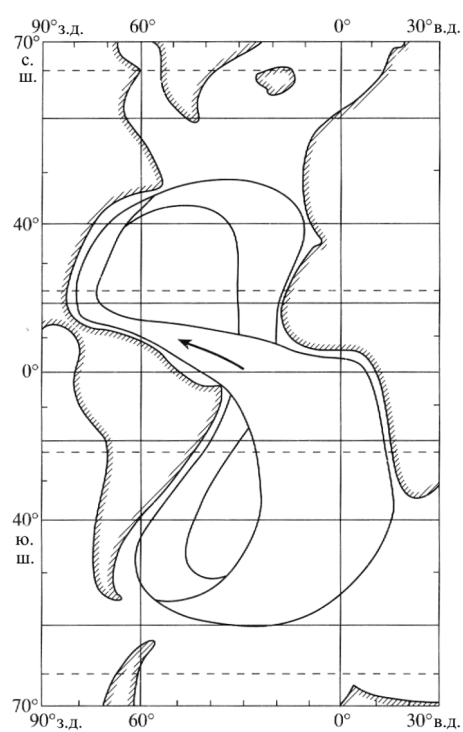


Fig. 3. “The main loop of the Atlantic” – a drawing and a signature to it from [14].

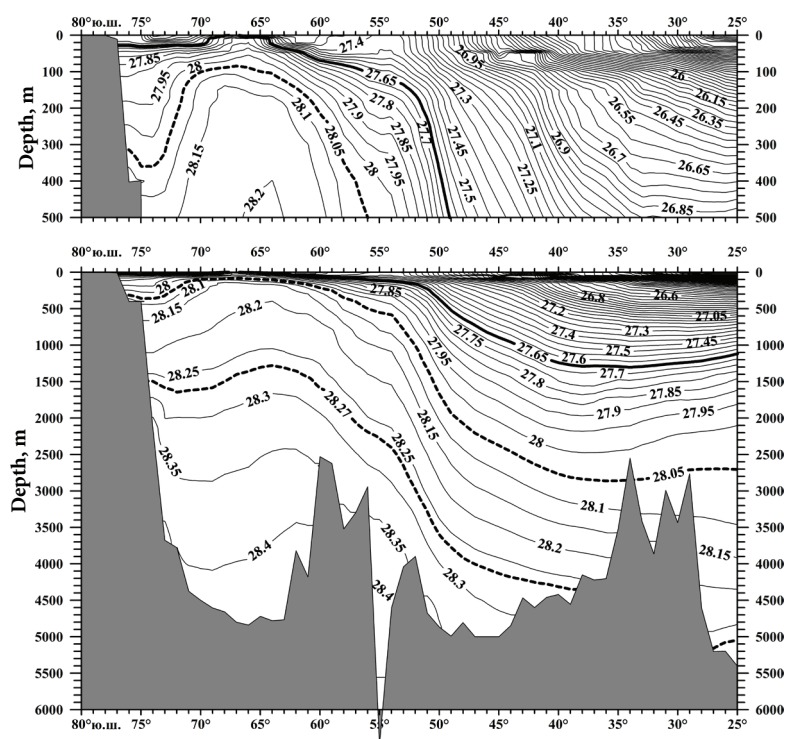


Fig. 4. The average climatic distribution of the neutral density σ_{θ} in the section across the Southern Ocean along the meridian of 30° W according to [21].

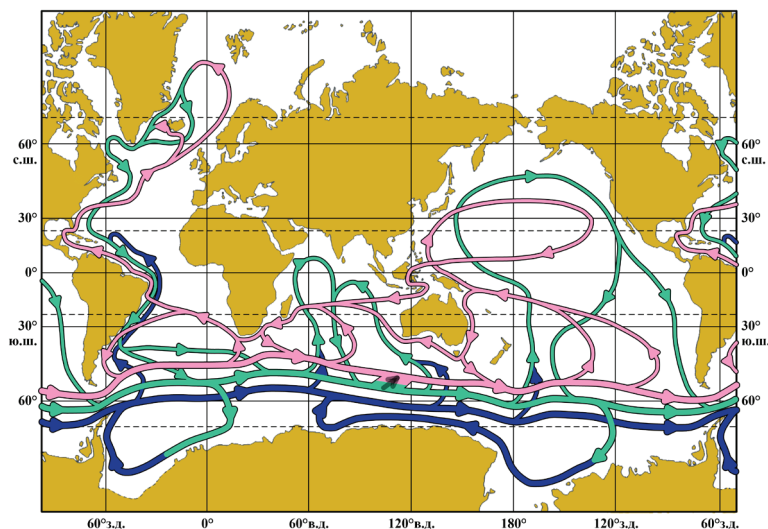


Fig. 5. Scheme of the Global Ocean Conveyor Belt (from [1], with some changes). The lower (abyssal) branch of the Antarctic cell of the GOCB is shown in blue; green is the upper (it is the lower branch of the North Atlantic cell), pink is the thermoclinic branch of the North Atlantic cell of the GOCB. The rise of water is conventionally shown in one place in Antarctica (black arrow), although in fact it occurs throughout the Antarctic circle.

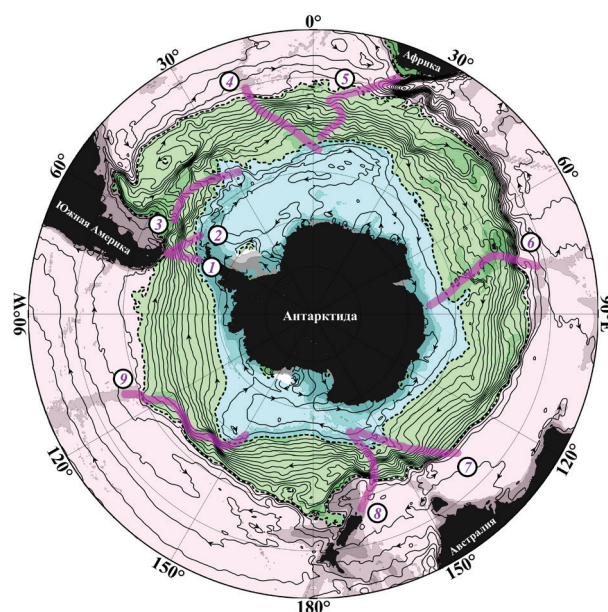


Fig. 6. Mean Absolute Dynamic Topography CNES-CLS09 v.1.1 [24] for the Southern Ocean. Isolines of Absolute Dynamic Topography (ADT) correspond to streamlines of absolute geostrophic currents on the Ocean surface. The area of closed circumpolar streamlines, approximately corresponding to the ACC zone, is highlighted in green. The numbers indicate the main topographic barriers on the way of the ACC: 1 – Ridge in the Hilo Fault and Phoenix Rift; 2 – Shackleton Ridge; 3 – North Scotia Ridge; 4 – South Atlantic Ridge and Bouvet Rise; 5 – Agulhas Ridge – Meteor Rise – Shona Ridge; 6 – Kerguelen Rise; 7 – Australian-Antarctic Ridge; 8 – Macquarie Mountains (Ridge); 9 – South Pacific Rise.

References

1. M.N. Koshlyakov, R.Yu. Tarakanov
Oceanology, 2011, **51**(5), 721. DOI: 10.1134/S0001437011050110.
2. M.N. Koshlyakov, R.Yu. Tarakanov
Vvedenie v fizicheskuyu okeanografiyu [Introduction to Physical Oceanography], RF, Moscow, MIPT, 2014, 142 pp. (in Russian).
3. W.H. Munk, C. Wunsch
Deep-Sea Res., 1998, **45**(12), 1976.
DOI: 10.1016/S0967-0637(98)00070-3.
4. R. Marsh, A.J.G. Nurser, A.P. Megann, A.L. New
J. Phys. Oceanogr., 2000, **30**(5), 1013.
DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<1013:WMTITS>2.0.CO;2.
5. A. Ganachaud
J. Geophys. Res., 2003, **108**(C7), 3213. DOI: 10.1029/2002JC001565.
6. W.J. Schmitz, Jr.
On the World Ocean Circulation: Volume II, The Pacific and Indian Oceans. A Global Update, Woods Hole Oceanog. Inst. Tech. Rept., WHOI-96-08, 1996, 237 pp.
7. W.S. Broecker, S.L. Peacock, S. Walker, R. Weiss, E. Fahrbach, M. Schroeder, U. Mikolajevich, E. Heinze, R. Key, T.-H. Peng, S. Rubin
J. Geophys. Res., 1998, **103**(C8), 15833. DOI: 10.1029/98JC00248.
8. S. Peacock, M. Visbeck, W.S. Broecker
In Inverse Methods in Global Biogeochemical Cycles, *Geophys. Monogr. Ser.*, **114**, Eds P. Kasibhatla, M. Heimann, P. Rayner et al., USA, D.C., Washington, AGU Publ., 2000, pp. 185–195.
DOI: 10.1029/GM114p0185.
9. A.H. Orsi, W.M. Smethie, J.L. Bullister
J. Geophys. Res., 2002, **107**(C8). DOI: 10.1029/2001JC000976.
10. T. DeVries, F. Primeau
J. Phys. Oceanogr., 2011, **41**(12), 2381.
DOI: 10.1175/JPO-D-10-05011.1.
11. W.S. Broecker
Natural History Mag., 1987, **97**, 74.
12. S.S. Lappo
In Issledovanie protsessov vzaimodeystvia okeana i atmosfery [Study of the Processes of Interaction between the Ocean and the Atmosphere], RF, Moscow, Mos. Dep. Gidrometeoizdat, 1984, pp. 25–129 (in Russian).
13. H.M. Stommel
Deep-Sea Res., 1957, **4**, 149. DOI: 10.1016/0146-6313(56)90048-X.
14. M.N. Koshlyakov
Izv. AN USSR, Ser. Geogr., 1958, №4, 11 (in Russian).
15. W.J. Schmitz, M.S. McCartney
Rev. Geophys., 1993, **31**(1), 29. DOI: 10.1029/92RG02583.
16. J. Marshall, K. Speer
Nature Geosci., 2012, **5**, 171–180. DOI: 10.1038/ngeo1391.
17. J.M. Toole
Int. WOCE Newsl., 1997, **28**, 25.
18. E. Kunze, E. Firing, J. Hummon, T. Chereskin, A.M. Thurnherr
J. Phys. Oceanogr., 2006, **36**(8), 1553. DOI: 10.1175/JPO2926.1.
19. J.R. Ledwell, A.J. Watson, C.S. Law
J. Geophys. Res., 1998, **103**, 21499. DOI: 10.1029/98JC01738.
20. J.R. Ledwell, L.C. St Laurent, J.B. Girton, J.M. Toole
J. Phys. Oceanogr., 2011, **41**, 241. DOI: 10.1175/2010JPO4557.1.
21. V. Gouretski, K.P. Koltermann
WOCE Global Hydrographic Climatology: A Technical Report, Nr. 35/2004, FRG, Hamburg und Rostok, Bundesamt Fur Seeschifffahrt Und Hydrographie, 2004, 52 pp. (https://rda.ucar.edu/datasets/ds285.4/docs/bsh35_re.pdf).
22. J.R. Toggweiler, B. Samuels
Deep-Sea Res. Pt. I, 1995, **42**(4), 477.
DOI: 10.1016/0967-0637(95)00012-U.
23. K.G. Speer, S.R. Rintoul, B. Sloyan
J. Phys. Oceanogr., 2000, **30**(12), 3212.
DOI: 10.1175/1520-0485(2000)030<3212:TDDC>2.0.CO;2.
24. M.H. Rio, S. Guinehut, G. Larnicol
J. Geophys. Res., 2011, **116**(C07018). DOI: 10.1029/2010JC006505.
25. W.P. Sijp, M.H. England
J. Phys. Oceanogr., 2004, **34**(5), 1254.
DOI: 10.1175/1520-0485(2004)034<1254:EOTDPT>2.0.CO;2.
26. W.P. Sijp, M.H. England
J. Clim., 2005, **18**(12), 1957. DOI: 10.1175/JCLI3376.1.