

УДК 551.465.4

ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИИ В РЕЖИМЕ СОЛЕВЫХ ПАЛЬЦЕВ НА СТРУКТУРУ ОКЕАНИЧЕСКОГО ТЕРМОХАЛОКЛИНА

© 2019 г. А. И. Перескоков

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации —
Мировой центр данных, Обнинск, Россия
e-mail: peres@meteo.ru*

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

После доработки 04.06.2019 г.

Принята к публикации 18.06.2019 г.

Одной из ключевых проблем физической океанологии является поиск действенных глобальных механизмов, способных обеспечить образование и поддержание океанического термохалоклина, аккумулирующего в средних широтах огромные количества тепла. Проведенное исследование выявило генетическую связь этого элемента макромасштабной стратификации с интенсивностью вертикального перемешивания вод, обусловленного двойной диффузией в форме солевых пальцев. Установлено, что именно в результате более упорядоченной работы в толще вод океана такого мелкомасштабного процесса, как конвекция солевых пальцев, происходит трансформация термохалинной структуры, благодаря которой переход от теплых и соленых поверхностных вод к нижележащим происходит не скачкообразно, а сравнительно постепенно, через стационарный переходный слой — океанический термохалоклин. Полученные результаты подкрепляют нашу точку зрения на конвекцию солевых пальцев как на климатообразующий фактор.

Ключевые слова: океан, стратификация, термохалоклин, пикноклин, диапикническое перемешивание, двойная диффузия, солевые пальцы, плотностное соотношение

DOI: 10.31857/S0030-1574596913-919

Издавна известно, что водная толща океана является макромасштабно-стратифицированной. Г. Эллис, капитан британского невольничьего судна “Earl of Hallifax”, еще на стыке 1750 и 1751 гг. впервые наблюдал низкую температуру подповерхностных вод даже в районе тропиков (к западу от побережья Африки)¹ [15]. Лишь спустя много лет стало понятно, что эти воды формируются под влиянием процессов в субполярных районах. Дальнейшее накопление материалов глубоководных наблюдений в результате целенаправленных исследований вод океанов позволило известному австрийскому океанологу и метеорологу А. Дефанту в 1928 г. [14] предложить, по аналогии с атмосферой, деление толщи океана на “океаническую тропосферу” — верхнюю (теплую, высокосоленую, легкую и сильностратифицированную), сравнительно небольшую по объему часть, и “океаническую стратосферу” — нижнюю (холодную, низкосоленую, тяжелую и слабостратифицированную) глубинную основную часть океана. Такое упрощенное двухслойное макрорасчленение океана предопределяло трактовать активно взаимодейст-

вующую с атмосферой “океаническую тропосферу” как объект, термодинамически изолированный от нижележащей “океанической стратосферы”.

По мере углубления физических представлений о стратификации и структуре вод океана и особенностях его регионального взаимодействия с атмосферой стало выясняться, что даже циркуляция поверхностных вод, формируемая, казалось бы, под непосредственным воздействием ветра, самым тесным образом связана со строением всей водной толщи, включая ее глубинную часть [2]. Поэтому вопросы “каковы основные закономерности структуры вод океанов”; “как формируются и поддерживаются их самые крупные структурные компоненты (водные массы)”; “каковы причины смещения границ между этими компонентами во времени и пространстве”; ну и, конечно, “какие гидрофизические процессы ответственны за формирование упорядоченных элементов вертикальной структуры в толще вод” остаются кардинальными проблемами океанологии. Вопросы макромасштабного структурообразования в последнее время приобрели новую актуальность в связи с обнаружением неожиданно важной роли термохалинной конвекции типа “солевых пальцев” (далее — конвекции

¹ Чем не преминула воспользоваться команда судна в практических целях, снабжая купальню поднятой холодной водой и охлаждая ею вино и питьевую воду.

солевых пальцев), развивающейся в гидростатически устойчивых слоях океана, но с сильным дестабилизирующим влиянием солености, в формировании климата всего Мирового океана.

Необходимая идеология для рассмотрения связи этого мелкомасштабного явления с крупномасштабными подготовлена исследованием К. Н. Федорова эффективности различных механизмов перемешивания в толще вод океана [10]. При этом автор высказал убеждение, что стационарное состояние пикноклина может осуществляться лишь при участии солевых пальцев. В работах [7–9, 11] мы уже продемонстрировали ряд закономерных крупномасштабных последствий диапикнического (вертикального) тепло- и массопереноса солевыми пальцами, возбуждаемого в стратифицированных водах океана двойной диффузией из-за различия (\sim в 100 раз) коэффициентов молекулярной теплопроводности (k_T) и диффузии соли (k_S). Отметим, что подробное описание всего класса явлений, обусловленных двойной диффузией, сравнительно недавно представил Т. Радко [16].

Здесь мы сконцентрируемся на одной из центральных проблем физической океанологии — формировании стационарного термохалинного пограничного слоя в океане или **океанического термохалоклина**. В отличие от вышерасположенного относительно тонкого и более резко выраженного сезонного (верхнего) термоклина, океанический термохалоклин обычно называется как главный (постоянный) пикноклин или главный термоклин, т.к. гидростатическая устойчивость его вод обеспечивается за счет изменения температуры. Океанический термохалоклин — фундаментальное понятие океанологии, строго не определяемое, включает в себя переходный слой с повышенными (по абсолютным значениям) вертикальными градиентами температуры и солености между поверхностными водами, подстилающими верхний термоклин, и нижележащими более холодными и пресными водами.

Интерес исследователей к океаническому термохалоклину всегда был велик и возник в связи с поиском “...некоторого физического процесса...” [17], обладающего достаточной эффективностью для поддержания квазистационарной общей циркуляции океана. Одновременно исследователей интересовала причина, по которой большая часть изменений температуры и солености в океане сосредоточена в этом весьма компактном элементе макромасштабной стратификации.

В последние годы в исследовании природы главного термоклина наметился прогресс в связи с осознанием того факта, что конвекция солевых пальцев

в огромной степени дифференцирует характер вертикального обмена энергией и веществами в толще вод океана. Однако отсутствие и в настоящее время цельного представления о механизмах образования и поддержания главного термоклина, безусловно определяющих его трехмерную топологию, резкие изменения физических свойств и динамических характеристик, воспринимается как ахиллесова пята физической океанологии.

Цель данной работы — поиск на материалах натурных наблюдений убедительных свидетельств макромасштабного структурного эффекта действия в толще океана доминирующего механизма переноса соли и тепла в глубину из слоев с их повышенным содержанием, каковым является конвекция солевых пальцев. Потенциальную возможность такого переноса можно оценить с помощью плотностного соотношения $R_\rho = E_S/E_\theta$, где E_S и E_θ — соответственно солевой и термический компоненты суммарной гидростатической устойчивости в виде квадрата частоты Вайсяля-Брента N^2 . Солевые пальцы могут развиваться в диапазоне значений $-1 < R_\rho < (k_S/k_T) \approx -0.01$. Выражения для расчета компонентов E_S и E_θ могут быть записаны в виде

$$E_S = g^2 \frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial P}, \quad E_\theta = g^2 \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial \theta}{\partial P},$$

где g — ускорение свободного падения, ρ — плотность морской воды *in situ*, S — соленость, T — температура *in situ*, θ — потенциальная температура, P — давление.

Аналогично турбулентному перемешиванию (конвективному и/или ветро-волновому) в верхнем квазиоднородном слое, перемешивание пальцевой конвекцией стремится выровнять физические свойства в толще стратифицированных вод. Результат перераспределения тепла и соли между слоями в субтропических зонах океана, где вследствие положительной разности «испарение — осадки» круглый год формируются условия стратификации, способствующие эффективной работе солевых пальцев ($E_S < 0$, $E_\theta > 0$), очевиден: возникновение крупномасштабных положительных аномалий температуры и солености на подповерхностных и промежуточных горизонтах [8]. Исходя из простого физического факта, что интенсивное перемешивание стратифицированных вод на одних глубинах неизбежно приводит к обострению градиентов на других, здесь — в более нижних слоях, так же как и на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя, логично ожидать проявления конвекции солевых пальцев в виде формирования слоев экстремумов градиентов температуры и солености (экстремумов E_θ и E_S). Так ли обстоит дело в действительности?

В качестве объекта для проверки этой рабочей гипотезы выбрана Северная Атлантика, где тепло- и массоперенос солевыми пальцами наиболее действенен из-за более высокой по сравнению с другими частями Мирового океана солёности вблизи поверхности. Компоненты гидростатической устойчивости вычислялись по предложенной в [11] методике на основе материалов глубоководных наблюдений за температурой и солёностью, собранных во ВНИИГМИ-МЦД и обобщённых в форме наиболее вероятных средних годовых (многолетних) значений на “стандартных горизонтах” для одноградусных трапеций.

Выполненные оценки свидетельствуют в пользу высказанного предположения: макромасштабные экстремумы E_θ и E_S действительно являются неотъемлемыми элементами стратификации полей температуры и солёности, покрывающими большую площадь в пределах субтропической антициклонической системы. Поскольку в подавляющем большинстве анализируемых трапеций климатические положения глубин экстремальных значений E_θ и E_S практически

совпадают², дальнейшее изложение ограничим рассмотрением только термического пограничного слоя или просто пограничного слоя. Из рис. 1, на котором представлена топография (м) термического раздела (или “ядра” термоклина) как поверхности максимальных значений E_θ внутри стационарного термического пограничного слоя Северной Атлантики, отчетливо видно, что наибольшие глубины залегания образуют как бы желоб, продольная ось которого протягивается с юго-запада, от берегов Флориды, на северо-восток, к европейской материковой отмели. Глубина залегания ядра меняется от 700–800 м в западной части Саргассова моря до 300 м и менее в Северо-Восточной Атлантике.

Следует специально отметить, что теория адвективно-диффузионного океанического термоклина довольно интенсивно разрабатывалась

² Эта закономерность частично нарушается на восточной периферии пограничного слоя, что, вероятно, связано с адвекцией теплых и соленых вод средиземноморского происхождения.

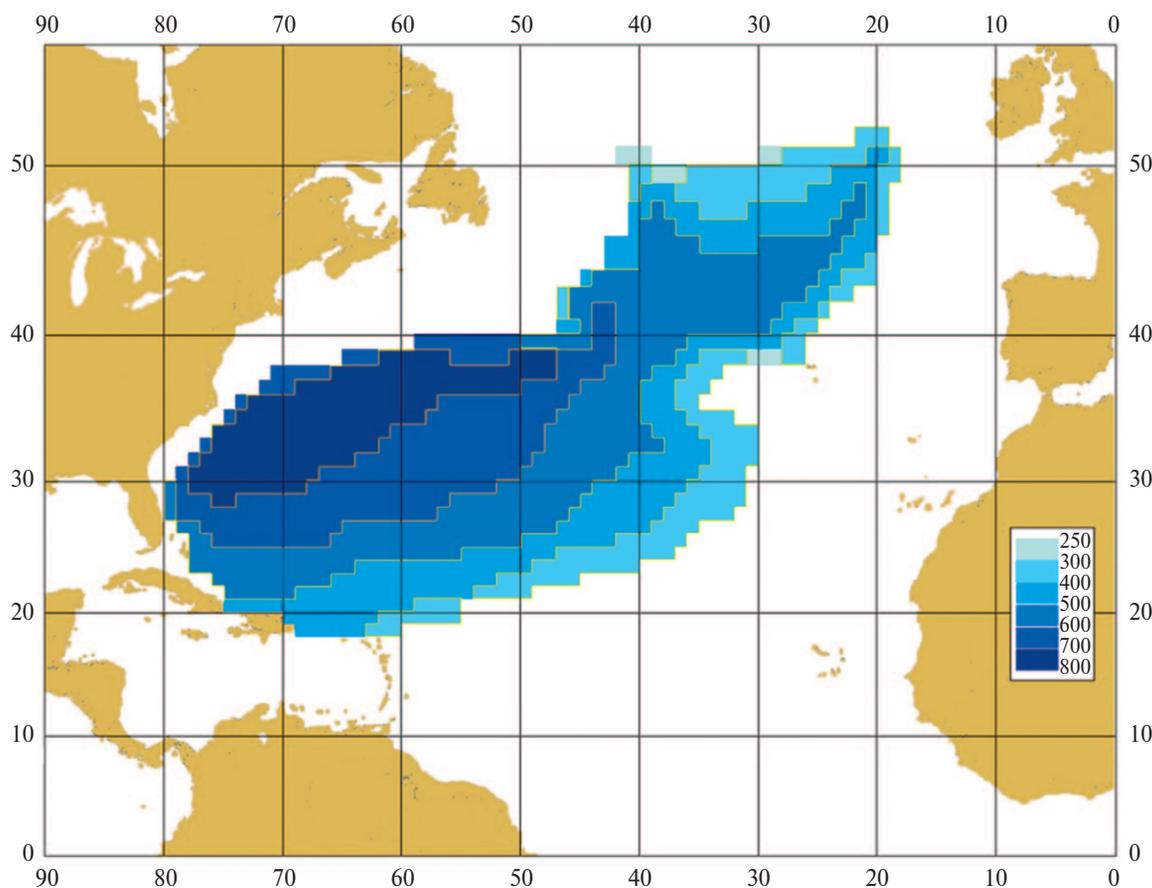


Рис. 1. Топография (м) ядра стационарного термического пограничного слоя в Северной Атлантике (по средним многолетним значениям в одноградусных трапециях).

П. С. Линейкиным и другими с середины 50-х годов прошлого века. Краткий исторический очерк развития идей о главном термоклине, полностью игнорировавших конвективные эффекты двойной диффузии, представлен в [4]. Рассматривая общие закономерности вертикального распределения основных гидрофизических полей в океане, авторы работы [3], в соответствии со сложившимися тогда теоретическими воззрениями, причиной образования слоя максимума гидростатической устойчивости (в виде N) в пределах главного термоклина Северной Атлантики назвали опускание вод вследствие конвергенции экмановских полных потоков в антициклоническом круговороте. Заметим, однако, что такие укоренившиеся фундаментальные концепции, как экмановский поток и конвергенция в толще вод открытого океана, по утверждению К. Вунша [19], “никогда не были подтверждены количественно”. Попутно добавим, что наиболее полно детализация стратификации полей температуры, солёности, плотности, гидростатической устойчивости и других гидрофизических параметров в Северной Атлантике (при осреднении по пятиградусным трапециям) отражена в серии атласов-монографий, подготовленных в Институте океанологии РАН в тесном сотрудничестве с ВНИИГМИ-МЦД (см., например, [1, 5]). Отметим также, что в [5] впервые был представлен набор карт, позволяющий проследить особенности поля плотностного соотношения в стандартных слоях Северной Атлантики.

Априори можно полагать, что различия в положении и толщине пограничного слоя связаны с изменчивостью эффективности работы солевых пальцев. Поэтому для выявления закономерностей его формирования обратимся к анализу величин плотностного соотношения R_ρ . Основным результатом выполненного анализа таков: во всей обширнейшей области простираения выявленных экстремумов E_θ и E_S (между $18-52^\circ$ с. ш. и $18-80^\circ$ з. д.) в Северной Атлантике, при весьма широком диапазоне изменений их значений, плотностное соотношение на уровне раздела сохраняет удивительное постоянство: $R_\rho = \text{const} = -0.52 \pm 0.04$, что говорит о едином механизме формирования ядра термоклина. Поскольку ниже уровня раздела и за пределами его горизонтального распространения величины R_ρ превышают это значение, оно принимает характер критического $R_\rho^{\text{кр}}$. Следовательно, этот строгий количественный критерий дает основание для важного качественного вывода, а именно, что для термохалинных условий Северной Атлантики, вероятно, можно выделить два принципиально

разных режима конвекции солевых пальцев: **интенсивный** с образованием пограничного раздела, когда $R_\rho \leq R_\rho^{\text{кр}}$, и **слабый**, без образования раздела, когда $R_\rho > R_\rho^{\text{кр}}$. Интенсивному режиму, естественно, соответствует ступенчатый профиль термохалоклина с сезонной и постоянной частями. При слабом режиме постоянный термохалоклин с удалением от области распространения экстремальных значений E_θ и E_S вырождается и практически исчезает в субарктической области.

Наш вывод о том, что интенсивная работа солевых пальцев ограничена таким довольно узким диапазоном изменений величин R_ρ , подтверждается многочисленными выводами лабораторных экспериментов, теоретических исследований, а также непосредственными наблюдениями в океане, показавших, что при $R_\rho^* = -R_\rho^{-1} > 2$ конвективные диффузионные потоки резко уменьшаются и начинают преобладать адвективные процессы.

Чтобы более наглядно представить себе, как в толще вод формируется ядро термоклина — безошибочный индикатор работы солевых пальцев, в таблице сопоставлены средние многолетние значения компонентов плотностной стратификации и плотностные соотношения в нескольких одноградусных трапециях Северной Атлантики. Из приведенных данных видно, что глубина залегания раздела с совпадающими противоположными экстремумами E_θ и E_S хорошо согласуется с глубиной, ниже которой, очевидно, по мере усиления противоборствующего диапикническому перемешиванию процесса — изопикнического (вдоль поверхностей $\rho = \text{const}$) перемешивания, начинают складываться менее благоприятные для “пальцевого прессинга” фоновые условия стратификации ($R_\rho > R_\rho^{\text{кр}}$). Поэтому можно с достаточным основанием утверждать, что в ядре термоклина происходит переход от одного типа перемешивания к другому.

Обратим внимание на еще одну интересную особенность профилей R_ρ : наличие промежуточной прослойки, простирающейся вплоть до пограничного раздела, с весьма консервативными величинами $R_\rho(z)$, близкими к $R_\rho^{\text{кр}}$. Существование на вертикальных профилях R_ρ участков, стремящихся к вертикальной однородности (что, естественно, неразрывно связано с наличием на θ, S -кривых участков, стремящихся к прямолинейности), в основном пикноклине для центральной водной массы Северной Атлантики уже рассматривалось в ряде публикаций, например, в [6, 18], и связано с тем, что конвекция солевых пальцев может иметь саморегулирующий характер [18].

Таблица. Средние многолетние значения солевого и термического компонентов гидростатической устойчивости (10^5 с^{-2}) и плотностного соотношения, вычисленные для центров некоторых одноградусных трапеций Северной Атлантики

Слой, м	Координаты центров трапеций								
	36.5° с.ш., 67.5° з.д.			34.5° с.ш., 48.5° з.д.			49.5° с.ш., 30.5° з.д.		
	E_S	E_θ	R_ρ	E_S	E_θ	R_ρ	E_S	E_θ	R_ρ
0–10	0.44	2.08	0.21	0.29	2.98	0.10	0.00	0.43	0.00
10–20	0.94	3.44	0.27	0.22	6.03	0.04	0.30	2.04	0.14
20–30	1.16	6.81	0.17	0.15	10.98	0.01	1.18	3.45	0.34
30–50	1.49	5.70	0.26	0.66	12.33	0.05	0.82	4.40	0.18
50–75	2.50	9.37	0.27	0.44	9.45	0.05	0.59	2.91	0.20
75–100	0.99	8.98	0.11	0.29	6.70	0.04	0.42	2.02	0.21
100–125	0.35	7.05	0.05	-0.15	3.71	-0.04	0.56	1.18	0.48
125–150	0.12	6.20	0.02	-0.29	3.12	-0.09	-0.44	1.51	-0.30
150–200	-0.12	3.90	-0.03	-0.47	1.74	-0.27	-0.46	1.41	-0.32
200–250	-0.12	1.93	-0.06	-0.61	1.55	-0.40	-0.55	1.51	-0.36
250–300	-0.34	1.56	-0.22	-0.83	2.52	-0.33	-1.02	1.86	-0.55
300–400	-0.17	1.08	-0.16	-1.19	2.19	-0.54	-1.07*	2.06*	-0.52
400–500	-0.52	1.04	-0.51	-1.72	3.10	-0.55	-0.87	2.00	-0.44
500–600	-1.12	2.17	-0.51	-1.82*	3.62*	-0.50	-0.39	1.70	-0.23
600–700	-2.10	3.64	-0.58	-1.64	3.56	-0.46	-0.12	1.09	-0.11
700–800	-2.35*	4.36*	-0.54	-1.22	3.22	-0.37	-0.09	0.77	-0.12
800–1000	-1.52	3.79	-0.40	-0.49	1.90	-0.26	-0.07	0.42	-0.16

Примечание. * — Эстремумы компонентов.

Еще одним неоспоримым косвенным свидетельством активности конвекции солевых пальцев в толще стратифицированных вод являются оставляемые ею термохалинные следы в виде тонкой ступенчатой структуры. На рис. 2 представлены примеры вертикальных профилей температуры в верхней части главного термоклина Саргассова моря по данным систематических наблюдений на гидрологической станции “S” (32°10' с.ш., 64°30' з.д.) вблизи Бермудских островов. Данные STD-зондирований с дискретностью по вертикали 2 дбар в зимние месяцы (март–апрель) в период с 2009 по 2016 г. получены с веб-сайта CCHDO (CLIVAR and Carbon Hydrographic Data Office) [12]. Выбор конца зимнего периода обусловлен тем, что ослабление термической стратификации, прослеживаемое до 300 м и глубже, в это время создает условия, особо благоприятные для конвекции солевых пальцев. На основе данных измерений T, S -характеристик были рассчитаны фоновые значения плотностного соотношения через интервалы 25 дбар.

Из рис. 2 очевидно, что главный термоклин Саргассова моря по своей структуре не является монотонно трансформирующимся пограничным слоем. В отличие от “классических” четко очерченных регулярных ступенчатых структур, фиксируемых при низких значениях R_ρ в ограничен-

ных районах океана [16] и связанных с солевыми пальцами, термоклин здесь представляет собою неупорядоченное чередование в пространстве (по глубине) и во времени серий квазиоднородных слоев толщиной 2–12 м с переходными высокоградиентными слоями. Показан только интервал глубин между 250 и 500 дбар, хотя аналогичная многослойная структура с изредко проявляющимися почти однородными слоями толщиной ≈ 2 м прослеживается вплоть до ядра термохалоклина (700–800 дбар). Нельзя не упомянуть, что наличие термохалинных ступенчатых структур с многочисленными сериями ступенек в слое главного термоклина вблизи Бермудских островов было обнаружено сразу же после внедрения в практику океанографических измерений высокочувствительной зондирующей аппаратуры [13].

Первоначально непрерывно стратифицированный термоклин начинает разбиваться на конвективные однородные слои (“ламины”) при переходе плотностного соотношения от значений $R_\rho \approx -0.25$ к более низким значениям. По мере уменьшения плотностного соотношения (до $R_\rho \approx -0.60$) формирование ламин становится более выраженным, а их толщина увеличивается. Такая чувствительность ступенчатой структуры к изменениям R_ρ является одним из признаков того, что ее генерация обусловлена солевыми пальцами. Это

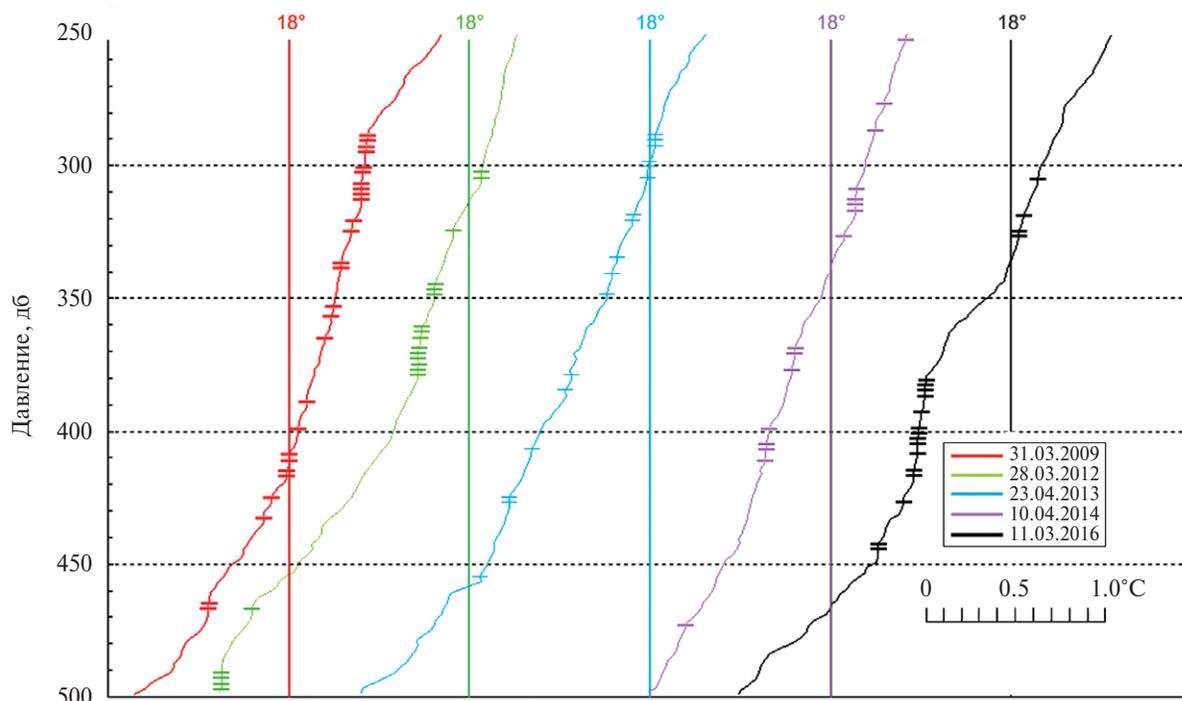


Рис. 2. Примеры вертикальных профилей температуры нерегулярного ступенчатого характера в верхней части главного термоклина вблизи Бермудских островов по данным зондирования на гидрологической станции “S” (32°10' с.ш., 64°30' з.д.).

Шкалы температуры во избежание наложения кривых смещены вправо на 1°С. Короткими горизонтальными линиями выделены изотермические слои (градиенты температуры $<0.002^{\circ}\text{C}/\text{м}$).

подтверждает и анализ вертикальных профилей солёности, поскольку солёность в ламинах более однородна, чем температура, из-за того, что пальцы более эффективно выносят вниз избыток концентрации соли.

Важной особенностью эволюции вертикальной структуры является то, что ламини концентрируются в диапазоне глубин 300–450 дбар, т. е. в самой верхней слабостратифицированной толще вод пикноклина (пикностаде). Этот результат отражает тот физический факт, что чем меньше локальная гидростатическая устойчивость, описываемая $N^2(z)$, тем более эффективным при прочих равных условиях становится функционирование солевых пальцев. Такая более интенсивная перемежающаяся работа солевых пальцев в пикностаде, несомненно, ответственна за формирование на этих глубинах в западных субтропиках областей с повышенной температурой и солёностью [8].

Само существование термоклина в Северной Атлантике неразрывно связано с меридиональной циркуляцией, в верхней ветви которой теплая и солёная вода переносится по направлению к полюсу, а в нижней более холодная и менее солёная, медленно поднимаясь вверх,

возвращается к экватору, тем самым образуя меридиональную ячейку циркуляции. В результате в тропиках и субтропиках температура и солёность совместно убывают с глубиной, что создаёт условия стратификации, благоприятные для действия солевых пальцев. Если запас солёности в поверхностном слое непрерывно пополняется за счёт горизонтальной адвекции, то пальцевая конвекция, расходуя потенциальную энергию, скрытую в неустойчивости солевого компонента, и перенося массу вниз, способна уравновешивать адвекцию массы, поднимающейся снизу. Таким образом, океанический термохалин может сохранять равновесное стационарное состояние именно при наличии конвекции солевых пальцев. Более того, поддерживая ядро более теплых и легких вод на горизонтах, расположенных в основном пикноклине, солевые пальцы могут способствовать интенсификации субтропического антициклонического круговорота [8] и, следовательно, усиливать меридиональную циркуляцию вод Северной Атлантики.

Сказанное позволяет заключить, что результат медленного вертикального тепло- и массопереноса солевыми пальцами (происходящего перманентно) выражается в трансформации

термохалинной структуры толщи вод океана, благодаря которой переход от теплых и высоко-солёных вод верхней сферы к холодным и низ-косолёным водам нижней сферы происходит не скачкообразно, как в верхнем термоклине, а менее резко, через переходный слой — океанический термохалоклин. Учет конвекции в режиме солевых пальцев позволяет с более реалистических позиций подойти к совершенствованию крупномасштабных численных моделей взаимодействия океана и атмосферы.

Благодарности. Автор выражает свою искреннюю признательность А. Г. Зацепину за ряд ценных замечаний и рекомендаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арсеньев В. А., Галеркин Л. И., Кутько В. П. и др.* Поле температуры воды северной части Атлантического океана. М.: Гидрометеоздат, 1984. 225 с.
2. *Ланто С. С.* К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. Сб. статей. М.: Гидрометеоздат, 1984. С. 125-129.
3. *Линейкин П. С., Мадерич В. С.* Теория океанического термоклина. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 272 с.
4. *Мадерич В. С.* Теория термоклина и П. С. Линейкин // Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сб. статей. М.: Триада, 2010. С. 51-70.
5. *Перескоков А. И.* Поле статической устойчивости вод северной части Атлантического океана. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1983. 132 с.
6. *Перескоков А. И.* Особенности температурного и солёностного влияния на плотность воды в Северной Атлантике // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 1983. Вып. 101. С. 40-45.
7. *Перескоков А. И.* О физической природе крупномасштабного антициклонического круговорота в толще вод Норвежского моря // Докл. РАН. 1999. Т. 364. № 4. С. 549-552.
8. *Перескоков А. И., Федоров К. Н.* Дифференциально-диффузионная конвекция в толще вод океана как климатообразующий фактор // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285. № 1. С. 229-232.
9. *Перескоков А. И., Федоров К. Н.* Вентиляция вод термоклина океана конвекцией типа солевых пальцев // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. № 1. С. 192-196.
10. *Федоров К. Н.* Изопикнический эффект локального перемешивания в океанском пикноклине // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 5. С. 1230-1234.
11. *Федоров К. Н., Перескоков А. И.* Типизация термохалинных условий стратификации в Мировом океане // Метеорология и гидрология. 1986. № 12. С. 71-77.
12. CLIVAR and Carbon Hydrographic Data Office. URL: <https://cchdo.ucsd.edu/>.
13. *Cooper J. W., Stommel H.* Regularly spaced steps in the main thermocline near Bermuda // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. № 18. P. 5849-5854.
14. *Defant A.* Die systematische Erforschung des Weltmeeres // Zeitsch. der Gesellsch. Erdkunde. Berlin: Sonderband, 1928. P. 499-505.
15. *Ellis H.* A Letter to the Rev. Dr. Hales, F.R. S. from Captain Henry Ellis, F. R. S. // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1752. V. 47. P. 211-214.
16. *Radko T.* Double-diffusive convection. Cambridge University Press, 2013. 342 p.
17. *Robinson A. R., Stommel H.* The oceanic thermocline and the associated thermohaline circulation // Tellus. 1959. V. 11. P. 295-308.
18. *Schmitt R. W.* Form of the temperature-salinity relationship in the Central Water: evidence for double-diffusive mixing // J. Phys. Oceanogr. 1981. V. 11. № 7. P. 1015-1026.
19. *Wunsch C.* The ocean circulation in climate / Ed. Houghton J. T. The global climate. Cambridge University Press, 1984. P. 189-203.

IMPACT OF SALT FINGER CONVECTION ON THE STRUCTURE OF OCEANIC THERMOHALOCLINE

© 2019 A. I. Pereskokov

All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information —
World Data Center, Obninsk, Russia
e-mail: peres@meteo.ru

Received June 4, 2019

Revised version received June 4, 2019

After revision June 18, 2019

One of the key problems of physical oceanology is to find the efficient global mechanisms able to ensure formation and maintaining of the oceanic thermohalocline accumulating in mid latitudes a huge amount of heat. The conducted research has found a genetic link of this element of macroscale stratification with the intensity of vertical mixing of water due to double-diffusive in form of salt finger convection. Consequently the structural transformation happens as a result of more structured work in the ocean water column of such small-scale process as salt finger convection. Due to this the transition from warm and salt surface waters to deeper ocean layers occurs not very rapidly but comparatively gradually through the fixed transition layer — oceanic thermohalocline. The obtained results support our view considering salt finger convection as a climate forming factor.

Keywords: ocean, stratification, thermohalocline, pycnocline, diapycnic mixing, double diffusion, salt fingers, density ratio