

На правах рукописи

Кириллов Сергей Александрович

ТЕРМОХАЛИННЫЕ ИНТРУЗИИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ
МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И ИХ ВКЛАД В ПРОЦЕССЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО
ТЕПЛО- И СОЛЕОБМЕНА

25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт – Петербург
2007

Работа выполнена в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук, профессор

Леонид Александрович Тимохов

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор

Лев Николаевич Карлин

Доктор физико-математических наук

Александр Петрович Макштас

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Защита состоится « ____ » _____ 2007 г. в 13 часов на заседании Диссертационного совета Д.327.002.01 при Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте по адресу: 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Арктического и антарктического научно-исследовательского института.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Радионов В.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Интрузионное расслоение является важной особенностью термохалинной структуры вод Арктического бассейна (АБ). К.Н.Федоров справедливо отмечал, что «формирование и растекание интрузионных элементов тонкой термохалинной структуры...» является одним из основных механизмов, ответственных за трансфронтальное перемешивание и перенос тепла и соли через фронтальные разделы на границах водных масс с различными термохалинными характеристиками. Несмотря на многочисленные попытки математически описать процесс интрузионного расслоения при помощи теории неустойчивости, предложенной еще в 1967 г. Штерном, и определить степень влияния термохалинных интрузий на эволюцию водных масс, вопрос о вкладе интрузий в процессы фронтального обмена до сих пор остается открытым. В первую очередь это связано с отсутствием необходимых пространственных данных натурных измерений, и попытками представить обменные процессы на вертикальных границах интрузий в упрощенном виде. Вопросы формирования и разрушения интрузий в Северном Ледовитом океане и изучение влияния интрузионных структур на тепло- и солеобмен в океане представляют собой актуальную проблему, решение которой имеет большое значение для более полного понимания происходящих в океане изменений и развития моделей циркуляции океана.

Самым значительным источником тепла для Арктического бассейна являются атлантические воды (АВ), поступающие в АБ из Северной Атлантики через пролив Фрама и в виде сильно трансформированной Баренцевоморской ветви в северной части Карского моря. По мере распространения в арктических морях и Арктическом бассейне, АВ постепенно теряют тепло и содержание соли, оказывая значительное влияние на климат Арктики. При этом до настоящего времени вопрос о механизмах, отвечающих за перенос тепла и соли из АВ, остается открытым, а с точки зрения интрузионного обмена практически неосвещенным современной литературой. Существование ледяного покрова и сравнительно небольшая глубина осенне-зимней конвекции создают условия, когда потеря тепла и соли АВ в Арктике может

осуществляться только за счет внутренних факторов. К числу последних можно отнести процессы дифференциальной (или двойной) диффузии, которые приводят к различной интенсивности вертикального переноса тепла и соли и способствуют возникновению неоднородностей в поле плотности. Это приводит к появлению горизонтальных градиентов давления, которые, в свою очередь, становятся движущей силой интрузионных процессов. Характерной чертой таких процессов является то, что они протекают за счет высвобождения доступной потенциальной энергии столба жидкости без дополнительного источника энергии. В этой связи развитие методов параметризации потоков тепла и соли при интрузионном расслоении и получение оценок потерь тепла АВ являются актуальными задачами для объяснения и моделирования климата Арктики.

В процессе работы над диссертационным исследованием мы следовали концепции объединения лабораторных и теоретических исследований термохалинных интрузий и данных наблюдений этого феномена в Арктическом бассейне. При этом был выполнен анализ систематических STD-измерений (conductivity-temperature-depth), а также уникальных записей профилей температуры, солености и скоростей течений, полученных на притопленных буйковых станциях нового поколения в северной части моря Лаптевых. Это позволило улучшить наши представления об особенностях формирования и развития термохалинных интрузий и определить вклад интрузионных структур в процессы тепло- и солеобмена. Поэтому исследования по данной тематике представляются оправданными и актуальными.

Цель диссертационной работы

Исследовать основные характеристики интрузионных термохалинных структур в северной части моря Лаптевых и определить интенсивность вертикального и горизонтального тепло- и солеобмена через интрузии.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

- 1) Определение пространственно-временных характеристик интрузионных образований и выполнение классификации интрузий.
- 2) Исследование механизмов поддержания и разрушения интрузий.

- 3) Анализ существующих параметризаций интенсивности обмена в режимах дифференциально-диффузионной неустойчивости жидкости и развитие схем их параметризации.
- 4) Исследование кроссфронтального переноса тепла и соли интрузиями.
- 5) Расчет суммарных потоков тепла и соли в условиях интрузионного расслоения в районе исследования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Систематизация интрузий в северной части моря Лаптевых.
2. Закономерности изменений термохалинных и динамических характеристик в интрузионных образованиях.
3. Квазистационарность термохалинных интрузий на основании трехлетних измерений в глубоководной части моря Лаптевых.
4. Соотношение, связывающее величину коэффициента фонового вертикального обмена теплом и солью с величиной вертикального и горизонтального (кроссфронтально вдоль интрузии) плотностного соотношения для условий стационарного интрузионного процесса.
5. Оценки интенсивности каскадного переноса тепла через высокоградиентные прослойки интрузий на верхней границе атлантических вод в условиях неизопикничности интрузионного процесса.
6. Оценки теплоотдачи на боковой границе струи атлантических вод при наличии стационарных интрузий.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые выполнена систематизация интрузий в северной части моря Лаптевых.
2. Впервые подробно изучена изменчивость термохалинных и динамических характеристик интрузионных образований.
3. Установлена квазистационарность термохалинных интрузий на основании трехлетней серии измерений.
4. Впервые получены оценки потоков тепла и соли в интрузиях и соотношение потоков на боковой границе струи атлантических вод и непосредственно на ее верхней границе.

Практическая значимость работы

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с плановой тематикой ААНИИ (в рамках тем Российского Фонда Фундаментальных исследований и подпрограммы ФЦП «Исследование природы Мирового океана») и в рамках международного научно-технического сотрудничества по российско-американскому проекту АВЛАП. Полученные результаты могут быть использованы для оценок интенсивности процессов обмена на вертикальных и боковых границах промежуточной водной массы атлантического происхождения в Арктическом бассейне. Предложенный метод оценивания интенсивности вертикального турбулентного обмена, в основе которого лежит предположение о стационарности тонкой вертикальной структуры в районе исследования, позволяет получать оценки коэффициентов обмена для решения практических задач. В частности, интенсивность вертикального и горизонтального обмена теплом и солью могут быть включены в соответствующие блоки гидродинамических моделей в виде соотношений, предложенных в работе. Это позволит улучшить параметризацию механизмов обмена в существующих моделях и тем самым повысить их прогностическую ценность.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы докладывались на итоговой сессии Ученого совета ААНИИ (2002), на семинарах лаборатории гидрологического режима Северного Ледовитого океана отдела океанологии ААНИИ (2004) и Международного Арктического Научного Центра (IARC, Фэрбанкс, 2005), а также на конференции Международной Ассоциации Морских Физических Наук (IAPSO) по вопросам перемешивания в океане (Виктория, 2004) и на 13-ой конференции Американского Геофизического Общества, посвященной исследованию океана (Гонолулу, 2006). Часть результатов получена в рамках работы над проектом «Термический режим придонного слоя моря Лаптевых и эволюция подводной вечной мерзлоты», выполняемого по гранту Российско-германской лаборатории Морских и полярных исследований им.О.Ю.Шмидта. Работа над темой диссертации была также поддержана грантом Всемирного Офиса Морских Исследований (award № 00014-05-1-4021 of Office of Naval Research Global) в 2005 г. Некоторые полученные в

ходе работы над диссертацией результаты опубликованы в ряде статей и тезисов.

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, включая тезисы докладов на международных конференциях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Общий объем работы составляет 207 страниц, включая 87 рисунков и 9 таблиц. Список литературы составляет 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении сформулированы проблема, ее актуальность, цель и задачи работы, защищаемые положения, практическое значение и апробация.

Глава 1. Интрузионное расслоение Арктического бассейна

В *первом параграфе* приводится краткое физико-географическое описание района исследований, в том числе особенности вертикальной термохалинной структуры вод Арктического бассейна в исследуемом районе. Рассмотрена определяющая роль атлантических вод в тепловом балансе Северного Ледовитого океана. Приводятся оценки различных авторов об интенсивности теплоотдачи на верхней границе атлантических вод.

Во *втором параграфе* дается обзор факторов, которые являются причиной интрузионного расслоения в областях фронтальных разделов и показано, что механизм дифференциально-диффузионной (ДД) неустойчивости является основной движущей силой термохалинных интрузий за счет высвобождения доступной потенциальной энергии, запасенной в дестабилизирующем вертикальном распределении одной из компонент жидкости. Приведены факты, подтверждающие широкую распространенность термохалинных интрузий в Северном Ледовитом океане, а также основные предположения о местах их начального формирования и развития.

Глава 2. Пространственно-временная изменчивость термохалинных интрузий северной части моря Лаптевых

В первом параграфе второй главы дается подробное описание океанографических данных, используемых при выполнении работы. К ним относятся данные STD-зондирований и ежедневных наблюдений за температурой, соленостью и скоростями течений, полученных при помощи профилемера на трех притопленных буйковых станциях (ПБС) в северной части моря Лаптевых в 2002-2005 гг. Выполнен анализ гидрологических условий, на фоне которых происходят процессы интрузионного расслоения на боковых границах ядра АВ.

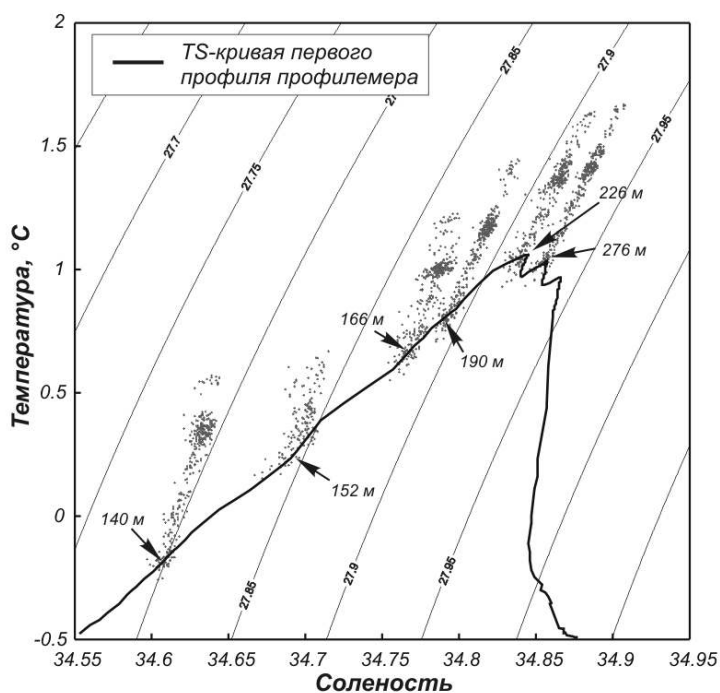


Рис. 1. Эволюция температуры и солености внутри теплых соленых интрузий в течение года.

Второй параграф посвящен поиску и выделению идентичных интрузий на близлежащих океанографических станциях, а также описанию нового метода исследования пространственной трехмерной структуры термохалинных интрузий, основанного на триангулировании исходной сети океанографических станций. Применение метода триангуляции позволяет определить пространственную изменчивость основных характеристик интрузионных образований в районе исследования, к числу которых можно отнести значения

плотностного соотношения вдоль интрузий, значения вертикального плотностного соотношения на вертикальных границах интрузий, глубины и толщины интрузий и углы наклона последних к горизонтальной плоскости и др. Показано, что пространственная когерентность интрузионных структур уменьшается по мере удаления от основной струи АВ и при приближении к материковому склону, где когерентность полностью исчезает.

В третьем параграфе исследуется временная изменчивость характеристик термохалинных интрузий по результатам годовой записи ежедневных профилей температуры и солености полученным

профилемером на ПБС. Совместный анализ интрузионных структур, выделенных по STD-зондированиям и при помощи профилемера, показал, что интрузии являются квазистационарными объектами и располагаются на изопикнических поверхностях, которые остаются практически неизменными в течение всего трехлетнего периода наблюдений (рис.1).

В *четвертом параграфе* выполнен анализ тонкоструктурных вертикальных неоднородностей, который позволил выделить два слоя, в каждом из которых тонкоструктурные вариации являются следствием либо преимущественно процессов изопикнической адвекции (нижняя часть ядра АВ), либо следствием процессов вертикального обмена (верхняя и центральная часть ядра).

Глава 3. Механизмы поддержания и разрушения интрузий в северной части моря Лаптевых

В *первом параграфе* дается описание трехмерной структуры термохалинных интрузий из которой следует, что термохалинные интрузии, распространяясь от ядра АВ в сторону материкового склона и открытой части бассейна, поднимаются относительно горизонтальной поверхности, как правило, с увеличением плотности внутри интрузии (рис.2).

Во *втором параграфе* исследуется процесс разрушения тонкой структуры интрузионного происхождения под действием мезомасштабных внутритермоклинных вихрей. Показано, что только в центральной части наиболее интенсивного из наблюдаемых вихрей (со значениями орбитальных скоростей достигающими 25 см/с), происходит частичное или полное разрушение инверсионных вертикальных термохалинных структур и вырождение последних в строгую ступенчатую. Эти случаи сопровождаются появлением в вертикальных профилях плотности хорошо выраженных инверсий с отрицательными значениями устойчивости при значениях средней плотности кинетической энергии на уровне 8.5 Дж/м^3 в области ядра АВ.

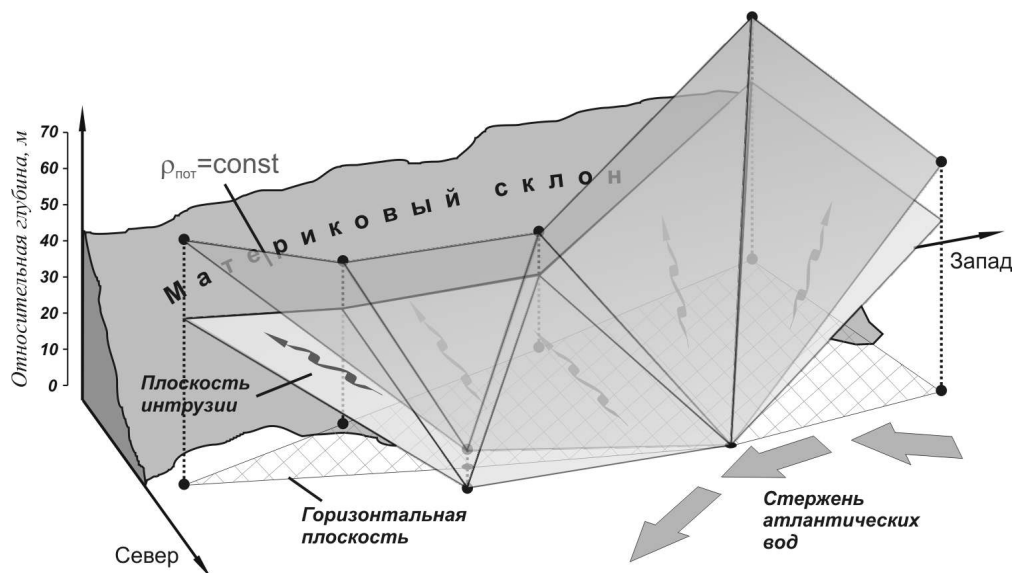


Рис.2.Трехмерная структура отдельной теплой соленой интрузии, распространяющейся из области основной струи АВ в сторону материкового шельфа на глубине 300-320 м (СТД съемка 2002 г.)

Изопикническое осреднение информации, полученной на ПБС, показало, что области с наименьшими значениями чисел Ричардсона (как критерия зон наиболее вероятного формирования мелкомасштабной турбулентности) приурочены к верхней высокоградиентной границе теплых соленых интрузий. Характерное бимодальное распределение модуля мелкомасштабной составляющей горизонтальной скорости, подтверждает результаты лабораторных экспериментов по исследованию тонкой динамической структуры. Значения интрузионных составляющих скорости составляет от 3 до 6 мм/с (рис.3).

В *третьем параграфе* обсуждается вклад процессов дифференциально-диффузионного обмена в формирование горизонтальной изменчивости характеристик термохалинных интрузий с точки зрения существующих представлений. Показано, что существует несоответствие между наблюдаемыми пространственными вариациями характеристик и теоретическими представлениями, что объясняется достаточно грубым представлением процессов вертикального обмена на границах интрузий и связанного с ним результирующего потока плавучести в ряде исследований. Указана необходимость использования более сложной формы аппроксимации вертикальных обменных процессов для объяснения стационарности наблюдаемых интрузионных структур.

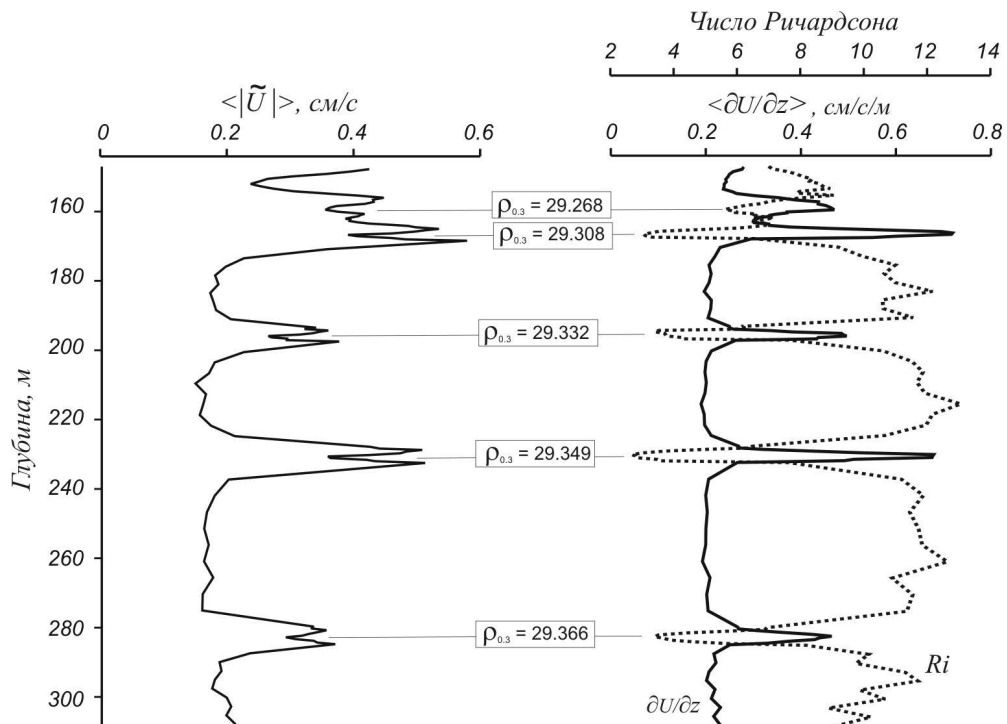


Рис. 3. Профили средних значений модуля аномалии скорости течения, среднего значения модуля сдвига скорости и чисел Ричардсона, изопикнически осредненных за годовой период измерений на ПБС

Глава 4. Влияние интрузионных структур на особенности тепло- и солеобмена атлантических вод в северной части моря Лаптевых

В четвертой заключительной главе диссертационной работы, анализируются результаты расчетов интенсивности переноса тепла и соли на вертикальных границах термохалинных интрузий

В *первом параграфе* обсуждаются основные особенности параметризаций обменных процессов в режиме дифференциально-диффузионной неустойчивости и их зависимость от величины вертикального плотностного соотношения.

Второй параграф посвящен анализу особенностей режимов дифференциально-диффузионной неустойчивости в северной части моря Лаптевых в области ядра АВ и на их верхней границе. Получены распределения повторяемости различных значений вертикального плотностного соотношения на вертикальных границах выделенных интрузий за годовой период наблюдений и показано, что режим послойной конвекции является доминирующим типом стратификации на верхней границе атлантических вод как в области высокоградиентных прослоек, так и в слоях.

В *третьем параграфе* рассматриваются два подхода к исследованию наблюдаемого устойчивого состояния термохалинных интрузий в северной части моря Лаптевых: изопикничный и диапикничный.

Для рассмотрения изопикнического сценария устойчивого состояния интрузий применен метод разделения потоков на вертикальных границах интрузий, связанных с существованием механизма дифференциально-диффузионной неустойчивости с одной стороны и фоновой турбулентностью, возникающей за счет действия других факторов. Получен вид эмпирической зависимости интенсивности фоновой турбулентности от значений потоков массы в режиме дифференциально-диффузионной неустойчивости на вертикальных границах интрузий в виде:

$$K^t = - \frac{\left(K_{\rho}^{dd} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)_1 - \left(K_{\rho}^{dd} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)_2}{\left(\frac{\partial \rho}{\partial z_1} - \frac{\partial \rho}{\partial z_2} \right)} \quad (1)$$

где: индекс 1 и 2 относятся к верхней и нижней границе теплой соленой интрузии соответственно; K_{ρ}^{dd} - коэффициент вертикального обмена массой в режиме послойной конвекции или солевых пальцев; $\partial \rho / \partial z$ - вертикальный градиент потенциальной плотности на границах интрузии.

Учитывая, что основной перенос происходит в области высокоградиентной прослойки интрузии, уравнение (1) может быть преобразовано к зависимости от интенсивности обмена теплом или солью в дифференциально-диффузионном режиме в прослойке в виде:

$$K^t = -K_T^{dd} \cdot \left(\frac{R_F + 1}{R_F} \cdot \frac{R_{\rho}}{R_{\rho} + 1} \right) \quad (2)$$

или

$$K^t = -K_S^{dd} \cdot \left(\frac{R_F + 1}{R_{\rho} + 1} \right) \quad (3)$$

где: R_F - вертикальное потоковое соотношение; R_{ρ} - вертикальное плотностное соотношение.

В качестве исходных параметризаций для K^{dd} в уравнениях (1-3) были использованы параметризация Шмидта (1981, 1988) для режима солевых пальцев и параметризации Федорова (1986) и Келли (1984, 1990) для режима послойной конвекции. Для оценки интенсивности передачи тепла и соли в режиме изопикнического расслоения были использованы результаты ежесуточных наблюдений на ПБС. Было определено, что параметризация Федорова дает в 2-3 раза более высокие потоки тепла и соли, чем параметризация послойной конвекции, предложенная Келли. Сравнение результирующих потоков с оценками, полученными из анализа характерных масштабов горизонтальной изменчивости температуры внутри отдельных интрузий и характерной скорости интрузионных движений, показало, что параметризация Федорова имеет тенденцию переоценивать вертикальные потоки, как тепла, так и соли внутри интрузий.

Анализ устойчивого состояния интрузионных структур по сценарию диапикнического расслоения выполнялся с привлечением пространственных данных STD зондирований. По аналогии с изопикническим сценарием была получена зависимость интенсивности фоновой турбулентности от значения плотностного соотношения вдоль интрузии в кроссфронтальном направлении и суммарных дифференциально-диффузионных потоков тепла и соли на вертикальных границах интрузии:

$$K^t = \frac{\Delta_S \cdot R_l \frac{\beta}{\alpha} - \Delta_T}{\left(\frac{\partial T}{\partial z_1} - \frac{\partial T}{\partial z_2}\right) - \left(\frac{\partial S}{\partial z_1} - \frac{\partial S}{\partial z_2}\right) \cdot R_l \frac{\beta}{\alpha}} \quad (4)$$

где $\Delta_S = \left(K_S^{DD} \frac{\partial S}{\partial z}\right)_1 - \left(K_S^{DD} \frac{\partial S}{\partial z}\right)_2$ $\Delta_T = \left(K_T^{DD} \frac{\partial T}{\partial z}\right)_1 - \left(K_T^{DD} \frac{\partial T}{\partial z}\right)_2$

результирующие потоки тепла и внутри отдельной интрузии за счет механизмов дифференциальной диффузии, $R_l = \frac{\alpha \frac{\partial T}{\partial l}}{\beta \frac{\partial S}{\partial l}}$ - величина

горизонтального плотностного соотношении вдоль интрузии в кроссфронтальном направлении.

Принимая во внимание, что основной перенос тепла и соли происходит через высокоградиентную прослойку интрузии, уравнение (4) преобразуется к виду:

$$K^t = -K_T^{dd} \cdot R_\rho \frac{1 - R_l / R_F}{R_l - R_\rho} \quad (5)$$

или

$$K^t = -K_S^{dd} \cdot \left(\frac{R_F - R_l}{R_l - R_\rho} \right) \quad (6)$$

На рис.4 представлены результаты вычисленной интенсивности вертикального переноса тепла на границах интрузионных образований в зависимости от задаваемых значений плотностного соотношения вдоль интрузий.

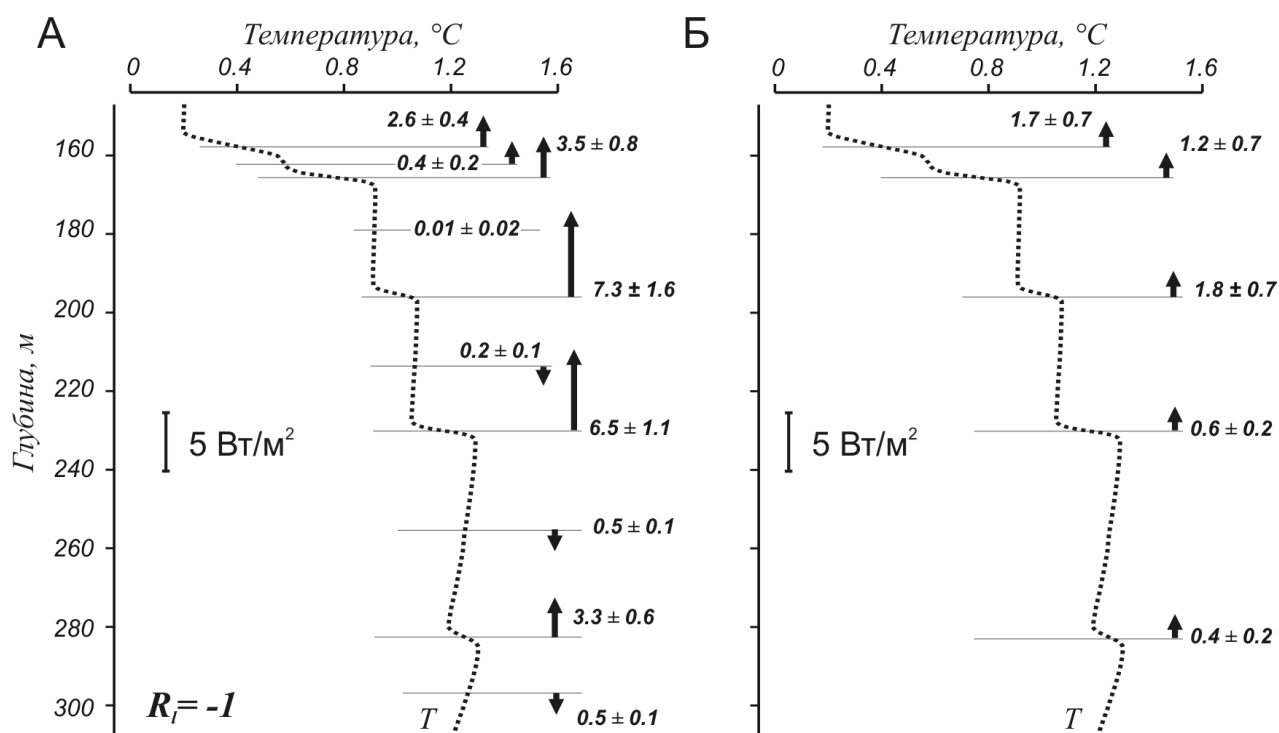


Рис. 4. Осредненные за год вертикальные потоки тепла на границах интрузий на ПБС при $R_l = -1$ (а), а также при использовании реальных значений R_l по данным STD-съемок (б)

В случае применения изопикнического сценария интрузионного расслоения (рис.4а), результирующие потоки тепла через высокоградиентные прослойки оказываются выше, чем при рассмотрении диапикнического сценария развития интрузионного процесса. Так, применение реально измеряемых значений вдоль интрузионного плотностного соотношения по результатам STD-съемок в 2002-2004 гг. показало, что учет неизопикничности интрузионного процесса уменьшает величину потоков в среднем на 30-40% на верхней границе ядра АВ и на 80-90% в центральной части ядра (рис.4б).

В *четвертом параграфе* главы обсуждаются вопросы, связанные с верификацией значений фонового вертикального турбулентного обмена теплом и солью. При этом определено, что интенсивность вертикального турбулентного обмена за счет неустойчивости свободных внутренних волн существенно меньше необходимой для поддержания устойчивого состояния термохалинных интрузий (в рамках существующих представлений об интенсивности вертикального обмена в режиме послойной конвекции).

Получены доказательства сопряженности тонкой термохалинной и динамической структуры в интрузионных слоях. Показано соответствие между скоростями диссипации энергии турбулентности, оцененными из уравнения баланса энергии развитой турбулентности, и полученной через характерные значения вертикальных сдвигов скоростей течения в области высокоградиентной прослойки интрузии.

Выполнено сравнение измеренных и рассчитанных скоростей внутри теплых соленых интрузий. При этом установлено, что максимальное соответствие достигается при задании значений горизонтального градиента температуры поперек фронтальной зоны в 1.5° - $2.0^{\circ}/100$ км. Такой перепад температур примерно соответствует разнице между температурой ядра АВ в районе северной Шпицбергена - Земли Франца Иосифа и температурой на периферии струи АВ в северной части моря Лаптевых. Это обстоятельство свидетельствует о том, что по мере своего развития на границе фронтального раздела, термохалинные интрузии переносятся вместе с основной струей АВ вдоль материкового склона от пролива Фрама в восточную часть бассейнов Нансена и Амундсена.

В связи с тем, что интрузии являются процессом подсеточного масштаба для существующих гидродинамических моделей океана, в заключении параграфа отдельно рассмотрен эффект горизонтального

обмена, который осуществляется направленным переносом тепла и соли в интрузионных прослойках поперек линии фронта. Использование модели Джойса (1977), которая описывает связь между коэффициентом крупномасштабного горизонтального обмена и параметры мезомасштабных стационарных интрузионных структур в виде:

$$\overline{K}_T^H = \frac{\overline{K_T^V \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial z} \right)^2}}{\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right)^2} \quad (7)$$

позволило получить характерное значение коэффициента горизонтального обмена в 420 м²/с. Применение полученных характерных оценок вертикального и горизонтального обмена в интрузиях позволило оценить их вклад в общую отдачу тепла от слоя АВ в окружающее пространство. Было определено, что потери тепла на боковых границах АВ оказывается более чем на порядок выше, потерь тепла в области верхнего термоклина. При этом отмечается, что в конечном счете все тепло, участвующее в горизонтальном обмене, в конечном итоге передается в вышележащие слои воды, например, при выходе интрузий в район материкового склона и последующего их разрушения за счет динамических факторов.

Основные выводы исследования

1. На основании регулярных STD наблюдений и ежесуточных профилей температуры, солёности и скоростей течения, полученных на притопленной буйковой станции, выполнена систематизация термохалинных интрузий в северной части моря Лаптевых.
2. Анализ профилей температуры и солёности на близлежащих океанографических станциях и последовательных профилях ПБС позволил выделить элементы тонкой вертикальной структуры, относящиеся к идентичным интрузиям. Определены основные закономерности изменения термохалинных характеристик выделенных интрузий в пространстве.
3. Показано, что по мере распространения термохалинных интрузий от ядра атлантических вод в сторону материкового склона или в сторону открытой части бассейна, интрузии поднимаются относительно горизонтальной поверхности. При этом потеря тепла превышает

- потерю солей, за счет чего интрузии становятся более плотными и заглубляются относительно поверхностей равной потенциальной плотности.
4. Установлена квазистационарность режима интрузионного расслоения в течение трехлетнего периода наблюдений в глубоководной части моря Лаптевых.
 5. На основании положения о квазистационарности режима термохалинных интрузий получено соотношение, связывающее интенсивность фонового вертикального турбулентного обмена теплом и солью внутри интрузий с величинами вертикального плотностного соотношения и кроссфронтального плотностного соотношения вдоль интрузии.
 6. Установлена сложная динамическая структура перемежающихся теплых соленых и относительно более холодных и пресных интрузий. Слои теплой соленой и относительно более холодных и пресных интрузий двигаются в противоположных направлениях со средними скоростями от 3 до 5 мм/с. Также показано, что в области высокоградиентной прослойки создаются более благоприятные условия для возникновения турбулентности, обусловленные существованием вертикального сдвига горизонтальной скорости.
 7. Получены оценки интенсивности каскадного переноса тепла и соли на верхней границе атлантических вод и показано, что учет фоновой турбулентности имеет существенное значение при оценивании потоков на вертикальных границах интрузий и динамики этих образований, увеличивая эффективные потоки тепла и солей.
 8. Рассмотрено два сценария существования стационарного режима интрузионного расслоения: изопикнический и диапикнический. Определено, что учет неизопикничности интрузионного процесса уменьшает величину потоков в среднем на 30-40% на верхней границе ядра АВ и на 80-90% в центральной части ядра. Разброс полученных оценок интенсивности вертикального турбулентного обмена в интрузиях составляет от $1.8 \cdot 10^{-7}$ до 10^{-5} м²/с. Значения результирующих потоков тепла через высокоградиентные прослойки интрузий варьируются от 0.5 Вт/м² в центральной части ядра и до 1.2-1.8 Вт/м² на верхней границе АВ. При этом показано, что запирающие слои не могут оказывать существенного влияния на процессы передачи тепла и соли от ядра АВ к поверхности.

9. Получены оценки теплоотдачи на боковой границе струи атлантических вод при наличие стационарных интрузий. При этом теплоотдача через боковые границы атлантических вод более чем на порядок больше, чем потери тепла через верхнюю границу вод атлантического происхождения.

Список основных работ по теме диссертации

1. Термический режим придонного слоя моря Лаптевых и процессы, его определяющие // Криосфера Земли. - 2001. т. 5. № 3. - С. 40-55 (совместно с Дмитренко И.А., Хьюлеманн Й., Вегнер К., Грибановым В.А., Березовской С.Л. и Кассенс Х.)
2. Интрузии вод на склоне шельфа моря Лаптевых // Итоговая сессия Ученого совета ААНИИ по результатам работ 2002 г. Тезисы докладов. Экспресс информация. – 2003. – С. 17 (совместно с Тимоховым Л.А., Карпий В.Ю., Лебедевым Н.В. и Гармановым А.Л.).
3. Влияние сдвиговой неустойчивости внутренних волн на процессы вертикального турбулентного теплообмена на шельфе моря Лаптевых // Доклады АН. – 2003. т. 390. № 4. – С. 533-537 (совместно с Дмитренко И.А., Даровских А.Н. и Эйкеным Х.).
4. Cross-frontal interleaving structures in southern part of the Nansen Basin in the Arctic Ocean // Abstracts of IAPSO/SCOR Ocean Mixing Conference. - Victoria, Canada. – 2004. – P. 104. (совместно с Тимоховым Л.А. и Дмитренко И.А.)
5. Double-Diffusive Mixing Through the Laptev Sea Interleaving // 13th AGU Ocean Sciences Meeting. - Honolulu, US. – 2006. (совместно с Х.Симмонсом, Л.А.Тимоховым и И.А.Дмитренко)
6. Seasonal Variability of Atlantic Water on the Continental Slope of the Laptev Sea during 2002-2004 // Earth and Planetary Science Letter. – 2006. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.067 (совместно с И.А.Дмитренко, И.В.Поляковым, Л.А.Тимоховым Л.А., Х.Симмонсом, В.В.Ивановым и Д.Уолшем).
7. Spatial variations in ice formation onset in the Laptev Sea: consequence of the vertical heat fluxes caused by internal waves overturning Berichte zur Polar- und Meeresforschung. – 2007. – V. 76. № 3 (в печати).

8. Термохалинные интрузии северной части моря Лаптевых // Труды Аркт. и антаркт. ин-та. (совместно с Л.А.Тимоховым, И.А.Дмитренко, И.В.Поляковым – в печати).