

**Смирнов Александр Викторович**

**ЭВОЛЮЦИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ОКЕАНА В  
СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОМ БАССЕЙНЕ**

Специальность 25.00.28 – океанология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в государственном учреждении «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» и Международном центре по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена.

Научный руководитель:

доктор географических наук, профессор      **АЛЕКСЕЕВ** Генрих Васильевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук, профессор      **СМИРНОВ** Николай Павлович

кандидат географических наук                      **АШИК** Игорь Михайлович

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ), факультет географии и геоэкологии, кафедра океанологии

Защита диссертации состоится «14» апреля 2011 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д.327.002.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» по адресу: 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».

Автореферат разослан «11» марта 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета:  
кандидат географических наук



В. Ф. Радионов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Процессы формирования и эволюции верхнего квазиоднородного слоя океана в Северо-Европейском бассейне (СЕБ) тесно связаны с изменениями климата. В СЕБ, включающий в себя Норвежское, Гренландское и Баренцево моря, поступает огромное количество тепла с теплыми течениями из Северной Атлантики, часть которого переносится далее в Арктический бассейн Северного Ледовитого океана (СЛО). В регионе формируются аномалии энергообмена между океаном и атмосферой, влияющие на перенос тепла и влаги на территорию Европейской части РФ и в Арктику. Аномалии вертикального конвективного перемешивания на акватории СЕБ оказывают воздействие на формирование нисходящей ветви глобальной термохалинной циркуляции, дающей начало стоку холодных глубинных и придонных вод. Изменения условий формирования этого стока влияют на колебания циркуляции в океане и переносы океанического тепла в высокие широты, включая Арктический бассейн и Сибирские арктические моря. Понимание механизмов формирования долгопериодной изменчивости вертикального обмена и потоков в СЕБ необходимо для прогноза будущих изменений в СЛО, в том числе морского ледяного покрова.

**Целью исследования** является установление закономерностей пространственно-временной изменчивости характеристик верхнего слоя океана и условий формирования крупных термохалинных аномалий в Северо-Европейском бассейне.

**Задачи работы** состояли в том, чтобы:

- 1) Подготовить максимально полный массив океанографических данных для морей Северо-Европейского бассейна
- 2) Создать новый гридированный массив температуры поверхности океана (ТПО) по судовым наблюдениям
- 3) Сравнить полученный массив с доступными *in situ*, объективно-анализированными и спутниковыми данными
- 4) Выбрать и применить методы расчета толщины перемешанного слоя и потоков тепла на границе раздела океан–атмосфера
- 5) Установить взаимосвязи между изменениями характеристик поверхностного и перемешанного слоев и потоками тепла на поверхности
- 6) Выявить периоды аномального состояния верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и определить их связь с изменением атмосферных и ледовых условий и циркуляцией в СЕБ

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

- 1) Пополненная база глубоководных океанографических данных по СЕБ позволила определить с более высоким пространственно-временным разрешением структуру и количественные характеристики изменчивости гидрологических полей на различных пространственных и временных масштабах

- 2) Созданный массив данных о температуре воды на поверхности является наиболее полным на сегодня источником информации о ТПО для Северо-Европейского бассейна
- 3) Современные расчетные алгоритмы, адаптированные к условиям региона, позволили получить надежные количественные оценки потоков тепла на границе раздела океан–атмосфера
- 4) Произведен расчет характеристик ВКС и установлена взаимосвязь между ними и общим потоком тепла, особенно в периоды аномального развития процессов в СЕБ
- 5) Установлена связь между усилением адвекции морского льда из Арктики, величинами составляющих общего потока тепла через поверхность и характеристиками верхнего квазиоднородного слоя

#### **Практическая значимость:**

- 1) Созданные при выполнении исследования массивы данных являются уникальным источником информации, не имеющим на данный момент аналогов. Они могут быть использованы для решения широкого круга научных и практических задач
- 2) Количественные характеристики ВКС, оценки изменчивости термохалинных характеристик водных масс в СЕБ, оценки потоков тепла на поверхности, типизация устойчивых гидрологических режимов могут быть использованы для совершенствования и валидации математических моделей циркуляции океана и моделей климата
- 3) Адаптированные и апробированные к условиям СЕБ расчетные методы могут быть рекомендованы для практических расчетов потоков тепла и характеристик ВКС
- 4) Алгоритм расчета тепловых потоков COARE 3.0, оптимизированный к условиям высоких широт, может быть рекомендован к применению в практических расчетах

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Новые климатические наборы данных по температуре поверхности океана (*in situ*, гридированный) позволили определить периоды устойчивого состояния и смены гидрологического режима в СЕБ
- 2) Используемые алгоритмы дали возможность оценить долгопериодную изменчивость тепловых потоков и толщины перемешанного слоя в регионе СЕБ
- 3) Количественные оценки выявили тесную зависимость толщины перемешанного слоя от общего потока тепла
- 4) Формирование крупных аномалий гидрологического режима в Северо-Европейском бассейне, наблюдавшихся в конце 1960-х, середине 1980-х и 1990-х гг. обусловлено периодическим усилением адвекции Полярных вод и морского льда из Арктического бассейна

- 5) Существует устойчивая взаимосвязь между периодами повышенной теплоотдачи от океана к атмосфере в СЕБ и усиленного выноса морского льда из Арктики

**Личный вклад автора** заключается в:

- 1) Разработке программного обеспечения для работы с океанографическими и метеорологическими базами данных
- 2) Создании технологий и построении баз данных (судовых наблюдений, гридированного массива) по ТПО для СЕБ
- 3) Апробации, адаптации к условиям региона и применению современных методик расчетов компонентов теплового баланса и толщины ВКС по историческим данным корабельных наблюдений
- 4) Проведении пространственно-временного анализа океанографических и метеорологических данных

**Апробация результатов диссертации** проходила на:

- 1) Международной научной конференции «Морские исследования полярных областей Земли в международном полярном году 2007/2008» (Санкт-Петербург, Россия, 2010)
- 2) Международной конференции по морским данным и информационным системам (Париж, Франция, 2010)
- 3) Конференции «Планетарный пограничный слой и изменения климата» (Кейптаун, Южная Африка, 2009),
- 4) Конференции молодых ученых «Проблемы развития полярных регионов в условиях глобального изменения климата» (Санкт-Петербург, Россия, 2009)
- 5) Конференции Европейского Географического Союза (Вена, Австрия, 2008)
- 6) Семинарах отдела взаимодействия океана и атмосферы (Санкт-Петербург, Россия, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010)
- 7) Ежегодных аспирантских сессиях Международного Центра по Окружающей Среде и Дистанционному зондированию им. Нансена (Санкт-Петербург, Россия, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010)
- 8) Семинарах Центра по Окружающей Среде и Дистанционному зондированию (Берген, Норвегия, 2006, 2007, 2008, 2009)

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы **7** работ, в том числе две публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых сокращений, списка использованной литературы общим объемом 255 наименований (из них 213 на английском языке) и содержит 184 страницы машинописного текста, 9 таблиц и 54 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность темы исследования, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель, задачи исследования и положения, выносимые на защиту, содержатся сведения об апробации основных научных результатов, структуре и объему диссертационной работы. Рассмотрена роль изучаемого региона в климатической системе как важного звена глобальной термохалинной циркуляции. Подчеркнута важность процессов взаимодействия океана и атмосферы и необходимость корректного определения потоков тепла и толщины перемешанного слоя.

**В первой главе** рассмотрена роль Северо-Европейского бассейна, включающего в себя Норвежское, Гренландское и Баренцево моря, в глобальной климатической системе. Представлен обзор последних публикаций о характеристиках водообмена через проливы, районах формирования ядер водных масс, системе поверхностных течений и глубоководном обмене. Уделено внимание процессам формирования структуры водных масс и изменчивости их характеристик.

*В разделе 1.1* дано описание топографии дна региона. Показана ее важность для понимания процессов переноса вод течениями и глубоководного обмена. Рассмотрены особенности топографии СЕБ и выделены характерные элементы, обуславливающие специфическую структуру региона. Топография дна определяет географическое деление Норвежского и Гренландского морей на четыре части: Гренландскую, Лофотенскую, Норвежскую котловины и Исландское плато, над которыми формируются замкнутые ячейки циркуляции.

*В разделе 1.2* приведены основные характеристики водных масс и системы течений. Показана структура течений и фронтальных разделов. На основе классификации (Hansen and Osterhus, 2000) приведены термохалинные характеристики основных типов водных масс. Показано, что объемы образования глубинных вод в Гренландском море незначительны и не являются главным источником вод «перелива». Основными районами трансформации Атлантических вод являются Норвежская и Лофотенская котловины, расположенные в Норвежском море.

*Раздел 1.3* посвящен ключевым аспектам взаимодействия океана и атмосферы в СЕБ. Являясь пограничной зоной между Атлантическим океаном и Арктическим бассейном, регион во многом определяет климат умеренных и высоких широт.

**Вторая глава** посвящена формированию информационных ресурсов исследования. В ней рассмотрены достоинства и недостатки отдельных океанографических и метеорологических наборов данных, ограничения при их использовании для анализа временной и пространственной изменчивости в районе исследования. Дано детальное описание доступных массивов данных. Представлена технология создания гридированного массива по температуре поверхности океана.

*Раздел 2.1* посвящен сравнению данных метеорологических реанализов с реальными наблюдениями. По данным атмосферных реанализов проведен сравнительный анализ месячных рядов наблюдений и приведена пространственно-временная изменчивость приземных метеорологических характеристик. Установлено, что массив метеорологических данных ERA-40 (Uppala et al., 2005)

завышает среднегодовые значения температуры в среднем на  $1,1^{\circ}\text{C}$ . В то же время, в летние и осенние месяцы температура оказалась в среднем ниже инструментально измеренных величин. В отличие от абсолютных значений, изменчивость и тренды в восстановленных метеорологических рядах практически не отличаются от реальных. Ряды приземной температуры воздуха из NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) реанализа также демонстрируют значительные отклонения от фактических наблюдений. Средний сдвиг оказался на  $0,5^{\circ}\text{C}$  больше чем для ERA-40. Наибольшее несоответствие выявлено в величинах трендов. Восстановленные ряды температуры показывают отсутствующие в измерениях тренды. Сопоставление показало, что завышенные тренды возникают за счет неравномерной по длине ряда амплитуды изменчивости в восстановленных рядах.

В разделе 2.2 дано описание глубоководной океанографической базы, созданной в отделе взаимодействия океана и атмосферы ГУ «АНИИ». Массив был существенно пополнен как историческими, так и современными океанографическими станциями. Также улучшено качество данных за счет применения современных процедур контроля и поиска дубликатов. Разработано и запатентовано программное обеспечение, представляющее собой визуальную оболочку к базе данных (Кораблев и др., 2007). В настоящее время массив включает более 450000 океанографических станций (CTD, батометры), содержащих информацию по температуре, солёности и основным гидрохимическим параметрам за период с 1900 по 2010 год.

Раздел 2.3 посвящен формированию базы данных поверхностного слоя. Под поверхностным слоем подразумевается верхний слой океана от поверхности до глубины 5 м. Приведена методика создания массива данных по температуре и солёности верхнего слоя океана. Рассмотрены принципы его формирования и проверки качества данных, приведена характеристика содержащейся в нем информации. Создана база данных по температуре и солёности поверхностного слоя (БД ПС). База содержит более 550000 океанографических станций за период с 1900 по 2010 г (рис. 1). Массив был разработан на основе исходных данных судовых наблюдений.

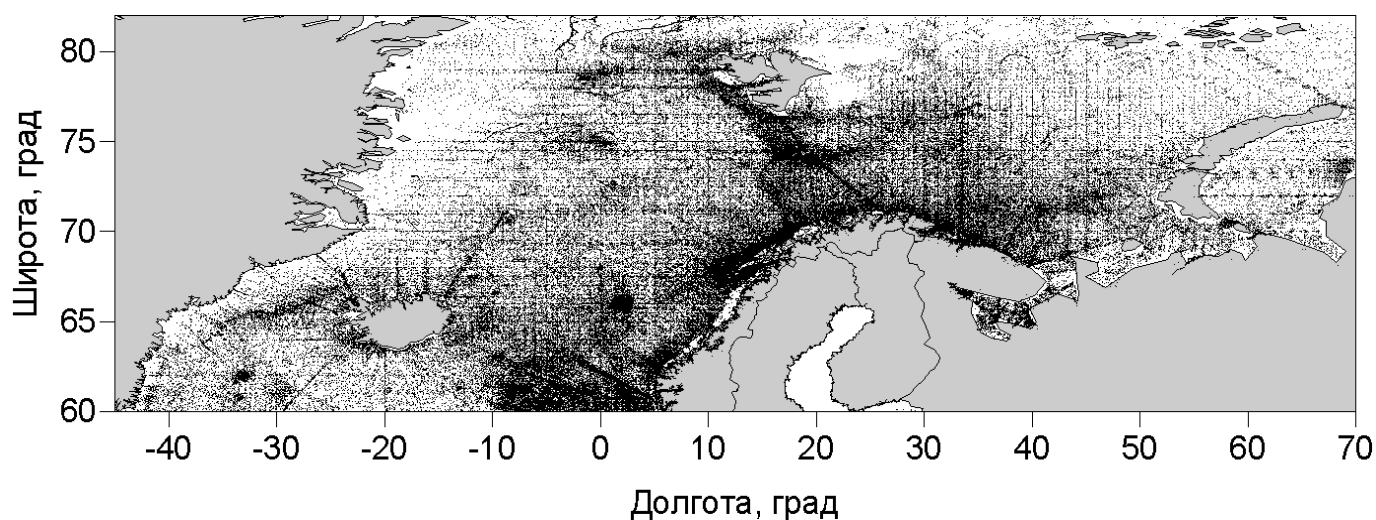


Рисунок 1. Пространственное распределение станций в БД ПС

В разделе 2.4 приводится описание доступных гридированных наборов данных по температуре поверхности океана. Рассмотрены *in situ*, спутниковые данные и данные реанализов. Сравнение массивов выявило ряд недостатков ограничивающих возможность их использования для изучения временной изменчивости и использовании для расчетов потоков тепла через поверхность океана.

Раздел 2.5 описывает методику создания гридированных месячных полей ТПО для морей Северо-Европейского бассейна. Интерполяция в узлы регулярной сетки выполнена с применением собственного кригинга (intrinsic kriging), предназначенного для геостатистического моделирования нестационарных данных (Wackernagel, 2003). Преимуществом данного алгоритма является автоматическое моделирование трендовой и ковариационной составляющих с помощью собственных случайных функций внутри заданного радиуса поиска. В отличие от универсального кригинга (universal kriging), также предназначенного для работы с нестационарными данными, методика позволяет моделировать локальные тренды.

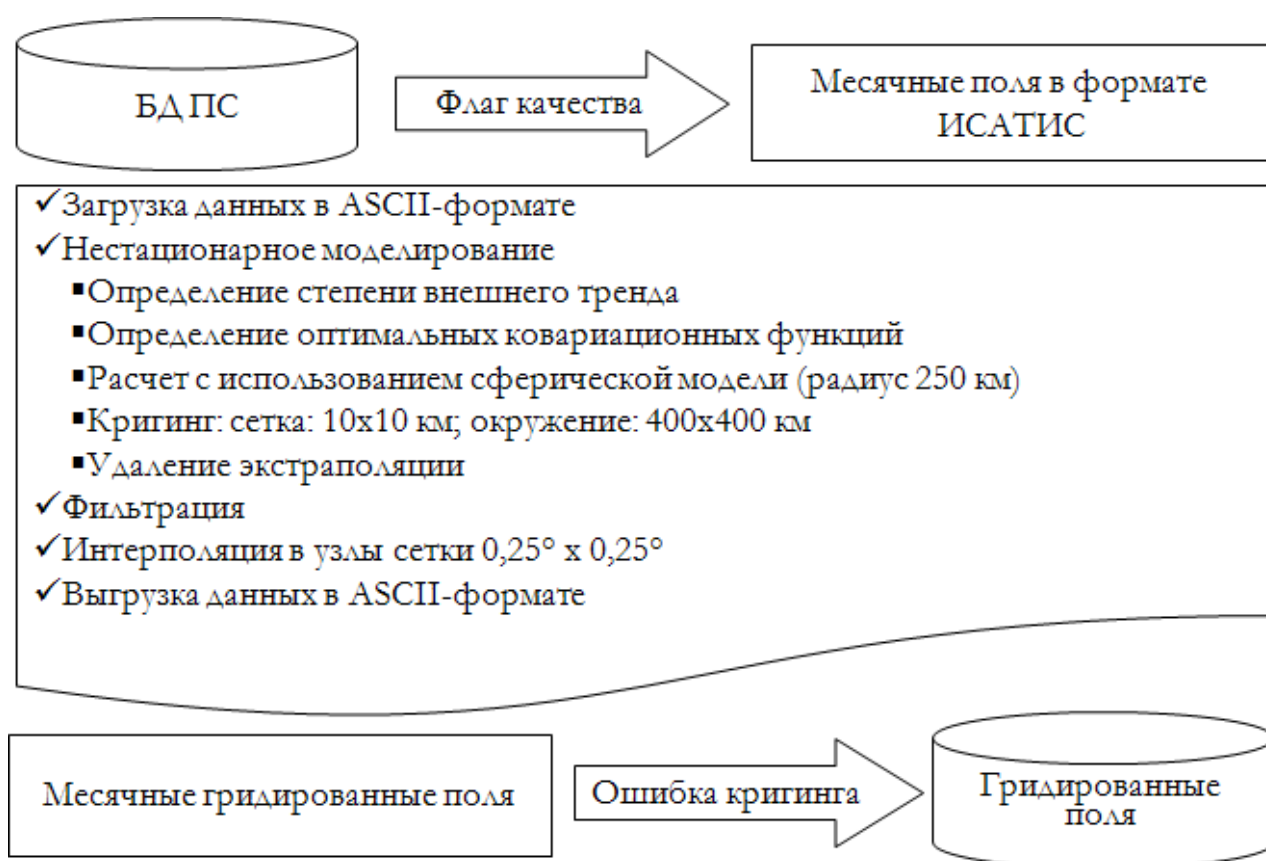


Рисунок 2. Алгоритм создания гридированного массива (ГМ) ТПО

По приведенной методике (рис. 2) создан массив месячных полей ТПО в узлах регулярной сетки с шагом  $0,25^\circ$  по широте и долготе за 1900–2009 гг. и проведено его сравнение с аналогичными наборами данных. На примере сравнения с массивом данных HadISST (Rayner et al., 2003) показано, что созданный гридированный массив лучше описывает региональные особенности, в частности положение фронтов и области с характерными особенностями циркуляции (рис. 4).



**В третьей главе** диссертационной работы рассмотрены основные аспекты теплообмена между океаном и атмосферой в регионе СЕБ. В разделе 3.1 дано общее описание процессов, происходящих на границе раздела океана и атмосферы. Показана роль ветрового воздействия, волновых явлений и морского льда во взаимодействии океана и атмосферы.

В разделе 3.2 приведены методики, которые могут быть использованы для расчетов составляющих теплового баланса по данным исторических судовых наблюдений. Также изложены современные алгоритмы расчетов турбулентных потоков тепла и приведено их сравнение. Для расчета коротковолнового потока тепла использована формула Рида (Reed, 1977) (1).

$$Q_{sw} = (1 - \alpha) Q_c [1 - 0,62n + 0,0019\theta_N], \quad (1)$$

где  $Q_{sw}$  – суммарный поток коротковолновой солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_c$  – поток приходящей солнечной радиации;  $\alpha$  – альbedo морской поверхности,  $n$  – балл облачности в долях;  $\theta_N$  – высота солнца в градусах;

Поскольку практически невозможно получить детальные исторические данные о состоянии атмосферы над морем, наиболее приемлемой методикой расчета коротковолнового потока тепла при ясном небе является модифицированная модель EPA (Environmental Protection Agency) (Cole and Wells, 2000). В работе использован спутниковый массив альbedo, разработанный в Финском метеорологическом институте (Taskanen et al., 2003).

Длинноволновый поток тепла был получен с помощью формулы (2) (Josey et al., 2003). Несомненным достоинством данного метода является то, что он специально разрабатывался и верифицировался для региона Северной Атлантики.

$$Q_{LW} = \varepsilon \sigma T_s^4 - (1 - \alpha_L) \sigma [T_a + an^2 + bn + c + 0,84(D + 4,01)]^4 \quad (2)$$

$$D = T_{Dew} - T_a,$$

где  $Q_{LW}$  – поток длинноволновой радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения морской поверхности,  $\varepsilon=0,98$ ;  $T_s$  – температура поверхности океана, К;  $\alpha_L$  – коэффициент отражения длинноволнового излучения,  $\alpha_L=0,045$  (Katsaros et al., 1990);  $T_a$  – температура воздуха, К;  $n$  – балл облачности (в долях единицы);  $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты,  $a=10,77$ ;  $b=2,34$ ;  $c=-18,44$ ;  $T_{Dew}$  – температура точки росы, К;

Турбулентные потоки тепла рассчитывались по алгоритму COARE 3.0 (Fairall et al., 2003). Он основан на балк-формулах (balk-formulae), полученных в результате комбинирования уравнений Рейнольдса и параметризаций коэффициентов переноса и функций устойчивости. Погрешность расчетов, по оценке разработчиков алгоритма, составляет не более 10 Вт/м<sup>2</sup> в долговременных (около 1 месяца) измерениях приземного энергетического бюджета. Следует отметить, что в настоящее время COARE является наиболее часто используемым алгоритмом расчета потоков тепла. Для целей исследования исходные коды алгоритма были существенно переработаны. В него были включены процедуры расчета радиационных потоков. Также алгоритм был модифицирован под конкретный район использования (восток Норвежского моря) и тип океанографических данных

(батиметрия). Для этого изменялись параметры толщины перемешанного слоя, глубины измерения, исключался эффект холодного поверхностного скин-слоя.

*Раздел 3.3* посвящен расчету временных серий компонентов радиационного баланса за период с 1948 по 2008 год по данным корабля погоды «М» (КПМ). Приведено описание внутригодовой и сезонной изменчивости составляющих общего потока тепла. Количественные оценки величин потоков тепла показали, что суммарный среднегодовой поток тепла составил  $78 \text{ Вт/м}^2$ . Показано, что основной вклад в межгодовую изменчивость вносят турбулентные потоки (в частности – скрытый поток тепла). Межгодовая изменчивость радиационных потоков тепла невелика. По результатам сравнения полученных результатов с существующими гридированными наборами данных было установлено, что, несмотря на то, что все приведенные климатологии были рассчитаны по различным алгоритмам, общая направленность трендов (1973–2006 гг.) сохраняется. Фазовая же составляющая общего потока тепла в NCEP/NCAR реанализе заметно отличается от результатов данного исследования и атласа NOC (Josey et al, 1998). Различия в значениях общего потока тепла главным образом связаны с использованием различных геофизических параметров, а не с использованием параметризаций. Исключением является поток коротковолновой радиации.

В *разделе 3.4* показаны долгопериодные изменения теплового баланса. Анализ многолетней изменчивости общего потока тепла позволил выделить несколько характерных периодов (рис. 3). Так в конце 1960-х, середине 1980-х и середине 1990-х годов наблюдалась повышенная отдача тепла океаном, в то время как 70-е годы, конец 80-х и середина 2000-х характеризовалась повышенным притоком тепла в океан.

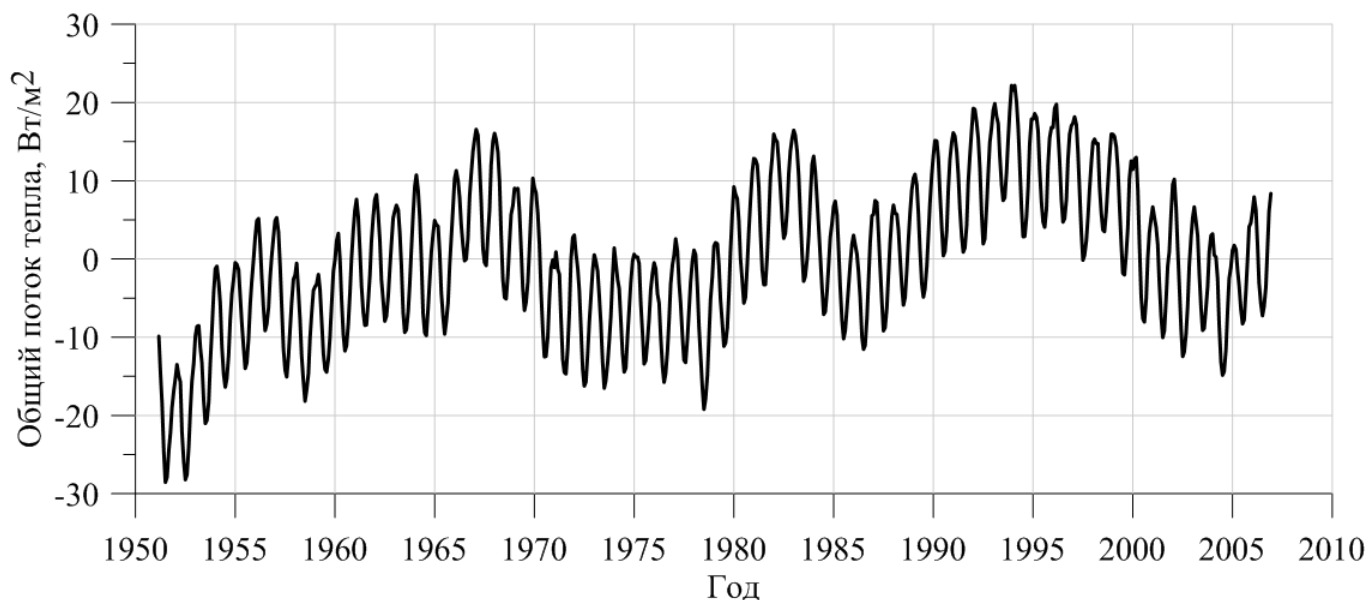


Рисунок 3. Общий поток тепла по данным КПМ

Анализ составляющих общего потока тепла показал, что наибольший вклад в многолетнюю изменчивость вносят его турбулентные составляющие – явный и скрытый потоки тепла. Это означает, что в периоды усиления теплоотдачи из океана происходили процессы, обостряющие температурные градиенты в пограничном слое вода–воздух.

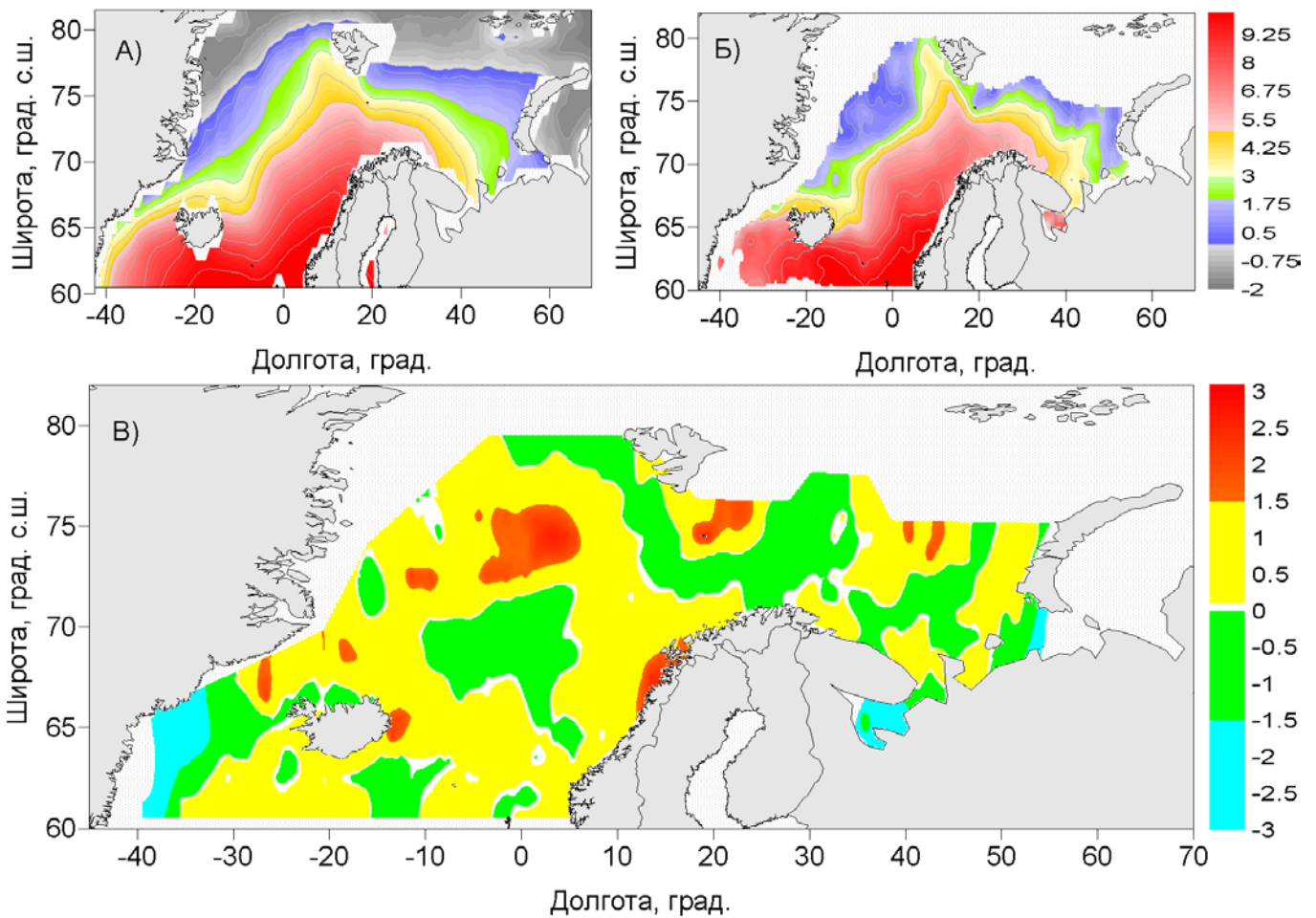


Рисунок 4. Осреднения ТПО за период 1957–1990 гг. (июнь) по данным HadISST (А) и созданному гридированному массиву ТПО (ГМ) (Б). Приведены аномалии HadISST относительно ГМ (В) (К с. 8)

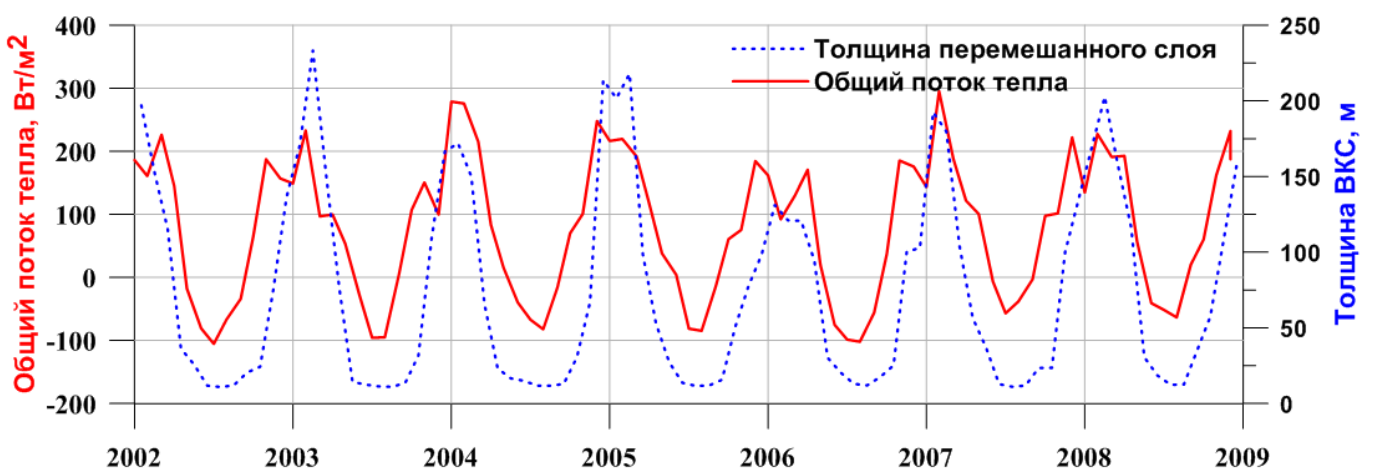


Рисунок 5. Толщина перемешанного слоя (CTD-наблюдения) и общий поток тепла по данным КИМ в 2002–2009 гг. (К с. 15)

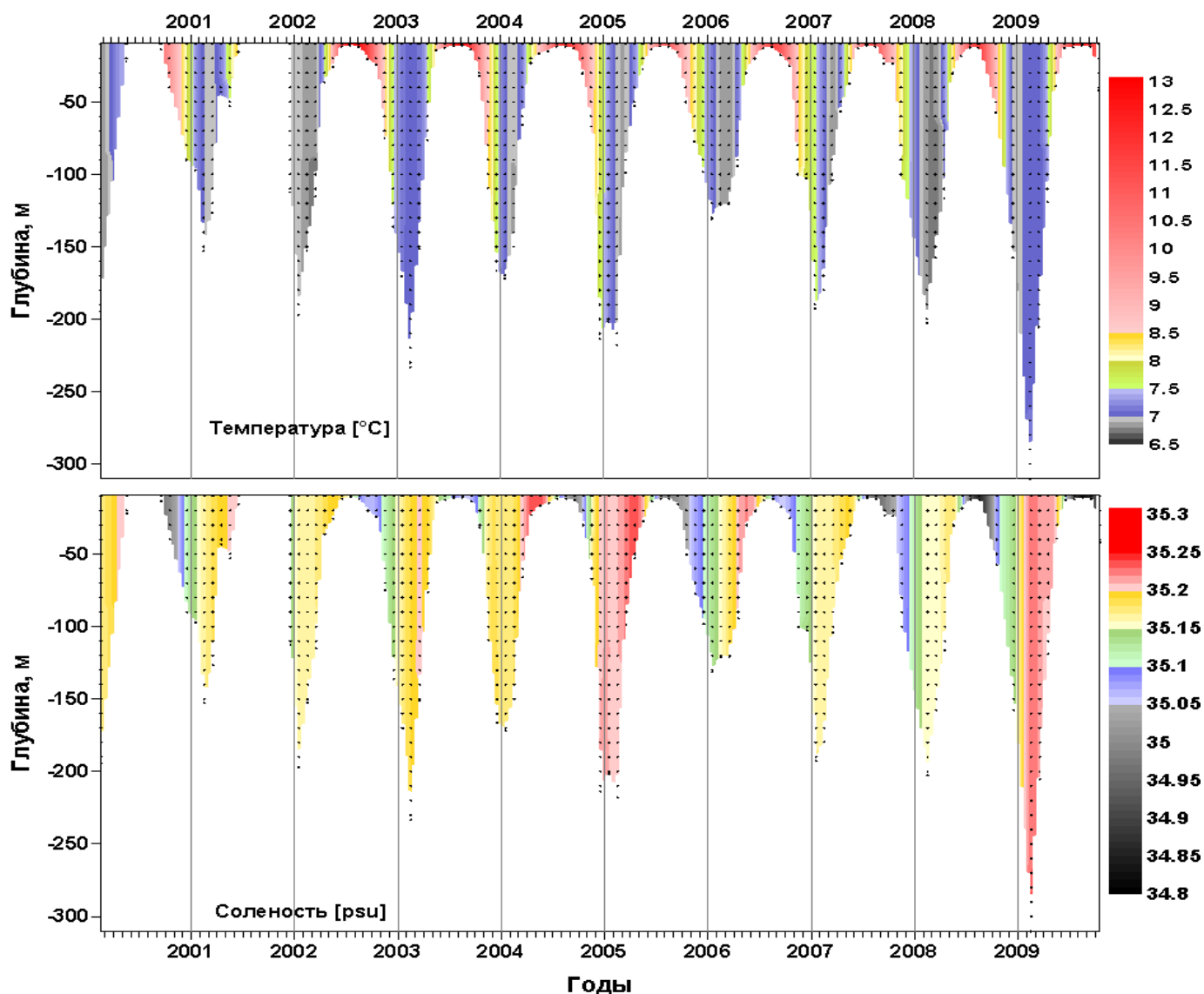


Рисунок 6. Диаграммы эволюции температуры (вверху) и солености (внизу) ВКС по данным КПМ за период STD-зондирований с 2000 по 2009 гг. (К с. 16)

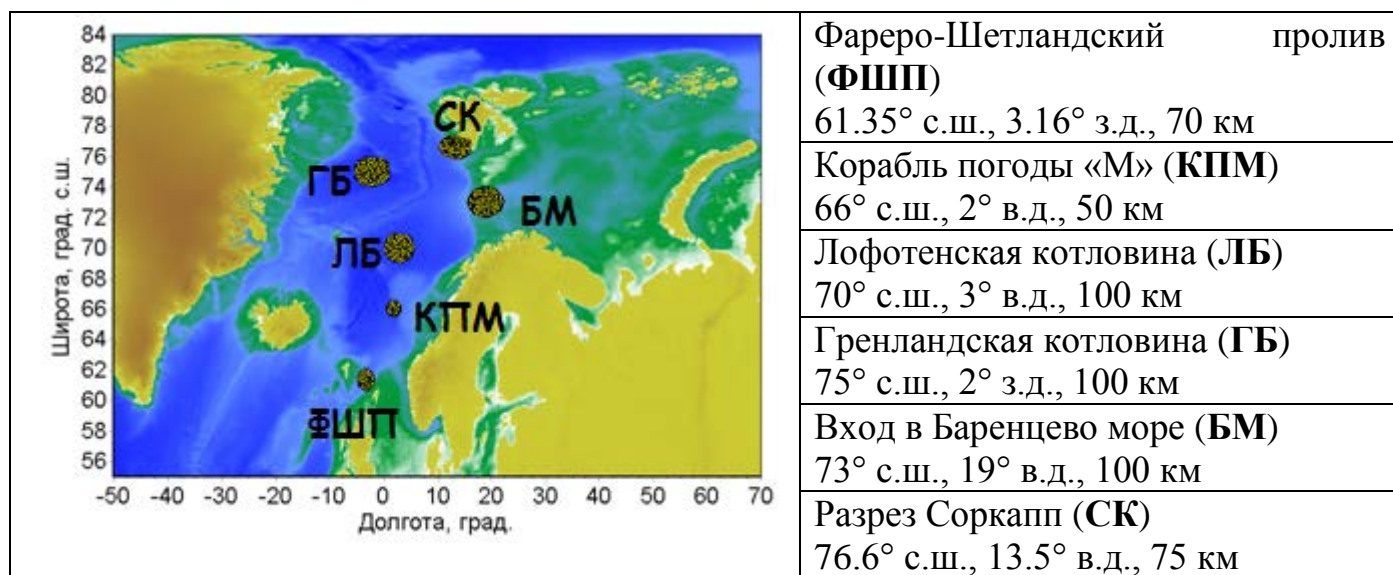


Рисунок 7. Ключевые регионы СЕБ (К с. 16)

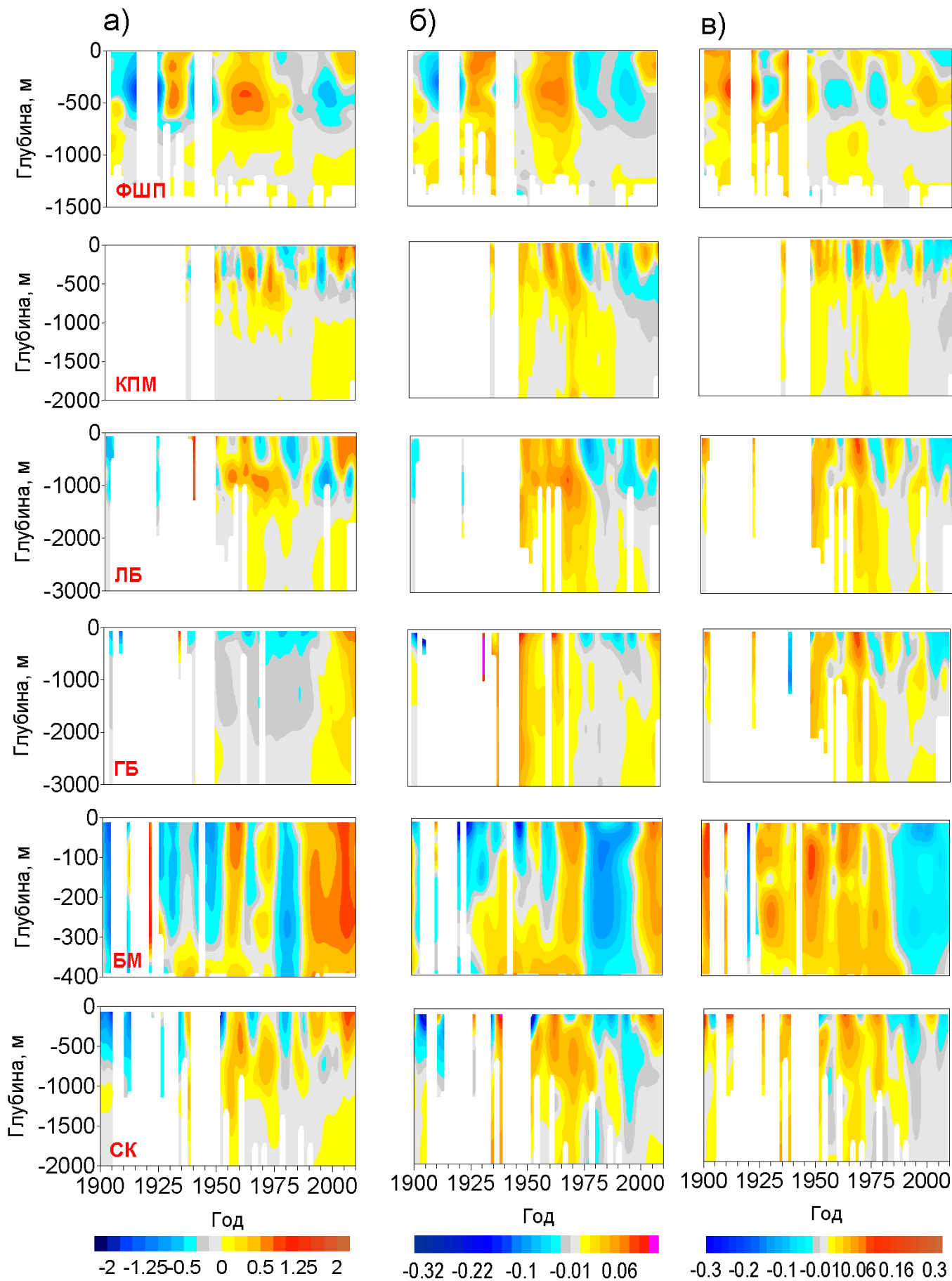


Рисунок 8. Временные диаграммы аномалий температуры (а), солёности (б) и плотности (в) для ключевых районов СЕБ (К с. 16)

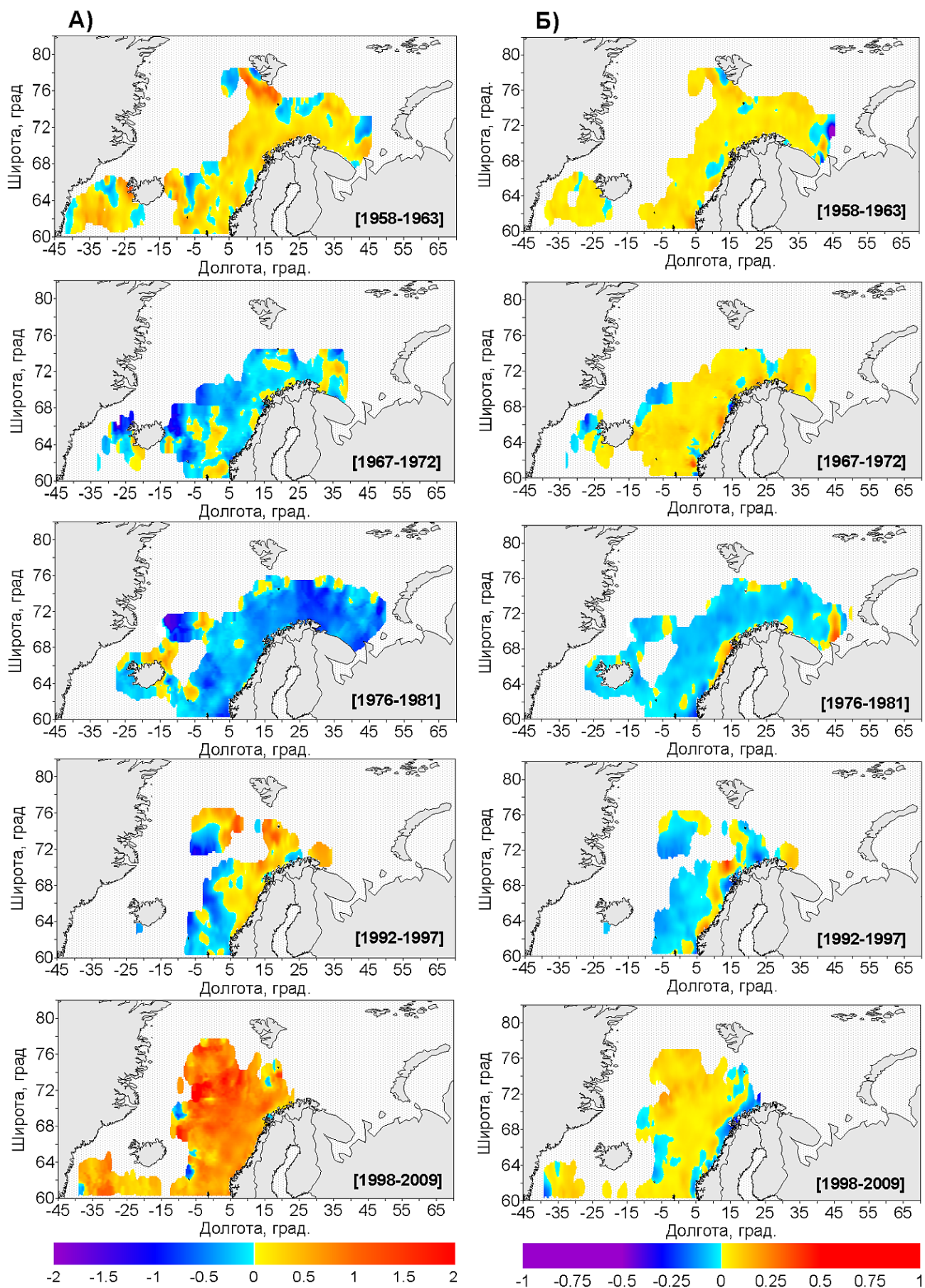


Рисунок 9. Пространственные распределения аномалий температуры (А) и солености (Б) в СЕБ в апреле по данным созданной БД ПС (К с. 18)

**В четвертой главе** подробно рассмотрена эволюция перемешанного слоя в ключевых районах СЕБ. В разделе 4.1 рассмотрены механизмы образования и развития перемешанного слоя.

Раздел 4.2 описывает расчетные методы определения толщины ВКС. В качестве оптимального алгоритма определения толщины перемешанного слоя в СЕБ для профилей с низким вертикальным разрешением (более 30 м) был выбран алгоритм, основанный на плотностном пороговом критерии (Kara et al, 2000), и показавший наибольшую точность и устойчивость. На основании тестирования, для определения толщины ВКС был выбран сдвиг по температуре относительно поверхности  $\Delta T=0,2^\circ \text{C}$ , по которому и рассчитывалось пороговое значение плотности. Для STD-профилей (разрешение менее 30 м), оптимальным является методика, основанная на анализе кривизны профиля (Lorbacher et al., 2004). Для массовых расчетов использовалась комбинация перечисленных методов. Экспертный анализ для разных регионов СЕБ показал, что использование  $\Delta T=0,2^\circ \text{C}$  для расчета порогового значения плотности является наиболее универсальным.

В разделе 4.3 приведено сравнение результатов расчетов по различным методикам. Приведены данные сравнения с существующими гридированными наборами данных по толщине ВКС. Сравнение данных массивов толщины ВКС, разработанных Левитусом (Monterey and Levitus, 1997), Кара (Kara et al, 2000) и Монтегуттом (de Boyer Montegut et al., 2004) с данными, полученными по наблюдениям на КПМ, показало завышение реальной толщины перемешанного слоя климатологией Левитуса и некорректное отображение процессов зимнего заглубления ВКС в климатологии Монтегута.

В разделе 4.4 проведен пространственно-временной анализ сезонной и межгодовой изменчивости характеристик ВКС. Показано, что абсолютные величины температуры и солёности ВКС (средние в перемешанном слое) дают физически более обоснованную характеристику процессам взаимодействия между пограничными слоями океана и атмосферы чем изменение средних характеристик в слоях с фиксированной толщиной или на фиксированных горизонтах.

Сделан вывод о том, что особенности развития ВКС в точке КПМ должны интерпретироваться с учетом истории его трансформации вверх по потоку Атлантических вод (АВ), особенно в периоды аномального развития атмосферных процессов над акваторией Северной Атлантики и СЕБ. Решающую роль в развитии ВКС в период устойчивых атмосферных процессов играют стратификация верхнего слоя океана и толщина слоя АВ. При глубоком залегании нижней границы АВ (более 300 м) вовлечение в процесс зимнего конвективного перемешивания более соленых вод способствует увеличению солёности/плотности всего ВКС и его аномальному заглублению.

Сопоставление временных рядов изменения общего потока тепла и толщины ВКС (рис. 5) выявило наличие тесной взаимосвязи между ними с коэффициентом корреляции 0,8. В период заглубления ВКС с сентября по декабрь наблюдается близкая к линейной зависимость между увеличением потоков и увеличением толщины ВКС. В тоже время сильные потоки тепла с января по март не приводят к увеличению толщины перемешанного слоя, что связано с особенностями стратификации и вертикальным распределением солёности.

Показано, что с конца 1990-х годов соленость АВ в верхнем слое существенно выросла и соответствует фону, наблюдавшемуся в конце 1960-х, периоду активной глубокой конвекции в СЕБ. В верхнем слое СЕБ сформировались условия для развития конвективных процессов, при наличии соответствующего атмосферного воздействия (сильные потоки тепла от океана). В этом контексте обращает на себя внимание аномально глубокий ВКС, имевший место зимой 2009 года в районе КПМ (рис. 6).

**В пятой главе** рассмотрена эволюция перемешанного слоя в ключевых районах СЕБ (рис. 7).

*Раздел 5.1* посвящен анализу термохалинных характеристик водных масс по данным глубоководных и поверхностных наблюдений, содержащихся в двух специализированных океанографических базах данных. Оценен вклад различных процессов в формирование горизонтальной структуры среднемноголетних океанографических полей. Показано, что годовой ход океанографических параметров в верхнем слое СЕБ формируется сезонными изменениями обмена на границе вода-воздух, адвекции Атлантических (АВ) и Полярных (ПВ) вод, зимним конвективным перемешиванием и летним распреснением поверхностного слоя. Увеличение толщины однородного верхнего слоя начинается в октябре, затем происходит постепенное уменьшение величин вертикальных градиентов.

В марте–апреле плотность перемешанного слоя достигает максимальных значений, а вертикальный градиент плотности снижается до минимальных значений. В осенне-зимний период перемешивание ослабляет вертикальный градиент солености. С января по май распресненный верхний слой полностью перемешивается с нижележащими АВ и соленое ядро выходит на поверхность. Характерные для зимы вертикальные профили солености формируются вдоль всей траектории АВ, однако степень трансформации усиливается по мере движения на север за счет интенсификации процессов обмена в пограничных слоях океана и атмосферы. Соленость поверхностного слоя с августа по январь непрерывно нарастает. Наоборот, в слое 50–200 происходит ее снижение, особенно интенсивное с сентября по ноябрь. К декабрю в слое 0–200 м формируется однородное вертикальное распределение солености. Высокий теплозапас и непрерывная адвекция АВ в районе КПМ препятствует глубокому проникновению конвекции в районе КПМ.

*В разделе 5.2* проведен анализ эволюции термохалинных характеристик водных масс и выделены характерные периоды с устойчивым гидрологическим режимом. За период с 1948 по 2009 год практически во всех рассматриваемых регионах можно выделить три сильные положительные (1958–1963, 1967–1972, 2002–2009) и две сильные отрицательные (1976–1981, 1992–1997) аномалии солености (рис. 8–9). Они сопровождалась аномалиями температуры, как правило, такого же знака. Отрицательная аномалия солености 1992–1997 годов прошла через стадии с высокой и низкой плотностью, вызванной переходом от низких значений температуры в ее ядре, к сильному прогреву 1996–1997 годов. Поскольку в 1994–1995 годах ее плотность была выше, чем плотность вод в период распространения «Великой соленостной аномалии» (ВСА) 70-х годов, ее распресняющее влияние на промежуточные слои оказалось более сильным. До 1972 года высокий соленостный



фон сопровождался, в основном, высокими температурами воды и соответствовал гидрологическому режиму усиленного влияния адвекции АВ из Северной Атлантики.

ВСА оказывала сильное воздействие на океанический климат в СЕБ в период с 1976 по 1982 год (Dickson et al., 1988). Низкая соленость верхнего слоя регистрировалась также в начале 1950-х. Менее значительные, чем в 70-х, случаи распреснения наблюдались в середине 1950-х и 1960-х годов, а последнее падение солености произошло в середине 1990-х годов.

С первой половины 60-х годов температура воздуха над акваторией СЕБ оставалась аномально низкой на протяжении нескольких лет (рис. 10), в то время как соленость на поверхности оставалась высокой. Резкое охлаждение на поверхности инициировало повсеместное усиление вертикального перемешивания.

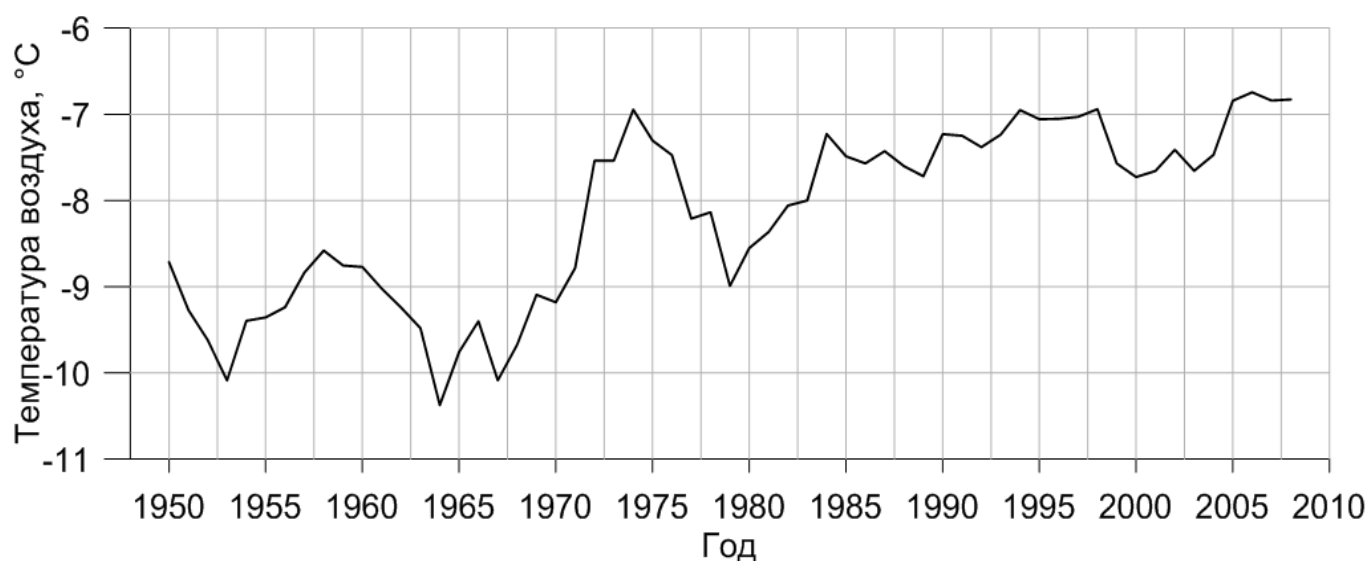


Рисунок 10. Температура воздуха в СЕБ в марте по данным реанализа NCEP

В разделе 5.3 показана высокая зависимость долгопериодной изменчивости температуры воздуха в СЕБ от циркуляции атмосферы, отражаемой индексом Северо-Атлантического колебания (САК). Важной особенностью временной изменчивости индекса САК второй половины 20 века является устойчивый положительный тренд с середины 1960-х годов (рис. 11). В начале 1990-х годов величина индекса достигла экстремально высоких значений, за период наблюдений с 1864 года. При высоких значениях индекса произошла перестройка крупномасштабной атмосферной циркуляции, следствием чего стало усиление юго-западных ветров и адвекции тепла в северные широты.

Тесную связь между циркуляцией атмосферы, описываемой индексом САК и температурой воздуха, подтверждают высокие коэффициенты корреляции. Так величина коэффициента корреляции между сглаженными по пяти годам среднегодовыми значениями температуры для северной части СЕБ и САК составила 0,77 за период 1948–1995 гг.

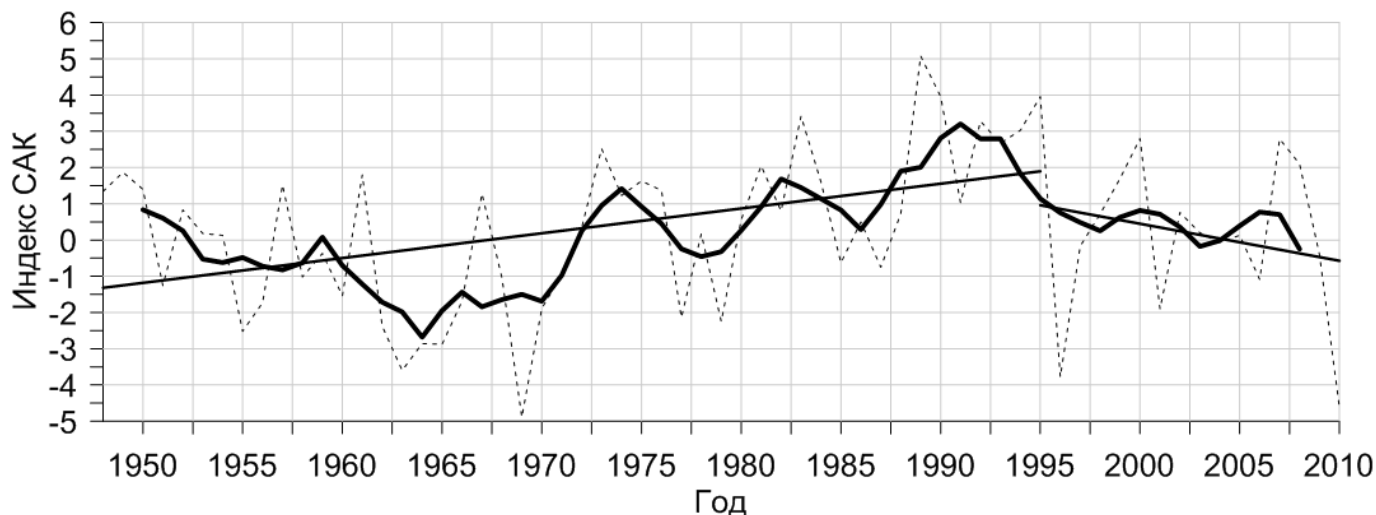


Рисунок 11. Временной ряд индекса Северо-Атлантического колебания, осредненного за период с декабря по март. Утолщенная линия – скользящее среднее с окном 5 лет. Прямыми линиями показаны тренды 1948–1995, 1995–2010 гг.

*Раздел 5.4* посвящен оценке взаимосвязи изменчивости термohалинных характеристик с изменениями потоков тепла на границе раздела океан-атмосфера и выносом морского льда из Арктического бассейна. За период инструментальных наблюдений в СЕБ выявлено несколько устойчивых гидрологических режимов обуславливающих различные режимы вертикального перемешивания (рис. 9). Их формирование связано, в первую очередь, с периодическим усилением адвекции Полярных вод и морского льда из Северного Ледовитого океана, что приводит к резкому распреснению верхнего слоя и усилению стратификации, препятствующей вертикальному обмену. Это подтверждается изменением положения границы ледяного покрова, увеличенным экспортом льдов через пролив Фрама, данными массива концентрации морского льда NadISST, и наблюдениями за температурой воздуха (рис. 12). Натурные наблюдения показали, что каждому периоду с низкими температурами воздуха зимой и положительной аномалии выноса льда также соответствовало и заглубление перемешанного слоя. В периоды усиленной адвекции льда поток тепла от океана увеличивался в на  $10\text{--}20 \text{ Вт/м}^2$ .

Установлено совпадение между периодами усиленной теплоотдачи АВ и усиленного выноса морского льда и полярных вод из Арктического бассейна под влиянием усилившихся северных потоков в атмосфере, выносивших холодный воздух на акваторию Гренландского и Норвежского морей.

Показано, что, несмотря на интенсивное таяние морского льда в Арктике в последнее десятилетие, в СЕБ наблюдается значительное увеличение солености в верхнем слое Атлантических вод. Считается, что основной вклад в этот процесс вносит изменение динамики Северо-Атлантического субполярного круговорота. Замечено, что в периоды общего повышения солености СЕБ фронтальная зона между субтропическим и субполярным круговоротами сдвигается на юг, увеличивая тем самым соленость Северо-Атлантического течения.

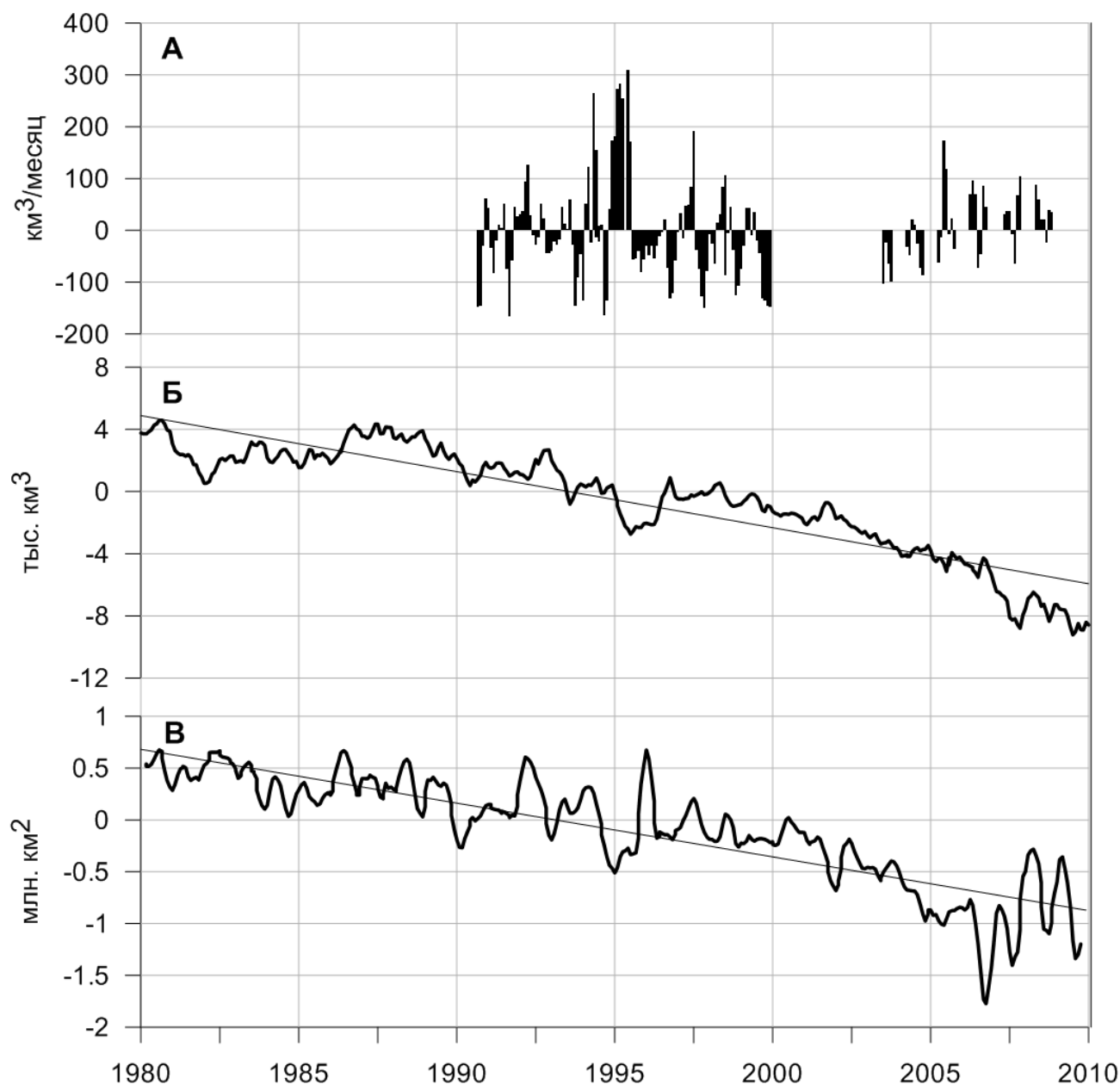


Рисунок 12. Вынос льда через пролив Фрама в  $\text{км}^3/\text{месяц}$  (Spreen et al., 2009) (А), аномалии объема льдов в Арктике (относительно нормы 1979-2009) (Zhang et al., 1995) (Б), аномалии площади ледяного покрова в Арктическом океане, NORSEX (Svendsen et al., 1983) (В)

Заключение о преобладающей роли динамики субполярного круговорота не отрицает возможности того, что интенсификация испарения в тропической Атлантике и усиленный экспорт пресных вод могут модулировать изменение солености Атлантических вод на более длительных временных масштабах. Исследование механизмов, вызывающих изменение солености АВ поступающих в СЕБ из сопредельных регионов, выходит за рамки данной работы. Однако определение фундаментальных причин регулирующих термохалинные характеристики АВ и объем их адвекции является ключевым в понимании динамики глобальной меридиональной циркуляции.

В заключении сформулированы основные выводы работы:

- 1) В массив данных глубоководной океанографической базы добавлено более 100000 океанографических станций. Разработано и запатентовано программное обеспечение ODB3A. Всего в массиве 457666 станций за период с 1900 по 2010 г.
- 2) Разработана новая технология создания массивов поверхностных данных и на ее основе создана база данных по температуре и солености поверхностного слоя океана в СЕБ. Массив содержит более 550000 океанографических станций, прошедших многоступенчатый контроль качества, за период с 1900 по 2010 г.
- 3) Разработана новая технология построения гридированных полей океанографических данных. На основе БД ПС создан массив ТПО в узлах регулярной сетки  $0,25^\circ$  по широте и долготе за 1900–2009 гг. (1111 месячных полей). Сравнение разработанного гридированного массива с существующими и наборами данных по ТПО показало его преимущества.
- 4) Апробированы и выбраны методики расчетов компонентов теплового баланса по историческим данным корабельных наблюдений. По данным корабля погоды «М» рассчитаны временные серии компонентов теплового баланса за период с 1948 по 2008 год. Показано, что основной вклад в межгодовую изменчивость вносят турбулентные потоки тепла. Межгодовая изменчивость радиационных потоков невелика.
- 5) Выделены периоды положительных и отрицательных аномалий общего потока тепла. В конце 1960-х, середине 1980-х и середине 1990-х годов наблюдалась повышенная отдача тепла океаном, а 70-е годы, конец 80-х и середина 2000-х характеризовались повышенным притоком тепла в океан.
- 6) Выбраны оптимальные алгоритмы определения толщины перемешанного слоя в СЕБ для профилей с низким вертикальным разрешением (более 30 м) и для STD-профилей с высоким разрешением. Определены региональные количественные критерии для конечно-разностного метода определения толщины ВКС.
- 7) Показано, что средние величины температуры и солености в ВКС дают физически более обоснованную характеристику процессам взаимодействия между пограничными слоями океана и атмосферы чем средние характеристики в слоях с фиксированной толщиной.
- 8) Формирование ВКС в точке КПМ зависит от истории его трансформации вверх по потоку АВ, особенно в периоды аномального развития атмосферных процессов над акваторией Северной Атлантики и СЕБ. Долгопериодная изменчивость должна также интерпретироваться с учетом изменения положения фронтальной зоны, расположенной вблизи КПМ.
- 9) Доказана связь (коэффициент корреляции 0,8) между общим потоком тепла и толщиной перемешанного слоя в районе КПМ. В период заглабления ВКС с сентября по декабрь наблюдается близкая к линейной зависимость между увеличением потоков и увеличением толщины ВКС.

В тоже время сильные потоки тепла с января по март не приводят к увеличению толщины перемешанного слоя, что связано с особенностями стратификации и вертикальным распределением солености.

- 10) Подтверждено, что решающую роль в развитии ВКС в период устойчивых атмосферных процессов играет толщина слоя АВ. При повышенной толщине слоя (более 300 м) вовлечение в процесс зимнего конвективного перемешивания большего объема соленых вод способствует увеличению солености/плотности всего ВКС и его аномальному заглублению.
- 11) Показано, что с конца 1990-х годов соленость АВ в верхнем слое СЕБ существенно выросла и соответствует фону, наблюдавшемуся в период глубокой конвекции в конце 1960-х гг. Зимой 2009 года подобные условия отмечались в районе КПМ.
- 12) За период с 1948 по 2009 год в СЕБ выделяются три сильные положительные (1958–1963, 1967–1972, 2002–2009) и две сильные отрицательные (1976–1981, 1992–1997) аномалии солености. Они сопровождалась аномалиями температуры, как правило, такого же знака. Самая сильная положительная аномалия плотности наблюдалась с 1966 по 1969 годы. Формирование аномалий связано, в первую очередь, с периодическим усилением адвекции Полярных вод и морского льда из Арктического бассейна, что приводило к резкому распреснению верхнего слоя и усилению стратификации, препятствующей вертикальному обмену.
- 13) Установлено соответствие между периодами усиленной теплоотдачи АВ, увеличением толщины верхнего квазиоднородного слоя и усиленного поступления морского льда в СЕБ из Арктического бассейна.

## Перечень работ, опубликованных по теме диссертации

- 1) Смирнов А. В., Кораблев А. А. Взаимосвязь между характеристиками перемешанного слоя и потоками тепла на границе раздела океан-атмосфера в Северо-Европейском бассейне // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2011. – № 3 (86). – С. 79–88.
- 2) Власенков Р. Е., Смирнов А. В., Макштас А. П. Оценка потенциального прогрева поверхностного слоя морей Карского и Лаптевых в 2007 и 2008 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2010. – № 2 (85). – С. 35–40.
- 3) Пользовательская оболочка океанографической базы данных. Версия 2.0 (ODV3A-2007\_2.0) // Кораблев А. А., Пнюшков А. В., Смирнов А. В. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610438 от 23.01.2008.
- 4) Smirnov A., Korablev A., Alekseev G., Esau I. Temporal and spatial changes in mixed layer properties and atmospheric net heat flux in the Nordic Seas // IOP Conference Series: Earth Environmental Science. – 2010. – Vol. 13. – 012006. – P. 1–7.
- 5) Кораблев А. А., Пнюшков А. В., Смирнов А. В. Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Северо-Европейском бассейне Арктики // Труды ААНИИ. – 2007. – Т. 447. – С. 85–108.
- 6) Кораблев А. А., Пнюшков А. В., Смирнов А. В. К вопросу о возможности использования данных ERA-40 и NCEP/NCAR реанализов для изучения климата в Северной полярной области // Труды ААНИИ. – 2007. – Т. 447. – С. 44–67.
- 7) Кораблев А. А., Пнюшков А. В., Смирнов А. В. Технология создания баз океанографических данных на примере Северо-Европейского бассейна Арктики // Ученые записки РГГМУ. – 2005. – Т. 1. – С. 89–108.



Подписано в печать 04.03.2011  
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз. Заказ № 52.

Ротапринт ГУ «ААНИИ».  
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38