

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 551.509.22 : 551.468 (265.1)

ГОРДЕЕВА СВЕТЛАНА МИХАЙЛОВНА

**КРУПНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И
ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель:
доктор географических наук, профессор **Малинин Валерий Николаевич**

Официальные оппоненты:
доктор географических наук, профессор **Угрюмов Александр Иванович**

кандидат географических наук **Педченко Андрей Петрович**

Ведущая организация: **Атлантический научно–исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО)**

Защита состоится " 11 " декабря 2008 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан " 10 " ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук

В.Н. Воробьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вследствие истощения рыбных запасов в районах традиционного промысла, обеспечение населения страны морепродуктами без их добычи в океанических районах за пределами собственной экономической зоны и экономических зон иностранных государств стало практически невозможно. В «Морской доктрине» России, утвержденной Президентом России в июле 2001 г. говорится о необходимости расширения масштабов исследований и возобновления промысла в открытой части Мирового океана и, прежде всего, в юго-восточной части Тихого океана (ЮВТО). Поэтому перед российской промысловой океанологией была поставлена задача научного обеспечения российского промысла в данном районе океана, тем более что в последние годы началось интенсивное освоение этого района промысловыми судами Китая, Японии, Кореи и других стран.

Последние исследования района ЮВТО (Промыслово-океанологические исследования в Атлантическом океане и южной части Тихого океана..., 2002; Сирота, Лебедев, 2003; Бендик, Яковлев, 2007) в основном касались биологических факторов формирования промысла, из абиотических факторов рассматривались поля атмосферных характеристик, динамической топографии поверхности, доступной потенциальной энергии океана. Однако, температура воды, являющаяся важнейшим абиотическим фактором формирования рыбопромысловых запасов, изучалась недостаточно (Сирота, Андрианов, 2002).

Следует отметить, что океанологическая изученность района ЮВТО до последнего времени оставалась крайне слабой, поскольку большое количество экспедиционных наблюдений сильно разрозненны в пространстве и во времени и их обобщение до сих пор полностью не проведено. В последнее десятилетие в открытом доступе в сети Интернет появилось большое количество глобальных архивов гидрометеорологической информации климатического масштаба, которую можно использовать для решения различных научных задач с применением современных методов многомерного статистического анализа.

Таким образом, **актуальность работы** заключается в назревшей необходимости исследований формирования температурного поля в регионе юго-восточной части Тихого океана на основе регулярных, оперативно пополняемых материалов наблюдений, находящихся в свободном доступе в сети Интернет.

Цель работы: исследование пространственно-временной структуры температуры поверхности юго-восточной части Тихого океана и её долгосрочный прогноз.

Исходя из поставленной цели, решались следующие **задачи:**

- Сравнительный анализ качества имеющихся в свободном доступе архивов информации о температуре поверхности океана (ТПО).
- Районирование акватории ЮВТО по характеру межгодовых колебаний температуры поверхности океана.

- Разбиение межгодовой изменчивости ТПО на градации.
- Выявление в годовом ходе ТПО климатических сезонов.
- Выделение на акватории ЮВТО субтропического гидрологического фронта в поле температуры и анализ его пространственно-временной изменчивости.
- Типизация полей аномалий ТПО, их распознавание и оценка связи с климатическими феноменами региона: Эль-Ниньо и Антарктическим колебанием.
- Разработка методов долгосрочного прогноза ТПО с различной заблаговременностью и их верификация на независимом материале.

Материалы и методы. Основой работы послужили данные о температуре поверхности океана и других гидрометеорологических характеристиках, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет.

Для выполнения всех поставленных задач использовался комплекс методов многомерного статистического анализа (МСА): анализ главных компонент, факторный, кластерный и дискриминантный анализ, множественная линейная регрессия, а также теория проверки статистических гипотез и анализ временных рядов.

Научная новизна. Впервые для южного промышленного района ЮВТО выполнено районирование по изменчивости межгодовых колебаний ТПО, для каждого из районов определены репрезентативные точки и для них выявлены особенности временной изменчивости ТПО, а также выделены естественные границы сезонов года и градации в межгодовой изменчивости ТПО на основе нового подхода, основанного на кластерном анализе.

Впервые выявлены закономерности внутригодовых и межгодовых колебаний пространственно-временной изменчивости южного субтропического фронта, а также основные моды состояний фронта и тенденции их изменений.

Впервые выделены основные типы полей аномалий ТПО и рассмотрена их сопряженность с региональными климатическими индексами (Эль-Ниньо–Южное Колебание и Антарктическое Колебание), получена оценка качества распознавания полей аномалий ТПО по типам.

Впервые разработан и верифицирован на независимом материале комплекс методов физико-статистического долгосрочного прогноза ТПО: прогноз среднемесячных значений ТПО с заблаговременностью от 8 месяцев до 2 лет, прогноз среднегодовых значений ТПО с заблаговременностью 1 и 2 года.

На защиту выносятся:

1. Закономерности пространственно-временной изменчивости температуры поверхности юго-восточной части Тихого океана.
2. Особенности крупномасштабной изменчивости южного субтропического фронта.
3. Типизация полей аномалий ТПО, особенности временной изменчивости типов и их связь с региональными климатическими индексами.
4. Комплекс методов долгосрочного прогноза сезонной и межгодовой изменчивости ТПО с заблаговременностью от 8 месяцев до 2 лет.

Практическая значимость работы. В целях обслуживания активного рыбного промысла в регионе ЮВТО результаты работы могут быть использованы при разработке стратегии вылова рыбы на основе пространственного распределения и прогноза характеристик термического состояния акватории в конкретных промысловых районах.

Разработанный комплекс физико-статистических методов долгосрочного прогноза ТПО разной заблаговременности применяется в практике лаборатории промысловой океанологии АтлантНИРО, а рассчитанные характеристики южного субтропического фронта (временные ряды интенсивности и положения фронта на каждом меридиане) могут быть использованы в качестве исходных данных для долгосрочного прогноза гидрометеорологических характеристик.

Апробация работы. Отдельные части и работа в целом докладывались и обсуждались на семинарах кафедры промысловой океанологии и охраны природных вод Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) и лаборатории промысловой океанологии АтлантНИРО; на ежегодных сессиях Ученого совета РГГМУ; на XIII (Светлогорск, 2005) и XIV (Светлогорск, 2008) Конференциях по промысловой океанологии и промысловому прогнозированию.

Личный вклад автора. Подготовка архивов информации, проведение статистических расчетов; выполнение необходимых графических построений, обобщение и анализ результатов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 2 коллективные монографии, в которых подробно разработана методология статистического исследования и физико-статистического долгосрочного прогноза. В рецензируемых журналах (по Перечню ВАК) опубликована 1 статья, 2-я – принята к печати.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и библиографического списка использованных источников и литературы. Текст изложен на 171 странице и включает 34 таблицы, 55 рисунков. Список литературы содержит 98 наименований, из которых 18 – на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования.

Первая глава посвящена исследованию пространственно-временной изменчивости температуры поверхности океана на исследуемой акватории.

В разделе 1.1 обосновывается выбор района исследования, как имеющего важное рыбопромысловое значение. С 1979 по 1991 гг. включительно, в южной части Тихого океана СССР велся стабильный крупномасштабный промысел с годовым выловом рыбы около 1 млн.т. (Результаты рыбохозяйственных исследований..., 2003). Практически единственным промысловым объектом в районе ЮВТО являлась перуанская ставрида (Chilean Jack Macker-

erel (*Trachurus murphyi*). Научно-поисковыми и исследовательскими работами было установлено (Елизаров и др., 1992), что в полосе широт 30-40° ю.ш. в части Тихого океана от Чили до Новой Зеландии существует так называемый «ставридный пояс» – гиперпопуляция ставриды, биомасса которой по различным оценкам составляла десятки миллионов тонн (рисунок 1). Дальнейшие исследования показали (Report of Workshop SPRFMO, 2008) что основное влияние на формирование промысловых скоплений ставриды в ЮВТО оказывают такие океанографические факторы, как распределение поверхностной температуры воды и особенности циркуляции вод. В качестве объекта исследования принят район юго-восточной части Тихого океана в границах 101 – 73° з.д., 25 – 50° ю.ш., близкий Южному промысловому подрайону промысла (см. рисунок 1), характерной особенностью которого является возможность осуществления там круглогодичного лова (Аналитический обзор по району ЮТО, 2001).

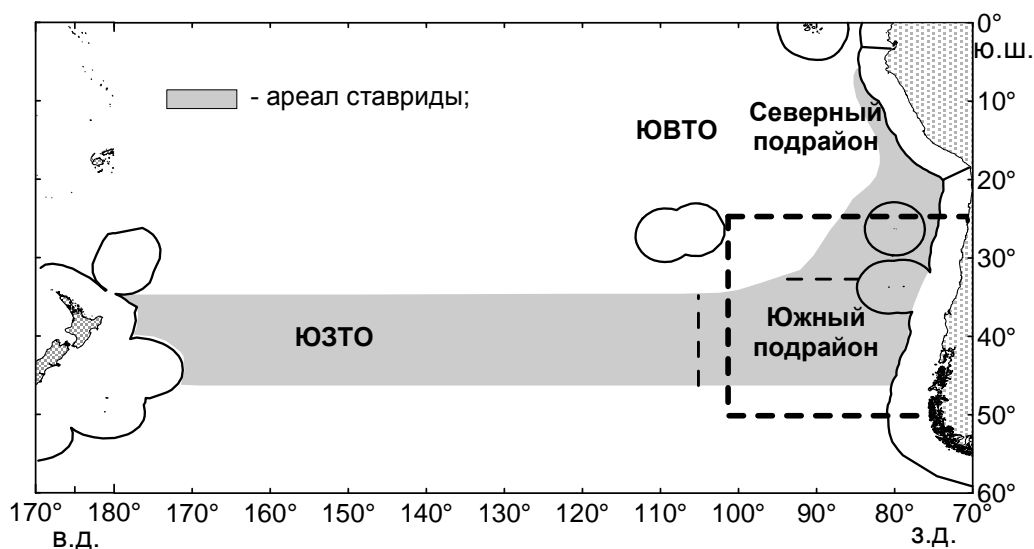


Рисунок 1 – Ареал распространения ставриды в южной части Тихого океана и выбранный район исследований (пунктирная линия)

В разделе 1.2 рассматривается океанологическая характеристика района ЮВТО по литературным источникам: расположение и параметры гидрологических структур, особенности циркуляции вод (Гидрология Тихого океана, 1968; Бурков В.А, 1972, 1980; Tomczak, Godfrey, 2003 и др.), фронтальные зоны (Belkin, Gordon, 1996; Грузинов, 1975; Зацепин и др, 1984; Кошляков, Тараканов, 2005 и др.), климатическое распределение температуры и солёности в трехмерном пространстве и характеристика водных масс (Кошляков, Тараканов, 2005; Гордеева, Малинин, Чернышков, 2007).

Раздел 1.3 посвящен сравнительному анализу архивов данных о температуре поверхности океана. Выбранный нами регион ЮВТО недостаточно освещён экспедиционными данными, поэтому для исследования должны быть привлечены данные регулярных, оперативно пополняемых материалов наблюдений ТПО, находящихся в свободном доступе в сети Интернет – архивы CDAS (NOAA NCEP/NCAR Reanalysis); COADS (ERSST); Рейнольдса-

Смита (RESM); UKMO (United Kingdom Meteorological Office); CARTON-GIESE SODA. При оценке репрезентативности данных архива CDAS была выявлена их явная нестационарность по мат. ожиданию и дисперсии, разбивающая ряды на два периода: до и после 1981 года. Очевидно, это вызвано введением в последний период времени в алгоритмы ассимиляции наблюдений спутниковой информации, повышающей точность данных. Сравнение информации о ТПО архива CDAS с архивами COADS и UKMO показали их значимые различия на всем исследуемом промежутке времени, а с архивом RESM – высокое соответствие по корреляции и основным статистическим критериям (за период с 1982 по 2006 гг.). Климатическое распределение среднего значения ТПО на акватории ЮВТО для разных архивов адекватно отражает картину циркуляции в исследуемом регионе: квазиширотное распределение ТПО и заток холодной воды к северу вдоль побережья Чили с Перуанским течением. К Перуанскому течению приурочена и зона максимальной внутригодовой изменчивости, а межгодовая изменчивость ТПО максимальна в области южного субтропического фронта.

Раздел 1.4 посвящен классификации крупномасштабных колебаний температуры поверхности океана на акватории ЮВТО. Одним из результатов классификации явилось районирование акватории ЮВТО по характеру межгодовых колебаний, которое выполнялось двумя способами: на основе факторного анализа и с помощью кластерного анализа (иерархический алгоритм Уорда с аналогом евклидовой метрики $d = 1 - R$, где R – коэффициент корреляции между точками сеточной области).

Факторное разложение показало, что первые пять факторов в сумме описывают 65,5 % дисперсии поля ТПО. Таким образом, акватория делится на пять районов, пространственное расположение которых имеет широтную направленность. На дендрограмме иерархической классификации также можно выделить пять классов, однако для кластерного анализа характерна меридиональная конфигурация выделенных районов. Оба метода характеризует одинаковое качество, что затрудняет выбор оптимального районирования.

Если рассмотреть совмещенные границы районов для обеих классификаций (рисунок 2), выделяются области спорной классификации, которые можно идентифицировать, как фронтальные разделы, характеризующиеся локальными особенностями изменчивости и географически приуроченные к границам региональных меандров циркуляции (Бурков, 1972).

В каждом из районов был определен статистический центр в точке, ТПО в которой имеет максимальную корреляцию со средними значениями ТПО в своем районе (исключая области спорной классификации).

Для статистических центров пяти районов ЮВТО кластерным анализом (на основе евклидовой метрики) осуществлено выделение квазиоднородных сезонов ТПО (таблица 1).

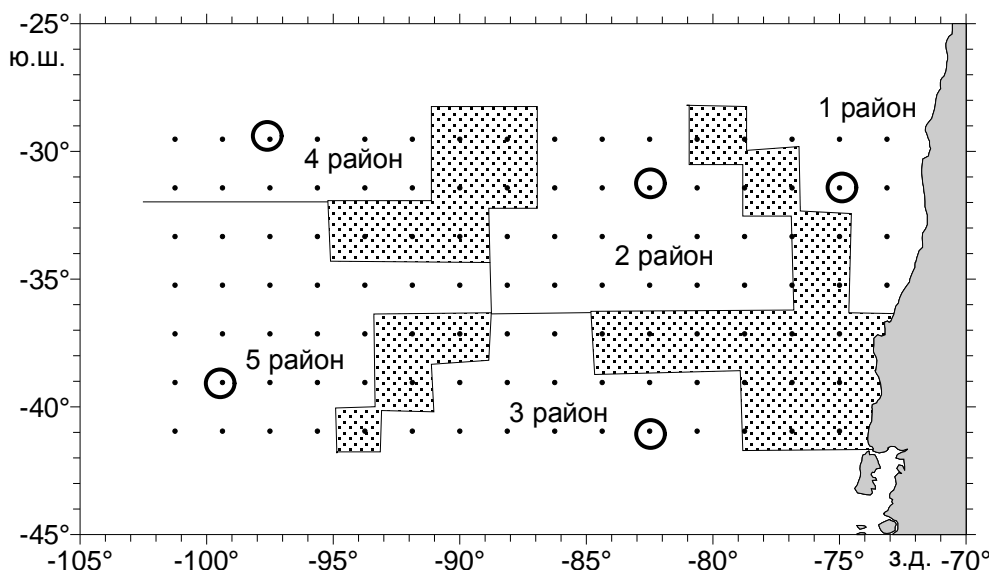


Рисунок 2 – Сопоставление результатов классификации ТПО методами кластерного и факторного анализов. Области спорной классификации заштрихованы. Окружностью выделены статистические центры.

Таблица 1 – Иерархическая структура разбиения месяцев в годовом ходе ТПО на квазиоднородные сезоны для разных районов ЮВТО.

Районы	Лето	Осень	Зима	Весна
1	I – IV	V, VI	VII – X	XI, XII
2	I – IV	V, VI, VII	VIII – X	XI, XII
3	I – IV	V, VI	VII – X	XI, XII
4	I – IV	V, VI, VII	VIII – X	XI, XII
5	I – IV	V, VI	VII – X	XI, XII

В годовом ходе ТПО выделяются холодный и теплый периоды года. В северных районах теплый период на два месяца длиннее (с декабря по май), чем в южных (с января по апрель). При этом во всех районах одинаковое лето (с января по апрель), а зима на севере региона начинается в августе, а на юге – в июле, заканчиваясь одинаково – в октябре. Остальные месяцы относятся к переходным сезонам года.

Так же для каждого из статистических центров пяти выделенных районов ряд среднегодовых значений ТПО с помощью кластерного анализа разбит на градации в соответствии с квазиустойчивыми состояниями, условно названными «норма», «выше нормы» и «ниже нормы» (таблица 2). В отличие от классического подхода, основанного на нормальном законе распределения, где градации определяются в долях стандартного отклонения, здесь размеры градаций различны и зависят от естественной изменчивости ряда. В большинстве случаев среднее значение ряда попадает в градацию «норма». Исключение составляют 3 и 5-й районы, где среднее значение ряда попадает на границы между градациями, что отражает значительную асимметрию эмпирической функции распределения (ЭФР) для этих рядов. Таким образом, разбиение на градации с помощью подхода, основанного на кластерном ана-

лизе, позволяет рассматривать временную изменчивость квазиустойчивых состояний ТПО, связанных с модами ЭФР.

Таблица 2 – Разбиение среднегодовых значений ТПО с 1982 по 2007 гг. по градациям для районов ЮВТО (НН – ниже нормы, Н – норма, ВН – выше нормы)

Параметры	В целом	Г р а д а ц и и		
		НН	Н	ВН
Район 1				
Число случаев	26	10	9	7
Среднее, °С	18,46	18,20	18,51	18,77
Район 3				
Число случаев	26	6	6	14
Среднее, °С	13,57	13,14	13,50	13,79
Район 5				
Число случаев	26	12	10	4
Среднее, °С	14,60	14,34	14,72	15,09
Район 2				
Число случаев	26	9	5	12
Среднее, °С	18,36	18,07	18,31	18,59
Район 4				
Число случаев	26	7	13	6
Среднее, °С	20,70	20,36	20,73	21,05

В разделе 1.5 рассматриваются особенности крупномасштабной изменчивости южного субтропического фронта (ЮСФ). В пространственной области, ограниченной 99,5° и 77,5° з.д. и 20,5° и 49,5° ю.ш. был выделен южный субтропический фронт (ЮСФ) и определены его характеристики. В качестве основы рассчитывалось поле градиентов температуры с шагом 1° по широте и 2° по долготе по формуле (Девицын и др, 2000):

$$\frac{\Delta T}{\Delta L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{\Delta y}\right)^2},$$

где x, y, L – расстояния в зональном, меридиональном и трансфронтальном направлениях, ΔT – перепад температуры по соответствующему направлению.

За положение фронта принималась точка с максимальным градиентом температуры на каждом меридиане рассматриваемой области. В результате расчетов получены поля среднемесячных оценок интенсивности фронта (I, °С/км) и его пространственного положения (° ю.ш.) за период с 1982 по 2007 гг. Климатические оценки положения ЮСФ представлены на рисунке 3.

В общем, климатическое положение ЮСФ достаточно неплохо согласуется с положением южного субтропического фронта (SSTF) по литературным данным (Belkin, Gordon, 1996), однако в отличие от последнего, ЮСФ не вытянут вдоль широты 40°, а имеет наклон к юго-востоку, а его межгодовая изменчивость максимальна на восточном участке фронта, где интерквантильное расстояние достигает 5° долготы.

Разбиение внутрigoдовой изменчивости характеристик ЮСФ на квази-однородные сезоны с помощью кластерного анализа и последующий анализ показали, что зимой ЮСФ занимает крайнее северное положение на долготе $99,5^\circ$ з.д. (36° ю.ш.), а летом – крайнее южное, на долготе $77,5^\circ$ з.д. (44° ю.ш.). Для переходных сезонов характерно промежуточное положение фронта. Размах пространственного смещения от зимы к лету составляет 5 градусов широты. Что касается интенсивности фронта, то его максимальная интенсивность отмечается летом, а минимальная – зимой. При этом ее абсолютный максимум отмечается на крайнем западе района, а минимум – на крайнем востоке.

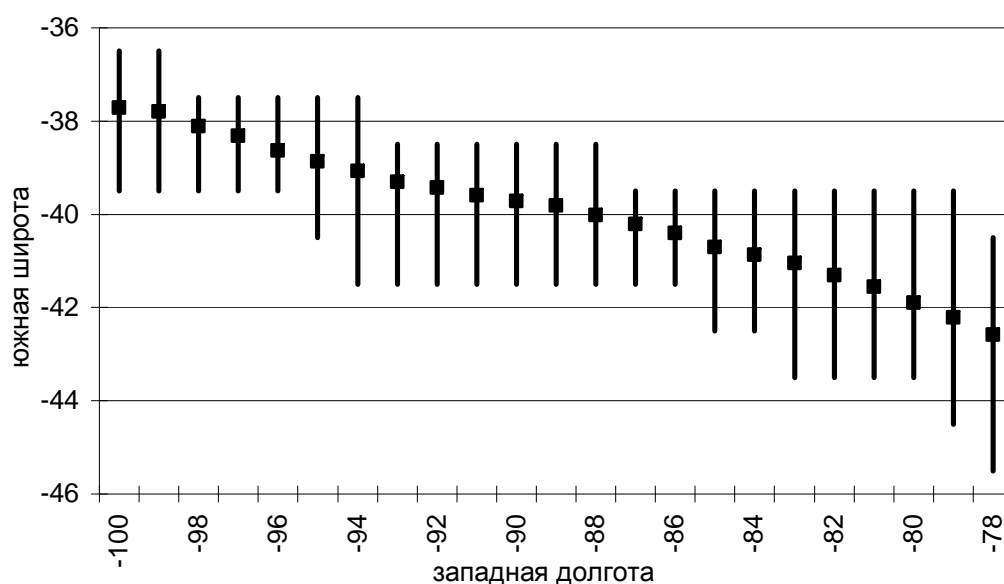


Рисунок 3 – Среднеголетнее положение и квантильный анализ южного субтропического фронта

Для оценки характера межгодовой изменчивости интенсивности и положения ЮСФ для среднегодовых значений этих характеристик проводился анализ главных компонент (ГК), т.е. разложение на естественные ортогональные функции. Первая ГК положения фронта характеризует миграцию всей линии фронта с юга на север, и определяет 62 % дисперсии исходной матрицы. Вторая ГК описывает всего 13 % дисперсии исходного ряда и характеризует поворот фронта к оси северо-запад – юго-восток относительно долготы 89° з.д. Аналогично для интенсивности фронта, первая ГК характеризует его обострение в целом (62 % дисперсии), а вторая – противоположную тенденцию в увеличении градиента ТПО на западе и востоке акватории (20 % дисперсии). Анализ временной изменчивости главных компонент показал наличие у первых ГК нелинейного тренда, который в последнее время характеризуется тенденцией ослабления фронта со смещением его к северу. Временная изменчивость вторых ГК показывает, что каждые 7-8 лет отмечается обострение градиентов на западной периферии ЮСФ с одновременным их ослаблением в восточной части, причем годы таких проявлений следуют сразу же после квазиширотного расположения ЮСФ.

Вторая глава посвящена типизации полей аномалий температуры поверхности океана.

В качестве источника информации о ТПО был использован архив RESM, из которого были выбраны среднемесячные ряды ТПО с января 1982 по апрель 2006 гг. в 540 точках сетки $1^\circ \times 1^\circ$. Из исходных рядов был исключен сезонный ход путем расчета отклонений фактической ТПО от её климатического сезонного хода, рассчитанного за период с 1982 по 2005 гг. Таким образом, была сформирована матрица аномалий ТПО (АТПО) 540 точек \times 292 мес.

На первом этапе (**раздел 2.1**), чтобы отфильтровать случайные (шумовые) колебания, исходная матрица подверглась разложению методом главных компонент. Сходимость разложения оказалась весьма высокой, первые четыре собственных числа описывают 84 % дисперсии поля АТПО, а семь – более 90 %. Точность восстановления АТПО по четырем ГК в среднем по полю меньше $0,1^\circ\text{C}$ и несколько хуже, чем для семи ГК, однако это касается только зоны, расположенной вдоль побережья Южной Америки, где величина ошибки около $0,3^\circ\text{C}$. Этого достаточно, чтобы ограничиться четырьмя ГК.

Максимальные нагрузки 1-й ГК, превышающие 0,9, отмечаются около точки с координатами 45° ю.ш. и 85° з.д. Первая ГК отражает временную изменчивость АТПО центральной части региона ЮВТО. В этом районе некоторыми авторами отмечается устойчивый “пакет” (сообщество разнонаправленных по вращению) океанических вихрей (Яковлев, 2002). Периодограммальный анализ (БПФ) показал, что для первой ГК основными являются колебания с периодом 8 и 4,7 лет, а также 13 и 8 месяцев.

В пространственном распределении 2-го собственного вектора видна четкая оппозиция колебаний АТПО между северо-западной и юго-восточной частями рассматриваемого региона ЮВТО. Для временной изменчивости второй ГК характерно наличие колебаний с периодами 6 лет, 26 и 20 месяцев.

Распределению 3-го собственного вектора свойственна оппозиция между юго-западной и северо-восточной частями рассматриваемого региона ЮВТО. Временная изменчивость 3-й ГК носит преимущественно случайный характер, какие-либо значимые колебания отсутствуют.

Нагрузки 4-й ГК малы. В её временном ходе отмечается значимый тренд, характеризующий охлаждение ТПО в зоне около 40° ю.ш. 80° з.д. Помимо тренда в её временной изменчивости наблюдается довольно хорошо выраженное колебание с периодом 2,7 лет.

Пространственное положение максимальных нагрузок рассмотренных главных компонент в принципе соответствует районированию ТПО, представленному в главе 1. Это свидетельствует о том, что, если исключить сезонный ход, обусловленный радиационным балансом, изменчивость ТПО разного масштаба осреднения (среднегодового и среднемесячного) на акватории ЮВТО имеет одинаковую пространственно-временную структуру.

В **разделе 2.2** рассматривается классификация полей АТПО. Матрица межгодовой изменчивости четырех главных компонент полей АТПО (4×292) подвергалась кластерному анализу на основе евклидовой метрики, так что

каждый класс представлял собой множество фактических полей аномалий ТПО, близких друг к другу по пространственной структуре. Для каждого класса строились некоторое типовое (среднее) поле АТПО, для этого предварительно осуществлялось осреднение значений, вошедших в рассматриваемый класс для каждой из четырех компонент, а затем производилось восстановление среднего (типового) поля АТПО по основному уравнению анализа главных компонент.

На первом шаге классификации все множество полей АТПО разделяется на два класса, из которых первый класс (**A**) представляет собой распределение отрицательных аномалий ТПО, а второй (**B**) – распределение положительных аномалий ТПО, оба с центром около точки с координатами 45° ю.ш. и 85° з.д. Дальнейшее деление класса отрицательных аномалий **A** происходит на третьем шаге, когда первый класс разбивается на два класса **A₁** и **A₂**, а на следующем шаге класс **A₂** делится ещё раз на классы **A₂₋₁** и **A₂₋₂**. Класс с положительными аномалиями **B** на втором шаге делится на классы **B₁** и **B₂**. Таким образом, все множество полей разделяется на пять типов (рисунок 4).

Вообще, классы **B₁** и **B₂** можно, в свою очередь, каждый разделить на два подкласса **B₁₋₁** и **B₁₋₂**, **B₂₋₁** и **B₂₋₂** соответственно, так что общее число типов будет семь. Однако проверка с помощью статистических критериев показала, что различия между классами **B₁₋₁** и **B₁₋₂**, а также **B₂₋₁** и **B₂₋₂** статистически незначимы. Поэтому за основу приняты пять основных типов полей АТПО.

Статистические характеристики для типовых полей аномалий ТПО при делении их на пять классов представлены в таблице 3. Очевидно, что в течение рассматриваемого периода времени преобладали поля положительных АТПО, повторяемость которых составляет в сумме 64 %.

Таблица 3 – Статистические характеристики для типовых полей аномалий ТПО при делении их на пять классов

Характеристика	1 класс (A₁)	2 класс (A₂₋₁)	3 класс (A₂₋₂)	4 класс (B₁)	5 класс (B₂)
Число случаев,	36	32	39	80	105
Число случаев, %	12%	11%	13%	28%	36%
Среднее значение АТПО, °С	-0,23	-0,23	-0,31	0,09	0,20
Станд. отклонение, °С	0,30	0,15	0,20	0,26	0,16
Размах колебаний, °С	1,00	0,61	0,82	0,88	0,64
Максимальная АТПО, °С	0,38	0,02	0,15	0,45	0,46
Минимальная АТПО, °С	-0,63	-0,59	-0,67	-0,43	-0,18

Во внутригодовой изменчивости полей отмечается некоторые особенности, которые могут быть использованы при распознавании. Например, высокая повторяемость полей АТПО класса **A₁** летом, в течение которого они встречаются более, чем в 50 % случаев. В межгодовой изменчивости обращают на себя внимание периоды с 1987 по 1989 год и с 1994 по 1998 год, характеризующиеся отсутствием (или редким появлением) классов более хо-

лодного состояния поверхности океана. Скорее всего, это связано с проявлениями Эль-Ниньо 1987 и 1992–94 гг.

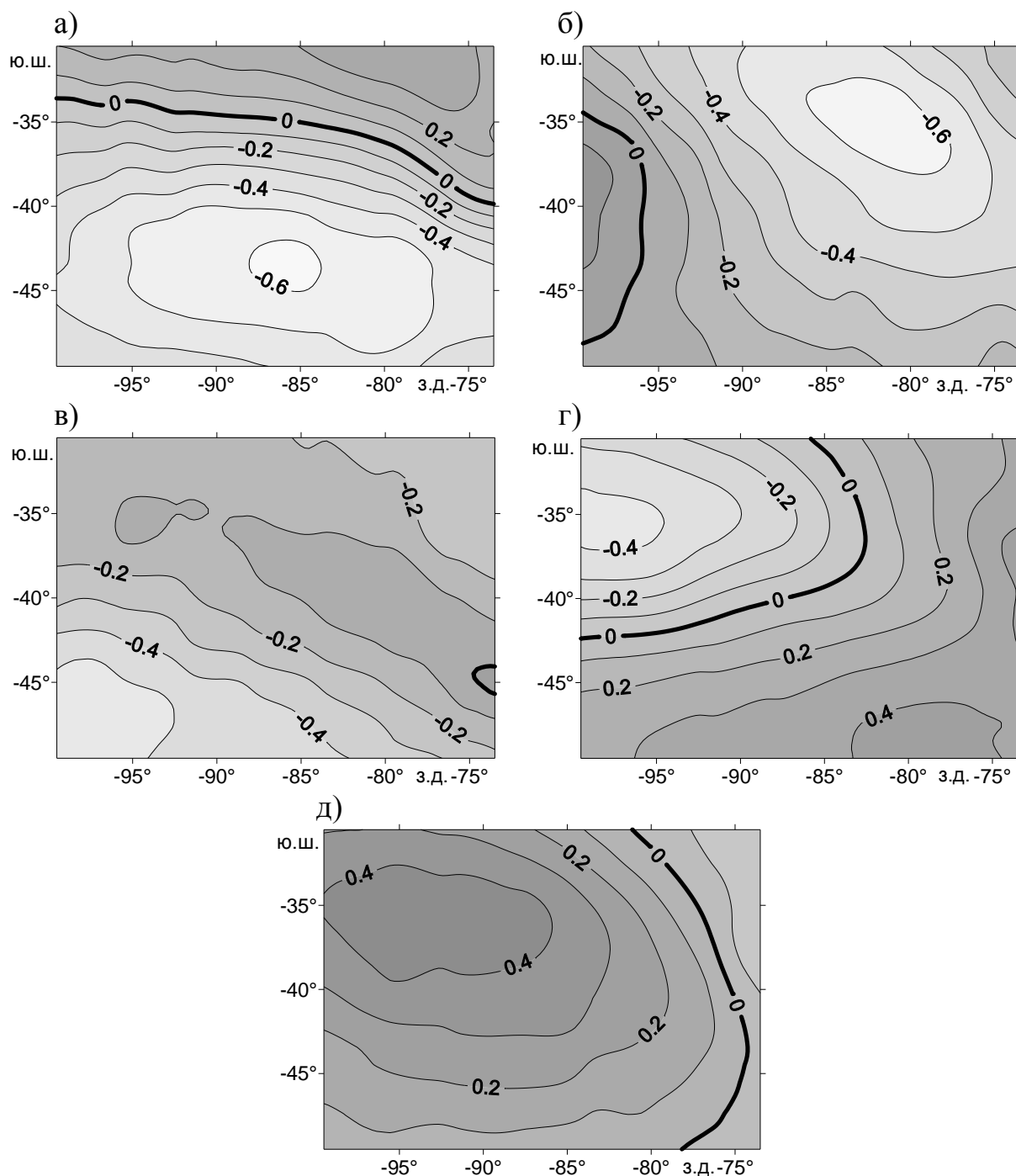


Рисунок 4 – Типовые поля АТПО, соответствующие классам A_1 (а), A_{2-1} (б), A_{2-2} (в), B_1 (г), B_2 (д)

В разделе 2.3 рассматриваются результаты решения задачи распознавания реальных полей АТПО на их соответствие выделенным пяти типам. Для оценки адекватности отнесения фактического поля к какому-нибудь классу существует несколько способов: 1) оценка среднего квадратического расхождения между фактическими и типовыми полями АТПО (СКО–оценка); 2) оценка коэффициента корреляции между фактическими и типовыми полями АТПО; 3) дискриминантный анализ.

Для проведения дискриминантного анализа для каждой ГК определялись экстремальные значения, находящиеся в центрах локальных максимумов и минимумов. Так определились 8 реперных точек, дающих максимальный вклад в формирование ГК, а стало быть, и в формирование поля АТПО. Для матрицы 8×292 мес. осуществлялся пошаговый дискриминантный анализ, который показал достижения оптимальной кластеризации на пятом шаге. Дополнительно проводился дискриминантный анализ на четырех главных компонентах, т.е. для матрицы 4×292 мес.

Сравнение результатов оправдываемости распознавания АТПО разными способами представлено в таблице 4. Наилучший результат в распознавании полей показывает метод СКО-оценок с общей оправдываемостью 88,7 % по всем точкам акватории и 78,0 % для восьми реперных точек. Также неплохой результат у метода дискриминантных функций – 85% для 4-х главных компонент и 76,5 % для восьми реперных точек. Хуже всего происходит распознавание полей методом пространственной корреляции.

Таблица 4 – Сравнение результатов оправдываемости распознавания АТПО разными способами

Характеристика	A ₁	B ₁	B ₂	A ₂₋₁	A ₂₋₂	В целом
СКО-оценки по всему полю						
Всего случаев	36	80	10 5	32	39	292
Число не оправдавшихся случаев	7	6	6	11	3	33
Оправдываемость, %	81	93	94	66	92	89
Корреляционный анализ						
Число не оправдавшихся случаев	6	13	52	11	8	90
Оправдываемость, %	81	85	51	72	84	69
СКО-оценки по 8 опорным точкам						
Число не оправдавшихся случаев	5	16	24	11	8	64
Оправдываемость, %	86	80	77	72	84	78
Дискриминантный анализ на 8 опорных точках						
Число не оправдавшихся случаев	10	19	19	7	14	69
Оправдываемость, %	72	77	82	78	64	76
Дискриминантный анализ на 4 главных компонентах						
Число не оправдавшихся случаев	5	15	8	7	10	45
Оправдываемость, %	86	86	90	78	74	85

В разделе 2.4 проводится оценка связи повторяемости полей АТПО основными климатическими процессами, происходящими в этом регионе, в частности, с явлением Эль-Ниньо, характеризуемым индексом Южного колебания (ЮК) и циркумполярным геострофическим переносом массы в атмосфере (Антарктическое колебание, АК). Оказалось, что в периоды проявле-

ния сильного Эль-Ниньо ($ЮК < 2$) и в течение последующих двух лет на акватории ЮВТО преобладают типы полей с положительными аномалиями ТПО: сначала полгода класс \mathbf{B}_1 , затем через полгода – \mathbf{B}_2 . И наоборот, перед возникновением Эль-Ниньо с заблаговременностью 4-8 месяцев, с вероятностью значительно выше средней, отмечаются поля класса \mathbf{A}_{2-1} . Для случаев экстремальных состояний атмосферной циркуляции в приантарктической зоне ($AK > |1|$) характерно, что через 16-18 месяцев в ЮВТО отмечается перестройка полей ТПО. При усилении зональной циркуляции появляются поля класса \mathbf{B}_1 , при повышении меридиональности атмосферного потока – поля класса \mathbf{A}_1 .

В начале **третьей главы (разделы 3.1 и 3.2)** рассматривается классификации прогнозов, проводится теоретическое обоснование физико-статистического метода и обсуждаются особенности применения метода множественной линейной регрессии в качестве инструмента для построения прогностических моделей.

В **разделах 3.3–3.5** обсуждается разработка и верификация комплекса моделей долгосрочного прогноза ТПО, средней для квадрата $38-42^\circ$ ю.ш. и $78-82^\circ$ з.д., характеризующегося наибольшим выловом ставриды (Аналитический обзор..., 2001; SPRFMO, 2007). В пределы этого района также попадает статистический центр 3-го района (см. главу 1).

В составе комплекса долгосрочных прогнозов ТПО были построены модели прогноза среднегодовых значений ТПО с заблаговременностью 1 и 2 года соответственно

$$\text{ТПО}_{i+1} = b_0 + b_1L_{4i} + b_2L_{11i} - b_3L_{12i}, \quad (1)$$

$$\text{ТПО}_{i+2} = b_0 + b_1L_{2i} - b_2L_{16i} - b_3L_{10i}, \quad (2)$$

где i – момент времени в годах; $L_2, L_4, L_{10}, L_{11}, L_{12}, L_{16}$ – смещение ЮСФ на долготе $98,5, 96,5^\circ, 90,5^\circ, 89,5^\circ, 88,5^\circ$ и $84,5^\circ$ з.д. соответственно; b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессии.

Долгосрочный прогноз сезонного хода ТПО осуществлялся на основе нескольких подходов.

1. Балансовый подход, с заблаговременностью 8 месяцев:

$$\text{ТПО}_{(i+8)} = b_0 - b_1R_{0i} + b_2R_{0i}^2. \quad (3)$$

где i – момент времени в месяцах; R_0 – радиационный баланс поверхности океана; b_0, b_1, b_2 , – коэффициенты регрессии.

2. Подход на основе прогноза среднегодовой ТПО (модели 1 и 2) с заблаговременностью 1 и 2 года:

$$\text{ТПО}_{(k+1, i)} = \text{ТПО}'_{(k+1)} + \text{АТРО}_{\text{клим}(i)} \quad (4.1)$$

$$\text{ТПО}_{(k+2, i)} = \text{ТПО}'_{(k+2)} + \text{АТРО}_{\text{клим}(i)} \quad (4.2)$$

где $\text{ТПО}'_{(k+1)}$ – прогностическое среднегодовое значение ТПО на год $k+1$ (по модели 1); $\text{ТПО}'_{(k+2)}$ – прогностическое среднегодовое значение ТПО на год $k+2$ (по модели 2); $\text{АТРО}_{\text{клим}(i)}$ – значения климатического годового хода ТПО в i -тый месяц в отклонениях от среднего многолетнего значения.

3. Прогноз на основе метода главных компонент. Процедура этого подхода включает следующий алгоритм:

- 1) из временного ряда ТПО формируется матрица $12 \text{ мес} \times N \text{ лет}$;
- 2) матрица подвергается разложению на главные компоненты;
- 3) выполняется физико-статистический прогноз первых главных компонент на 1 год вперед:

$$f_i^{(1)} = \varphi_1 (Z_{(i-\tau)k}), \quad k = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$f_i^{(2)} = \varphi_2 (Z_{(i-\tau)k}), \quad k = \overline{1, p}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где Z – предиктор, τ – временной сдвиг, т.е. заблаговременность прогноза, p – число предикторов, i – момент времени в годах;

- 4) восстанавливаются значения ТПО на прогнозируемый год:

$$T_{ij} = (a_j^{(1)} f_i^{(1)} + a_j^{(2)} f_i^{(2)}) \sigma_j + \bar{X}_j, \quad j = \overline{1, 12}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

где \bar{X}_j , σ_j – соответственно среднее значение и стандартное отклонение температуры воды в j -й месяц, $a_j^{(1)}$, $a_j^{(2)}$ – оценки первого и второго собственных векторов разложения, $f_i^{(1)}$, $f_i^{(2)}$ – прогностические значения первой и второй главных компонент, i – момент времени в годах.

Анализ главных компонент для матрицы временного хода ТПО показал, что две первые ГК описывают 66 % дисперсии всей изменчивости. Вторая ГК характеризует летний сезон (декабрь-февраль), а первая ГК – остальные месяцы года. Для региона ЮВТО, характеризующегося интенсивной циркуляцией вод, в качестве предикторов для прогноза главных компонент (модели 5 и 6) выбраны значения ТПО «вверх по потоку» от района прогноза, т.е. на западе и северо-западе акватории с опережением в 12 месяцев.

Восстановление исходных данных по формуле (7) позволяет получить значения ТПО на каждый месяц прогнозируемого года, их осреднение дает оценку среднегодового прогноза ТПО.

Качество всех моделей комплекса прогнозов оценивалось на зависимой (с 1982 по 2003 гг.) и независимой (с 2004 по 2007 гг.) выборках по различным критериям. Характеристики качества моделей рассчитаны по «Методическим указаниям...» (РД 52.27.284 –91).

В частности, критерий Багрова показывает несмещенную оценку оправдываемости и характеризует преимущество методического прогноза перед случайным и рассчитывается как

$$H = \frac{F - F_0}{1 - F_0}, \quad F_0 = \frac{n_{\phi+} n_{\text{пр}+} + n_{\phi-} n_{\text{пр}-}}{N^2}$$

где F_0 – оправдываемость случайных прогнозов; $n_{ф+}$ и $n_{ф-}$ – количество положительных и отрицательных (соответственно) фактических отклонений от нормы; $n_{пр+}$ и $n_{пр-}$ – количество положительных и отрицательных (соответственно) прогностических отклонений от нормы.

Прогнозы с $H < 0,33$ являются ненадежными.

Показатель успешности прогнозов $\rho = \frac{n_{опр} - n_{неопр}}{N}$ (где $n_{неопр}$ – количество неоправдавшихся по знаку прогнозов в отклонениях от нормы) показывает их успешность, если $\rho > 0$. Мастерство метода S определяется по отношению к климатическому (или инерционному) прогнозу. Положительные значения S свидетельствуют о преимуществе методического прогноза перед климатическим (инерционным).

В таблице 5 приведены характеристики качества прогноза среднегодовых значений ТПО с заблаговременностью 1 и 2 года для независимой выборки. Все модели прогноза среднегодовой ТПО имеют одинаково хорошее качество и значительно лучше инерционного и климатического прогнозов. Мастерство метода относительно инерционного прогноза составляет 46–51%, а климатического – 34–41%. Стандартная ошибка моделей не превышает 0,2 °С, что сопоставимо точностью измерений. Относительная ошибка мала и составляет 61–63%. Оправдываемость прогнозов по знаку высока – 72–87%, а обеспеченность по $\pm\sigma$ (более 90 %) значительно превышает природную и инерционную обеспеченности, которые равны и составляют 68 %. Во всех случаях критерий Багрова существенно превышает 0,33, что свидетельствует о надежности прогнозов.

Таблица 5 – Характеристики качества прогностических моделей средней годовой ТПО на независимой (2004–2007 гг.) выборке

Модель	(1)	(2)	ГК
Стандартная ошибка модели, $\sigma_{y(x)}$, °С	0,19	0,17	0,19
Стандартная ошибка независимого прогноза σ_{ϵ} , °С	0,21	0,13	0,20
Относительная ошибка прогноза, $k = \sigma_{y(x)}/\sigma$, °С	0,63	0,61	0,61
Стандартная ошибка климатического прогноза, $\sigma_{y(x)клим}$, °С	0,29	0,29	0,29
Мастерство метода, $S_{клим} = 1 - \sigma_{y(x)}/\sigma_{y(x) клим}$	0,34	0,41	0,34
Стандартная ошибка инерционного прогноза, $\sigma_{y(x)инерц}$, °С	0,35	0,35	0,35
Мастерство метода, $S_{инерц} = 1 - \sigma_{y(x)}/\sigma_{y(x) инерц}$	0,46	0,51	0,46
Оправдываемость (по знаку), P	0,72	0,87	0,76
Оправдываемость (по $\pm\sigma$)	0,90	1,00	0,90
Показатель ρ	0,44	0,74	0,52
Критерий Багрова	0,43	0,74	0,52

Таблица 6 представляет качество прогнозов среднемесячных значений ТПО с заблаговременностью от 8 месяцев до 2 лет. Самое плохое качество показал прогноз балансовым методом (модель 3), все характеристики качества которого неудовлетворительны. Скорее всего, это связано с тем, что в данной модели не учитывается адвекция тепла течениями, которая, возможно, вносит существенный вклад в формирование теплового баланса поверхностного слоя океана в данном районе. Несколько лучшие результаты получаются при прогнозе на основании среднегодовой ТПО (модели 4).

Таблица 6 – Характеристики качества прогностических моделей сезонного хода ТПО

Модель	(3)	(4.1)	(4.2)	ГК
Стандартная ошибка модели, °С	0,52	–	–	0,36
Стандартная ошибка независимого прогноза, $\sigma_{y(x)}$, °С	0,53	0,44	0,40	0,31
Стандартная ошибка климатического прогноза, $\sigma_{y(x) \text{ клим}}$, °С	0,47	0,47	0,47	0,47
Относительная ошибка прогноза $Q = \sigma_{y(x)} / \sigma_{y(x) \text{ клим}}$, °С	1.13	0.94	0.85	0.66
Мастерство метода, $S_{\text{клим}} = 1 - \sigma_{y(x)} / \sigma_{y(x) \text{ клим}}$	–0,18	0,0	0,09	0,23
Оправдываемость (по знаку), P	0,42	0,75	0,44	0,77
Оправдываемость (по $\pm \sigma$) (независ. дан.)	0,57	0,75	0,54	0,83
Показатель ρ	–0,17	0,50	–0,11	0,54
Критерий Багрова	–0,16	0,66	–0,12	0,55

При прогнозе сезонного хода ТПО наиболее успешным по всем критериям оказался метод восстановления среднемесячной ТПО по прогностическим значениям главных компонент. Он показал низкую относительную ошибку (менее 0,76), хорошее «мастерство метода» относительно климатического прогноза (порядка 20%), и высокую оправдываемость по знаку (более 70%). Обеспеченность прогноза по $\pm \sigma$ значительно превышает природную (на 19 % для независимой выборки) и составляет 83 %. Критерий Багрова значительно больше 0,33, что говорит о надежности метода.

Такие результаты обусловлены тем, что в рамках метода учитываются следующие факторы: 1) разный среднегодовой уровень сезонной изменчивости, получаемый при прогнозе 1-й главной компоненты; 2) разная амплитуда внутригодовых колебаний, определяемая прогнозом 2-й главной компоненты; 3) отсутствие шумовых (случайных) влияний, отфильтрованных методом главных компонент. Кроме того, успешность этого метода определяется и выбором в качестве предикторов характеристик адвективной составляющей теплового баланса поверхности океана, которая в значительной степени определяет изменчивость ТПО. Можно считать этот метод наиболее адекват-

ным при прогнозе среднемесячных значений ТПО в исследуемом регионе ЮВТО.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. На основе сравнительного анализа различных глобальных архивов данных о температуре поверхности океана, находящихся в свободном доступе в сети Интернет можно отметить, что до 1981 года информация о ТПО является нерепрезентативной. Целесообразно использовать данные о ТПО с 1982 года, которые показывают хорошую сопряженность для различных архивов.

2. Установлено, что по характеру межгодовых колебаний ТПО акватория ЮВТО разделяется на пять квазиоднородных районов, границы между которыми связаны с особенностями локальной циркуляции вод.

3. С помощью кластерного анализа матрицы временной изменчивости ТПО выявлено, что для северных районов акватории в годовом ходе ТПО с декабря по май выделяется теплый период, а зима продолжается с августа по октябрь. Южным районам свойственен более короткий теплый период – с января по апрель, и более длинная зима – с июля по октябрь.

4. Кластерный анализ межгодовой изменчивости ТПО для всех районов акватории позволил естественным образом разделить среднегодовые значения ТПО на три градации: норма, выше нормы и ниже нормы, причем повторяемость случаев в каждом классе и их границы для каждого района различны и зависят от формы эмпирической функции распределения.

5. Южный субтропический фронт располагается в полосе широт 36-39° ю.ш. на западе акватории и 41-44° ю.ш. – на востоке. Летом он наиболее интенсивен и занимает крайнее южное положение, а зимой – выражен более слабо и находится севернее. Выявлено наличие двух мод в межгодовом ходе положения фронта: 1-ая мода характеризует миграцию всей линии фронта с юга на север; 2-ая – поворот фронта к оси северо-запад – юго-восток относительно долготы 89° з.д. Аналогично для интенсивности фронта, первая мода показывает его обострение в целом, а вторая – противоположные тенденции в величине градиента ТПО в западной и восточной частях акватории. Во временной изменчивости первых мод присутствует нелинейный тренд, который в последние годы характеризуется тенденцией ослабления фронта со смещением его к северу.

6. В полях аномалий ТПО с помощью кластерного анализа выделено два теплых и три холодных типа, причем в целом повторяемость теплых состояний в два раза больше, чем холодных. Отрицательные аномалии ТПО имеют большую вероятность появления в летние месяцы, а положительные аномалии проявляются относительно равновероятно в течение всего года. В межгодовой изменчивости типов отмечаются длительные периоды отсутствия полей отрицательных аномалий ТПО, приуроченные к периодам интенсивного Эль-Ниньо.

7. Установлено, что при распознавании реальных полей аномалий ТПО различными методами, наилучший результат показывает метод СКО-оценок

с общей оправдываемостью 88,7 % по всем точкам акватории и 78,0 % для восьми реперных точек. Удовлетворительный результат показал также дискриминантный анализ (76,5 %), используемый для восьми реперных точек.

8. В периоды проявления сильного Эль-Ниньо (1982-83; 1986-87; 1992-94; 1997-98; 2002 и 2004 гг.) и в течение последующих двух лет на акватории ЮВТО, как правило, преобладают типы полей с положительными аномалиями ТПО. И, наоборот, перед возникновением Эль-Ниньо с заблаговременностью 4-8 месяцев, с вероятностью значительно выше средней отмечаются поля с отрицательными аномалиями ТПО.

9. После возникновения экстремальных значений Антарктического колебания через 16-18 месяцев в ЮВТО отмечается перестройка полей ТПО. В случае усиления зональной атмосферной циркуляции появляются поля положительных аномалий, при повышении меридиональности атмосферного потока – поля отрицательных аномалий ТПО.

10. Разработаны физико-статистические модели прогноза среднемесячных и среднегодовых значений ТПО для квадрата 38-42° ю.ш. и 78-82° з.д. с заблаговременностью от 8 месяцев до 2 лет.

Наилучшее качество показала модель, основанная на прогнозе главных компонент изменчивости ТПО с заблаговременностью 1 год. Стандартная ошибка прогноза среднегодовых значений ТПО составила 0,20 °С, или 61 % от стандартного отклонения, оправдываемость по знаку 76 %, и по $\pm\sigma$ – 90 % на независимых данных. Прогноз среднемесячных значений ТПО показал $\sigma_\varepsilon = 0,31$ °С (66 % от стандартного отклонения), оправдываемость по знаку – 77 %, и по $\pm\sigma$ – 83 % на независимых данных.

Список публикаций по теме диссертации

Монографии

1. Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды.– СПб: Гидрометеиздат, 2002. – 154 с. (соавторы В.Н.Малинин, П.П.Чернышков)
2. Физико-статистический метод прогноза океанологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2003. –164 с. (соавтор В.Н.Малинин)

Материалы конференций

3. Изменчивость южного субтропического фронта в районе юго-восточной части Тихого океана и его влияния на промысел рыбы // Материалы XIII Конференции по промысловой океанологии. – Калининград, 2005. – С. 177-178. (соавторы В.Н.Малинин, П.П. Чернышков)
4. Изменчивость и долгосрочный прогноз вылова ставриды в южном промышленном районе юго-восточной части Тихого океана // Материалы XIII Конференции по промысловой океанологии. – Калининград, 2005. – С.78-79. (соавторы В.Н.Малинин, П.П. Чернышков)

5. Состояние и перспективы развития методов долгосрочного прогноза температуры воды в промысловых районах Мирового океана // Материалы XIV Конференции по промысловой океанологии и промысловому прогнозированию. – Калининград, Изд. АтлантНИРО, 2008. – С. 104-105. (соавторы В.Н.Малинин, В.А.Герцев)
6. Гидрометеорологическое обеспечение юго-восточной части Тихого океана в современных условиях // Материалы XIV Конференции по промысловой океанологии и промысловому прогнозированию. – Калининград, Изд. АтлантНИРО, 2008. – С. 106-107. (соавторы В.Н.Малинин, П.П. Чернышков)

Статьи в периодических изданиях

7. Крупномасштабная изменчивость южного субтропического фронта в юго-восточной части Тихого океана // Учен. Записки. – Вып.2. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2006. – С.130-139. (соавтор В.Н.Малинин)
8. О проблеме долгосрочного прогноза вылова ставриды в юго-восточной части Тихого океана // Вопр. промысловой океанологии. – Вып.4, № 1. – М.: Изд. ВНИРО, 2007. – С. 144 (соавторы В.Н.Малинин, П.П. Чернышков)
9. Водные массы юго-восточной части Тихого океана // Вопр. промысловой океанологии. – Вып.4, № 2. – М.: Изд. ВНИРО, 2007. – с. 121-130 (соавторы В.Н.Малинин, П.П. Чернышков).
10. Типизация полей аномалий температуры поверхности юго-восточной части Тихого океана // Учен. Записки. – Вып. 8. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. – (в печати) (соавтор В.Н.Малинин)

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК

11. О значении юго-восточной акватории Тихого океана в обеспечении России рыбными ресурсами // Известия Рос. геогр. общества. – 2008. – Т.140, Вып.6. – С. 34–37 (соавторы В.Н.Малинин, П.П. Чернышков)
12. Долгосрочный прогноз температуры поверхности воды в юго-восточной части Тихого океана // Вестник Рос. гос. ун-та им. И. Канта. Серия «Естественные науки». – 2009. – № 1. – (в печати) (соавтор П.П. Чернышков)