

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

На правах рукописи
УДК 551.513, 551.583

Гечайте Индре

**КОЛЕБАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ
СИЛЬНЫХ ЗИМНИХ ПОХОЛОДАНИЙ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙ-
СКОГО РЕГИОНА**

Специальность: 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: доктор географических наук
Угрюмов Александр Иванович

Научный консультант: кандидат географических наук
Цепелев Валерий Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор географических наук,
Борзенкова Ирэна Ивановна
ведущий научный сотрудник
Государственного Гидрологического института,
г. Санкт-Петербург

кандидат географических наук,
Хайруллин Камиль Шейхович
ведущий научный сотрудник
Главной геофизической обсерватории
им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Защита состоится «22» июня 2016 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., д.98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «05» мая 2016 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д.212.197.01

Кандидат физико-математических наук, доцент

Л.В. Кашлева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Аномалии холода являются одним из самых важных вопросов в долгосрочном прогнозе погоды, так как они всегда приносили много ущерба в разных областях деятельности человека. От аномалий холода могут пострадать и плодовые деревья. Сильные похолодания отрицательно влияют на сферу транспорта и коммуникаций, может ухудшаться состояние зданий, возрастают расходы на отопление помещений. Резкое понижение температуры может существенно повлиять на здоровье человека. Научные исследования показали, что от аномального холода умирает в 17 раз больше людей, чем от жары.

Последние десятилетия показали, что в зимнее время года возрастает неустойчивость погодных условий. Еще в конце XX века большинство научно-исследовательских центров по изучению климата, основываясь на результатах прогнозных моделей, сообщали, что климат будет теплеть, и аномалии холода в умеренных широтах станут редким явлением. Тенденции последних годов (2006, 2010, 2011, 2012) показали, что вероятность возникновения таких аномалий сохраняется. Не исключено, что сейчас рост температуры в северных районах умеренных широт замедляется, а в некоторых из них, в последние годы, даже наблюдается отрицательный тренд температуры [3]. По мнению некоторых авторов [2], система климата является саморегулирующимся механизмом, который в данный момент времени работает как отклик на предыдущее резкое потепление тропосферы.

Очевидно, что циркуляция атмосферы в умеренных широтах является одним из главных факторов, регулирующих изменчивость погоды и формирующих климат. От ее характера и интенсивности в Атлантико-Европейском секторе, и, без сомнения, во всем Северном полушарии зависит режим температуры в исследуемом регионе. При этом существует много факторов, которые влияют на колебание самой атмосферной циркуляции: изменение температуры поверхности океанов в тропических, умеренных широтах, изменение ледяного покрова в полярных регионах, изменение снежного покрова, солнечная активность, вулканизм, аэрозоли и концентрация парниковых газов в атмосфере и др. В последние годы установлено, что существенным фактором для изменчивости погодных условий может быть и взаимодействие стратосфера-тропосфера. Таким образом, анализ процессов атмосферной циркуляции является важным этапом при прогнозе погоды любой заблаговременности и без данной процедуры невозможно оценить тенденции регионального изменения климата, а также понять причины этого.

Цель и задачи.

Цель работы состоит в анализе статистических характеристик временных рядов аномалий (в основном отрицательных) приземной температуры воздуха в восточной части Балтийского региона и в объяснении генезиса длительных и кратковременных существенных отклонений температуры от климатической нормы динамикой атмосферной циркуляции.

Основные задачи исследования:

1. Определить критерии, необходимые для выделения крупных аномалий температуры воздуха у поверхности земли. Установить временную динамику аномалий холода в контексте изменения климата.

2. Создать календарь аномально холодных месяцев зимы и периодов относительно коротких, но сильных аномальных похолоданий за 1951-2013 гг.
3. Определить циркуляционные условия, благоприятные для формирования аномалий холода на основе различных классификаций атмосферной циркуляции Северного полушария.
4. Разработать классификацию атмосферной циркуляции регионального масштаба, адаптированную для восточной части Балтийского региона.
5. Оценить связи между аномалиями холода и низкочастотными колебаниями атмосферной циркуляции в Северном полушарии, в том числе изменениями термодинамических процессов в стратосфере.

Методы и материалы исследования.

Основными методами, используемыми при выполнении работ, являются статистический, корреляционный, кластерный и дисперсионный анализ данных и численное моделирование, а также анализ и интерпретация полученных результатов. Использованы данные метеорологических станций Балтийского региона, а также данные полей метеорологических величин из крупных метеорологических, климатических и атмосферных центров исследований (*NCAR, NCEP, CPC, MERRA*), климатические и метеорологические базы данных *E-OBS* и *KNMI*. Кроме того, использовалась численная модель *NOAA HYSPLIT*, для вычисления траекторий частиц воздуха и визуализации процесса адвекции холода и модель, построенная на уравнении Р. А. Пламба, для расчетов динамики и дивергенции трехмерного вектора потоков волновой активности на горизонтальной плоскости.

Научная новизна.

1. Впервые выделены аномально холодные месяцы для всех стран Прибалтики и соседних районов. Создан календарь уровней аномальности температуры воздуха для каждого месяца зимы в 1951–2013 гг. (в общей сложности 106 точек сетки координат). Проведен анализ климатической тенденции изменения температуры воздуха зимой и установлена вероятность очень низких температур для различных интервалов времени анализируемого периода. Установлены точные даты аномально холодных периодов для 11-ти метеорологических станций, расположенных на исследуемой территории.
2. Создана региональная классификация типов атмосферной циркуляции по примеру автоматизированной схемы типизации Лэмба (методом *Jenkinson-Collison*).
3. Впервые для Балтийского региона, получены связи крупных аномалий температуры воздуха с конкретными типами тропосферной циркуляции и термодинамическими процессами в стратосфере. Таким образом, формирование отрицательных аномалий приземной температуры воздуха является следствием изменений атмосферной циркуляции от поверхности земли до 10 гПа.

Достоверность результатов.

Определяется большим объемом фактического материала, прошедшего верификацию в крупных научно-исследовательских центрах, а также использованием современных апробированных методов статистической обработки временных рядов и полей метеорологических величин. Полученные результаты не противоре-

чивы существующим представлениям об общей циркуляции атмосферы и климатологической изменчивости приземной температуры воздуха в умеренных широтах Северного полушария. Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-17-00685).

Практическая и научная значимость.

Полученные связи типов атмосферной циркуляции со значительными аномалиями холода в восточной части региона Балтийского моря позволяют лучше понять особенности механизма их формирования. Статистические параметры данных связей могут быть хорошим инструментом для улучшения качества долгосрочных прогнозов погоды, которые необходимы для реализации мер по адаптации человека в разных отраслях деятельности по отношению к экстремальным погодным и климатическим условиям.

Положения, выносимые на защиту:

- Анализ климатической изменчивости температуры воздуха в восточной части Балтийского региона в 1951–2013 гг.
- Определение критериев выделения аномалий холода зимы по месячным и суточным данным в восточной части Балтийского региона.
- Анализ повторяемости аномально холодных месяцев и кратковременных периодов сильных похолоданий за 1951-2013 гг. в восточной части Балтийского региона.
- Анализ состояния объектов тропосферной циркуляции, определяющих формирование аномалий холода в восточной части Балтийского региона, на основе трех классификаций циркуляции, индексов Исландской депрессии и Арктического колебания.
- Результаты корреляционного анализа Северной кольцевой моды на различных изобарических поверхностях (от 1000 до 10 гПа) в годы с аномалиями холода в восточной части Балтийского региона.
- Результаты моделирования потоков волновой активности в системе стратосфера-тропосфера перед периодами аномалий холода в восточной части Балтийского региона.

Личный вклад автора.

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в коллективе соавторов. Личный вклад автора заключается в постановке целей работы и формулировке задач исследований, а также в их решении, математической обработке и научном анализе результатов статистических расчетов и моделирования.

Апробация работы.

Работа выполнялась на метеорологическом факультете РГГМУ с 2012 по 2016 гг. Результаты работы докладывались и обсуждались на Международной Байкальской молодежной научной школе по фундаментальной физике (Иркутск, Россия, 2015 г.). Результаты диссертации представлены для Международной конференции «Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы» (Москва, Россия, 2016 г.). Результаты работы докладывались на Международной молодежной научной конференции Proceedings of

the 19th Conference for Junior Researchers “Science – Future of Lithuania” Environmental protection engineering (Vilnius, Lithuania, 2016). Также результаты докладывались на итоговой сессии Ученого совета РГГМУ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 208 наименований, и 12 приложений. Объем работы составляет 167 страниц, в том числе 79 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности.

Хочу выразить искреннюю благодарность научному руководителю, профессору кафедры Метеорологических прогнозов д. г. н. А.И. Угрюмову за веру в меня, бесценную помощь и полезные советы при подготовке рукописи диссертации, заведующему кафедрой Метеорологических прогнозов профессору д.ф-м.н. А. И. Погорельцеву за поддержку и помощь в научных исследованиях, научному консультанту доценту кафедры Метеорологических прогнозов к.г.н. В.Ю. Цепелеву за знакомство с оперативной работой при подготовке долгосрочного прогноза погоды и замечания в ходе обсуждений работы, всем работникам кафедры Метеорологических прогнозов РГГМУ, а также коллективу кафедры «Гидрологии и Климатологии» Вильнюсского университета, особенно профессору Эгидиус Римкус, за многолетнюю поддержку и сотрудничество в научных исследованиях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования аномалий холода, сформулированы цели и задачи работы, излагается теоретическая новизна и практическая значимость. Определены выносимые на защиту положения, представлена апробация работы, а также описана структура диссертации.

Первая глава является обзорной и содержит сведения об изменении современного климата, повторяемости и определении холодных периодов зимой, а также о возможных механизмах общей циркуляции атмосферы, влияющих на образование аномалий температурного режима.

Глобальная тенденция потепления выражается в том, что средняя годовая приземная температура воздуха за 1951–2010 гг. выросла более чем на 0,6 °С, еще больше потепление заметно в зимний период, особенно в высоких широтах. Однако, несмотря на то, что на протяжении последних трех десятилетий в Северном полушарии преобладают аномально теплые зимы, зафиксированы и особенно холодные месяцы, с волнами холода очень низких температур. Считается, что при потеплении климата, особенно в регионе Арктики и прилегающих территориях, погодные экстремумы можно ожидать и в будущем, из-за снижения температурного градиента с севера на юг, что создает благоприятные условия для ослабления западных ветров (струйного течения (СТ)) зимой в средних широтах Евразии. Ослабление СТ определяет образование экстремального холода зимой на континентах средних широт, из-за развития меридиональной циркуляции в атмосфере. Такие аномальные условия состояния атмосферы приводят к хорошо выраженным изменениям динамики планетарных волн, которые могут приобрести большую амплитуду с волновыми числами $m=1,2$.

Планетарные волны являются «инструментом» для передачи энергии и импульса в пространстве и могут распространяться из тропосферы в стратосферу. В

стратосфере амплитуда волн увеличивается и, в итоге, они обрушаются, что приводит к аномалиям циркуляции. Типичным уровнем, где обрушаются планетарные волны – это уровень стратосферного струйного течения на изобарической поверхности 10 гПа (примерно 30 км). После обрушения планетарных волн в стратосфере, наблюдается ослабление западных ветров, так как релаксация энергии нарушает тепловой баланс и в это время можно ожидать внезапного стратосферного потепления (ВСП). Таким образом происходит взаимодействие между тропосферой и стратосферой. Важнейшими регионами, для взаимодействия тропосфера-стратосфера, являются секторы Северной Атлантики и Тихого океана.

Аномалии данного характера имеют существенное влияние на поле ветров в тропосфере: преобладающий западный перенос в умеренных широтах часто превращается в восточный, что указывает на меридиональный характер атмосферной циркуляции в тропосфере. Нисходящая волновая активность, достигающая тропосферы, также может повлиять на формирование аномалий циркуляции в определенных регионах: усиление циклогенеза или блокирование в других регионах. Все эти процессы указывают на наличие динамической связи между стратосферной и тропосферной циркуляцией и могут способствовать формированию аномалий холода зимой в определенных регионах Северного полушария.

Выделение аномальных погодных условий является базовой частью исследования. По предложению *IPCC* событие определяется экстремальным, когда повторяемость конкретной величины меньше 10-го или выше 90-го перцентиля [5]. Для выделения температурных аномалий по месячным данным в практике часто применяются температуры определенного порога, экстремальные значения, термические индексы, отклонение от климатической нормы, характеристики эмпирического распределения вероятностей или особые значения температуры. Для анализа особо холодных периодов чаще всего используются данные минимальной суточной температуры, при этом методика в разных работах исследователей отличается не много: изыскиваются периоды в несколько последовательных дней (от 2 до 15), когда погодные условия были намного холоднее, чем обычно (для этого рассчитывается порог температуры – 5-ый или 10-ый перцентиль).

Аномалии холода, безусловно, являются следствием изменения тропосферной циркуляции. При изучении данных связей классификации атмосферной циркуляции являются одним из самых распространенных статистических методов. Самые популярные из субъективных классификаций в Европе это: Г.Я.Вангенгейма-А.А.Гирса, Б.Л. Дзердзеевского, Гесс-Брезовски, Лэмба и Шуэппа. В последние десятилетия изменчивость макроциркуляционных процессов также часто оценивается с использованием разных индексов атмосферной циркуляции, которые можно относить к численным выражениям низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции. Основными глобальными структурами атмосферной циркуляции, влияющими на погодные условия как во всей Северной Европе, так и в рассматриваемом регионе, являются Северо-Атлантическое колебание и Арктическое колебание.

Во **второй главе** представлена информация о географическом расположении исследуемой территории и главные черты атмосферной циркуляции, воздействующие на погодные условия зимнего времени. Кроме того, описаны использованные базы данных и временные ряды, а также методы их обработки, и анализа.

В работе проводится анализ изменчивости температуры воздуха зимнего времени года за период 1951–2013 гг. в восточной части региона Балтийского моря с особым вниманием к аномальным условиям, а именно, аномалиям холода. Анализируемая площадь охватывает территорию 53,5°-61,5° с. ш. и 19,5°-32,5° в. д. (рис. 1-а). Расчеты проведены для сетки координат с 1,0° интервалом (всего 106 точек сетки координат). Данные над акваторией Балтийского моря и Ладожского озера не учитываются. Используются следующие базы данных и временные ряды: данные среднемесячной температуры воздуха, минимальной суточной температуры воздуха, среднемесячные значения давления на уровне моря, среднемесячные и суточные значения индекса Арктического колебания и Северной кольцевой моды, календари типов атмосферной циркуляции Вангенгейма-Гирса и Дзерdzeевского, данные MERRA зонального ветра, геопотенциала, давления и температуры воздуха, данные геопотенциальной высоты NCRP/NCAR на разных изобарических поверхностях. Использованные данные прошли верификацию, которая описывается в разделе 2.2. Также представлены главные статистические характеристики и методы их обработки. Это среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение, стандартизированные аномалии, коэффициенты асимметрии и эксцесса, коэффициенты линейной корреляции и регрессии, автокорреляционный анализ. Для проверки статистической значимости коэффициентов корреляции и линейной регрессии использовался критерий Стьюдента и тест *Mann-Kendall*. Уровнем статистической значимости в работе является 95 % ($\alpha < 0,05$). Также, кратко представлены используемые модели: это модель NOAA *HYSPLIT*, для вычисления траекторий частиц воздуха и модель трехмерных волновых потоков, построена на уравнении Р. А. Пламба [10], для оценки динамического волнового взаимодействия тропосферы и стратосферы. Для визуализации полученных результатов использовались данные программные пакеты: *OpenGrads*, *GIS ArcMap*, *Surfer*, *EasyFit 5.6 Professional*, *Microsoft Excel*.

В **третьей главе** представлены климатические данные температурного режима в восточной части региона Балтийского моря за временной интервал 1951–2013 гг. (месячные и суточные значения температуры воздуха). Установлены общие тенденции изменения температуры воздуха в зимнее время за все годы, а также для каждого десятилетия отдельно. Последний раздел представляет анализ температуры воздуха на метеостанциях (МС) Санкт-Петербург и МС Вильнюс во временном интервале 1800–2013 гг., который показывает характер нынешних колебаний температуры воздуха на фоне более длительного времени.

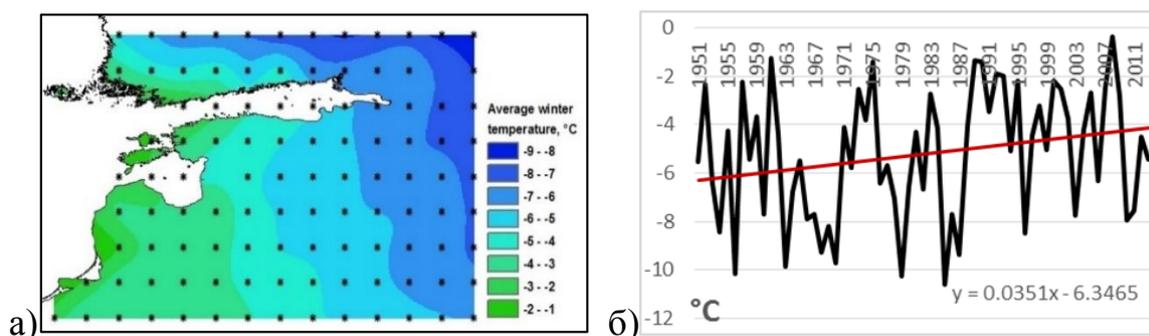


Рисунок 1 – Распределение средней температуры воздуха зимы (а) и вариации средней температуры зимы (декабрь-февраль) в анализируемом регионе и линейный тренд (б) в 1951-2013 гг. в восточной части Балтийского региона

Установлено, что в восточной части Балтийского региона средняя температура воздуха за декабрь-февраль 1951–2013 гг. колеблется от $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в западной части региона до $-8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на его северо-востоке (рис. 1-а). Средняя территориальная температура воздуха зимой равна $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В среднем температура опускается ниже нуля 18 ноября и опять становится положительной 27 марта, самые минимальные температуры фиксируются в феврале. Анализ отдельных десятилетий исследуемого периода показал, что самым холодным десятилетием был 1961-1970 гг., когда среднесезонная температура воздуха в регионе была $-7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температурный диапазон по всей территории изменялся от $-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юго-западе до $-9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ на северо-востоке. Самая низкая температура во всем регионе зафиксирована в 1984–1985 году (средняя температура зимы $-10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Тренд приземной температуры показал, что за анализируемый временной интервал, температура воздуха в декабре-январе поднялась на $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\alpha > 0.05$) (рис. 1-б). Больше всего температура выросла в восточной и северо-восточной части исследуемого региона. Самые большие положительные тенденции температуры зафиксированы в январе ($0,52\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) ($\alpha < 0.05$). Суточные данные показывают, что наиболее значимые значения положительного тренда отмечаются в первой половине января и в конце февраля.

Анализ данных температуры последнего двухсотлетия на метеостанциях Санкт-Петербург и Вильнюс показал, что тенденции изменения температуры в разных частях региона могут сильно отличаться. За этот период в Санкт-Петербурге обнаружен более резкий подъем температуры (в 4 раза), чем в Вильнюсе. Установлено, что три последних десятилетия дают наиболее значимый вклад в региональное потепление климата.

В четвертой главе представлена методика выявления периодов сильных кратковременных похолоданий и аномальных месяцев зимы. Описывается повторяемость аномалий холода, на основании созданного каталога холодных зим и дат аномальных похолоданий, а также представлены долговременные тенденции изменений повторяемости аномалий температуры за 1951–2013 гг. и 1800–2013 гг. Выявлена тенденция изменений вероятности аномально низких температур, применяя метод генерализированных экстремальных величин.

В работе (раздел 4.1) для выделения особо холодных и теплых месяцев зимы выбран метод стандартизированных (нормированных на среднее квадратическое отклонение) аномалий, позволяющий устранить влияние дисперсии и сравнить параметры в районах с разными географическими условиями. Расчеты проведены в каждой точке сетки координат изучаемого региона отдельно для каждого месяца. Поля среднемесячной температуры воздуха представлены в виде вектора:

$$x_j = \{x_i\}_j = (x_1, x_2, \dots, x_k)_j, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

где x_i – значение среднемесячной температуры воздуха, k – количество узлов сетки координат ($k=106$), n – количество полей ($n=3$; декабрь, январь, февраль).

В целом архив полей среднемесячной температуры воздуха представлен в виде матрицы X с значениями температуры x_{ij} которые соответствуют значениям в i узле географической сетки поля j :

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{i1} & \dots & X_{k-11} & X_{k1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{i2} & \dots & X_{k-12} & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{in} & \dots & X_{k-1n} & X_{kn} \end{pmatrix}$$

где $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, n$.

По среднемесячным значениям температуры воздуха в каждой точке сетки были рассчитаны стандартизированные аномалии z (уравнение 1) и выделены особо холодные и особо теплые месяцы зимы за временной интервал 1951–2013 гг.

$$z = \frac{(x - \bar{x})}{\sigma} \quad (1)$$

где \bar{x} – многолетняя среднемесячная температура воздуха (на высоте 2 м); x – средняя температура воздуха определенного месяца; σ – стандартное отклонение.

Таблица 1 - Классификация термических индексов для определения аномальных месяцев в восточной части региона Балтийского моря

Характеристика месяца	Экстремально холодный	Аномально холодный	Холодный	Норма	Теплый	Аномально теплый	Экстремально теплый
сат***	сат < -2,11	-2,1 < сат < -1,41	-1,4 < сат < -0,71	-0,7 < сат < 0,7	0,71 < сат < 1,4	1,41 < сат < 2,1	сат > 2,11
Значения ТИ	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
*Диапазон температуры, °С	Я < -13,8 Ф < -14,1 Д < -9,8	-13,8 < Я < -11,2 -14,1 < Ф < -11,5 -9,8 < Д < -7,7	-11,2 < Я < -8,6 -11,5 < Ф < -8,8 -7,7 < Д < -5,7	-8,6 < Я < -3,4 -8,8 < Ф < -3,4 -5,7 < Д < -1,5	-3,4 < Я < -0,8 -3,4 < Ф < -0,7 -1,5 < Д < 0,5	-0,8 < Я < 1,9 -0,7 < Ф < 1,9 0,5 < Д < 2,6	Я > 1,9 Ф > 1,9 Д > 2,6
**Повторяемость, %	2,1	6,9	14,8	50,8	20,1	4,8	0,5

* Я- средняя температура января, Ф- средняя температура февраля, Д- средняя температура декабря

** Среднее значение за временной интервал 1951-2013 гг.

*** сат – стандартизированная аномалия температуры

Для расчета степени аномальности зимы в работе использовался термический индекс семи уровней (ТИ), по аномальности температурных условий, предложенный исследователем К. Пфистер [9]. Используя данный метод, мы получаем термические индексы с присвоенными им диапазоном температуры и характеристикой аномальности (1 таблица). В работе выделено всего 7 категорий термических условий для месяцев зимы от экстремально холодных до экстремально теплых (ТИ с -3 до +3).

В разделе 4.2. представлена статистика повторяемости особо холодных и теплых месяцев зимы за 1951–2013 гг. По выше представленной методике выделено 24 холодных (13%), 17 аномально холодных (9%) и 4 экстремально холодных (2%) от всех месяцев зимнего времени года. Так же в этот временной период наблюдалось: 41 теплый, 8 аномально теплых и 1 экстремально теплый месяц зимнего периода, большинство из них (68%) после 1981 г. (рис.2 а-б). Важно отметить, что холодной зима, в данном случае, считается только тогда, когда ТИ значениями < -1/-2/-3 были зафиксированы в большей части исследуемой территории (>50%) и в среднем значении учитывались только данные аномалии.

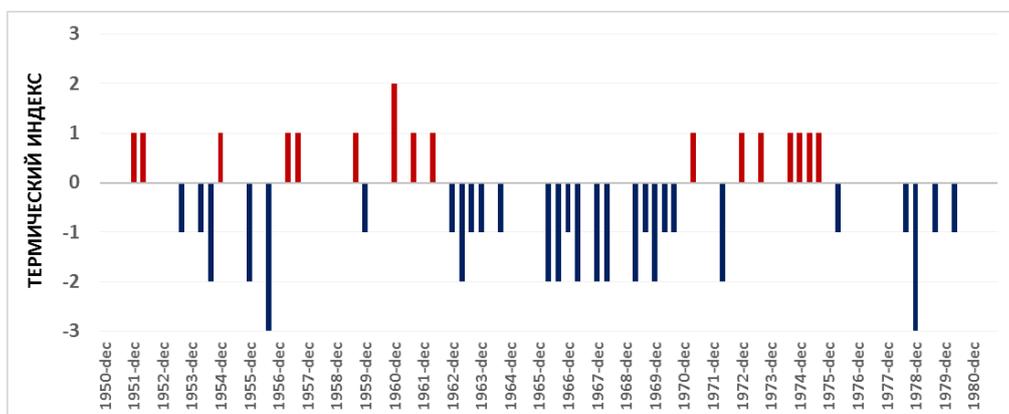


Рисунок 2а – Особо холодные/теплые месяцы зимы в период 1951-1980 гг.

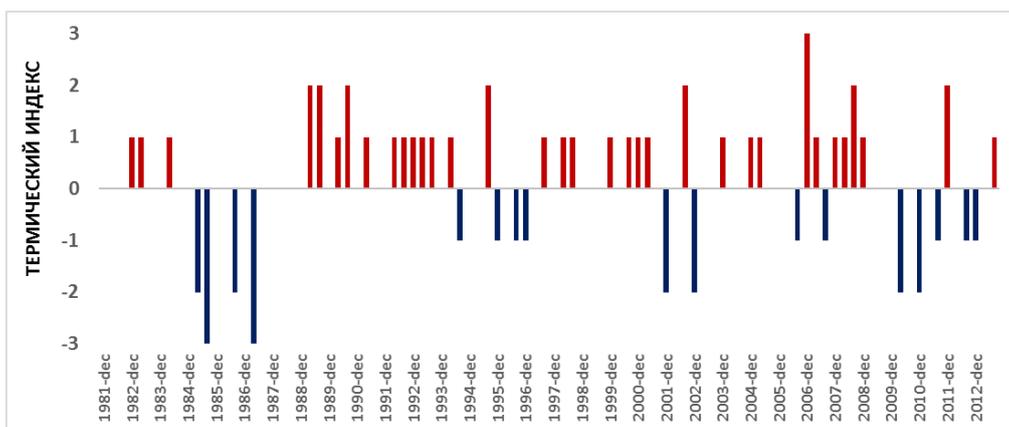


Рисунок 2б – Особо холодные/теплые месяцы зимы в период 1981-2013 гг.

Таблица 2 - Порог 10-го перцентиля суточной минимальной температуры для выделения кратковременных аномальных периодов похолодания на разных метеостанциях восточного Балтийского региона

Метеостанция	10ый перцентиль, °С (декабрь)	10ый перцентиль, °С (январь)	10ый перцентиль, °С (февраль)
Хельсинки	-13,8	-17,9	-18,1
Таллин	-12,5	-16,5	-17,5
Рига	-11,8	-16,6	-16,8
Лиепая	-9,9	-14,5	-14,5
Клайпеда	-9,5	-13,6	-13,5
Вильнюс	-13,9	-18,1	-17,9
Минск	-15,0	-18,9	-18,3
Тарту	-15,7	-21,1	-21,1
Санкт-Петербург	-15,7	-20,1	-20,1
Псков	-17,2	-21,6	-22,0
Великие Луки	-18,2	-22,6	-23,2

В разделе 4.3 представлена методика выделения аномальных похолоданий и их статистический анализ. Для этого применяется критерий 10-го перцентиля, который соответствует $TI < -2$, т.е. аномально холодные условия. По определению ВМО, индикатор продолжительности похолоданий – это число дней (как минимум 6 последующих), когда $T_{\text{мин}} < 10$ -го перцентиля [11]. На основе этой методики для 1951–2013 гг. выделены периоды значительных похолоданий в декабре-феврале. Для расчетов использовались данные минимальной суточной температуры воздуха.

Для анализа на всей территории восточного Балтийского региона выбрано 11 метеостанций (МС) (Таблица 2). Для каждой МС установлен отдельный порог 10-го перцентиля.

Всего за временной интервал 1951–2013 гг. зафиксировано 43 случая аномальных кратковременных похолоданий. Минимальная температура воздуха на некоторых станциях опускалась до $-30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже. 23 случая похолоданий произошли до 1980 года и 20 после 1980 года. Установлено, что самая большая вероятность образования существенных холодов в январе (42% всех случаев), чуть меньше в феврале (39%) и совсем небольшая вероятность в декабре (19%). Средняя продолжительность 8-9 дней.

Таблица 3 - Перцентили стандартизированного распределения экстремальных значений в 1951-1971 гг., 1972-1992 гг. и 1993-2013 гг. в МС Вильнюс и Санкт-Петербург

P	1951-1971 гг.		1972-1992 гг.		1993-2013 гг.	
	Вильнюс	Санкт-Петербург	Вильнюс	Санкт-Петербург	Вильнюс	Санкт-Петербург
0.001	-37.7	-37.9	-36.9	-37.5	-35.6	-36.4
0.002	-35.0	-35.6	-34.3	-35.1	-32.9	-33.9
0.005	-31.2	-32.3	-30.6	-31.8	-29.1	-30.5
0.01	-28.2	-29.7	-27.6	-29.1	-26.2	-27.7
0.02	-25.0	-26.7	-24.5	-26.2	-23.0	-24.8
0.05	-20.5	-22.6	-20.1	-22.0	-18.6	-20.5
ξ	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6
σ	7.7	8.1	7.5	8.0	7.2	7.7
μ	-8.2	-10.5	-8.2	-9.9	-6.8	-8.6

Чтобы определить вероятность особо низких температур воздуха, были проведены расчеты на основе данных суточной минимальной температуры методом распределения генерализованных экстремальных величин (англ. *General extreme value*) (ГЭВ). Используя программный пакет *EasyFit 5.6 Professional* по распределению ГЭВ, рассчитана вероятность аномально низких суточных температур воздуха в случае выбранных перцентилей (таблица 3). В работе рассчитаны значения минимальной суточной температуры воздуха, вероятность повторяемости которых один раз за 20, 50, 100, 200, 500 и 1000 дней зимних месяцев. Перцентиль $p=0,001$ показывает, какая минимальная температура может повториться один раз за 1000 дней зимних месяцев. Анализируемый период был разделен на три части: 1951–1971, 1972–1992 и 1993–2013 гг. Установлено, что в среднем, за последние десятилетия (1993–2013 гг.), каждые два года можно ожидать $T_{\text{мин}}$ в МС Санкт-Петербург $-30,5^{\circ}\text{C}$ и в МС Вильнюс $-29,1^{\circ}\text{C}$. Более часто повторяются значения суточной минимальной температуры (вероятность каждые 20 дней за зиму) следующие: в МС Санкт-Петербург $-20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в МС Вильнюс $-18,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (таблица 3).

Статистические показатели месячных и суточных данных температуры воздуха в восточной части Балтийского региона свидетельствуют о том, что вероятность аномальных кратковременных похолоданий, даже в условиях общего потепления климата, остается большой.

В пятой главе представлены макроциркуляционные особенности атмосферы, а также, региональные черты атмосферной циркуляции во время аномалий холода

в восточной части Балтийского региона. Обсуждается повторяемость и динамика различных типов атмосферной циркуляции в климатологической перспективе и для случаев аномальных похолоданий отдельно. Установлены общие тенденции, позволяющие понять изменчивость температуры воздуха во время зимних месяцев. Для анализа связей между атмосферной циркуляцией и аномалиями холода в восточной части Балтийского региона использовались три классификации атмосферной циркуляции.

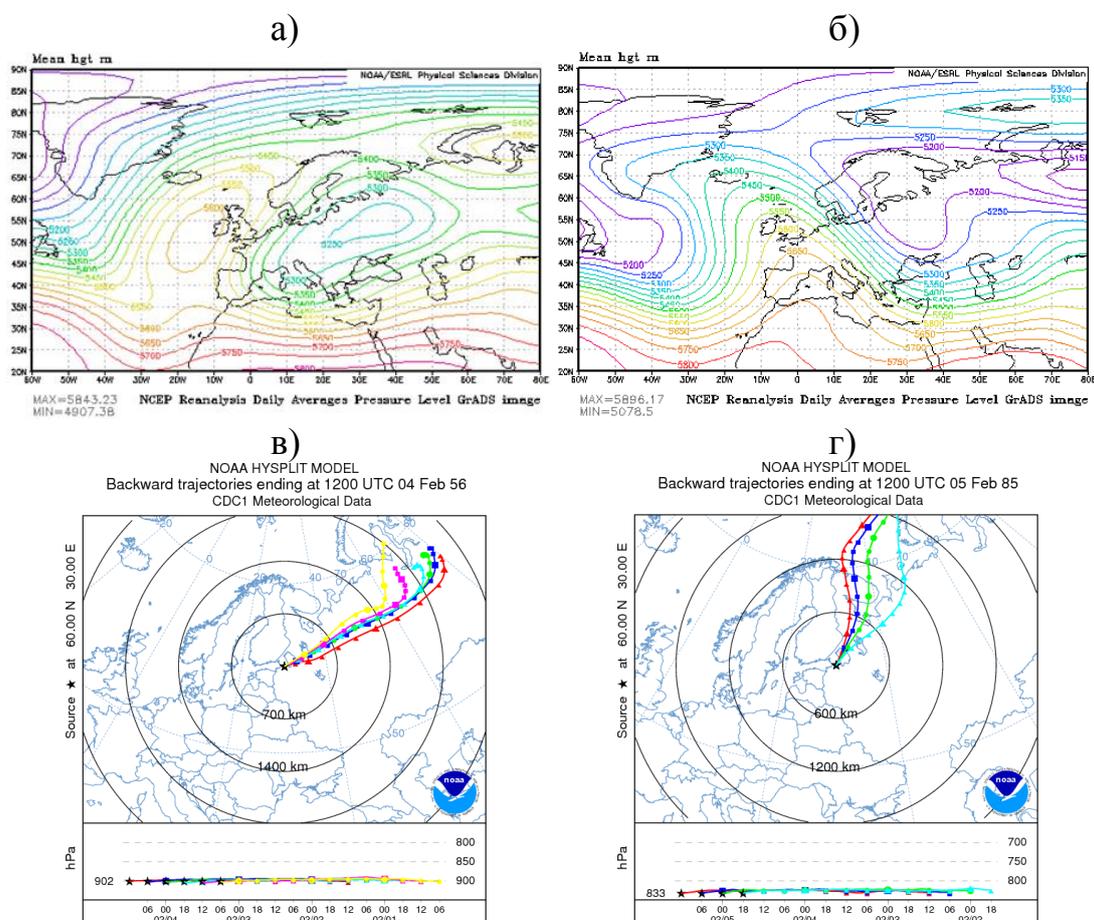


Рисунок 3 – Карты АТ-500 для 2-13 февраля 1956 года (а) и для 2-7 февраля 1985 года (б) и траектории воздушного потока за 4 дня до похолодания: 01-04 февраля 1956 г. (в) и 02-05 февраля 1985 г. (г) (NOAA HYSPLIT MODEL)

Первым этапом (раздел 5.1.1) в работе являлся анализ типов атмосферной циркуляции по Вангенгейму-Гирсу, где выделены макропроцессы по формам положения высотных гребней и ложбин: W (западный), E (восточный) и C (меридиональный). Корреляционный анализ показал, что средняя температура воздуха в декабре-феврале имеет тесную прямую связь с повторяемостью типа W ($r=0.73$ ($\alpha<0.01$)) и это хорошо подтверждает тот факт, что волны малой амплитуды, быстро смещающиеся с запада на восток приносят теплый Атлантический воздух зимой (наблюдается положительные аномалии температуры). Если рассматривать обратную связь для данного региона надо учитывать типы C+E, так как они отвечают за меридиональное состояние атмосферы, и в толще тропосферы им соответствуют стационарные волны большой амплитуды. Коэффициент корреляции между количеством дней с типами C+E и средней температурой воздуха равен $-0,73$ ($\alpha<0.01$). Это указывает на то, что такого вида возмущенность в тропосфере (в Атлантико-Евразийском секторе) приводит к отрицательным аномалиям температуры.

Установлено, что больше чем в 80% всех дней холодных и аномально/экстремально холодных месяцев отмечалась повышенная повторяемость меридиональных типов атмосферной циркуляции E и C и только 15-17% тип W, что не характерно для исследуемого региона. Подробный анализ карт АТ500 показал, что в 79% всех случаев аномально/экстремально холодных месяцев они были связаны с блокирующими процессами над восточной частью Северной Атлантики (рис. 4 а-б), когда по восточной периферии стационарного высотного гребня наблюдаются вторжения холодного воздуха, чаще всего из района Карского моря (рис. 3 в-г).

Далее в работе (раздел 5.1.2) рассмотрены климатические особенности повторяемости (количество дней) разных групп атмосферной циркуляции по типизации Дзерdzeевского. В типизации Дзерdzeевского с использованием синоптических карт приземного давления выделены 4 основные группы циркуляции: зональная, нарушения зональности, меридиональная северная и меридиональная южная, которые делятся на 13 типов и 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ).

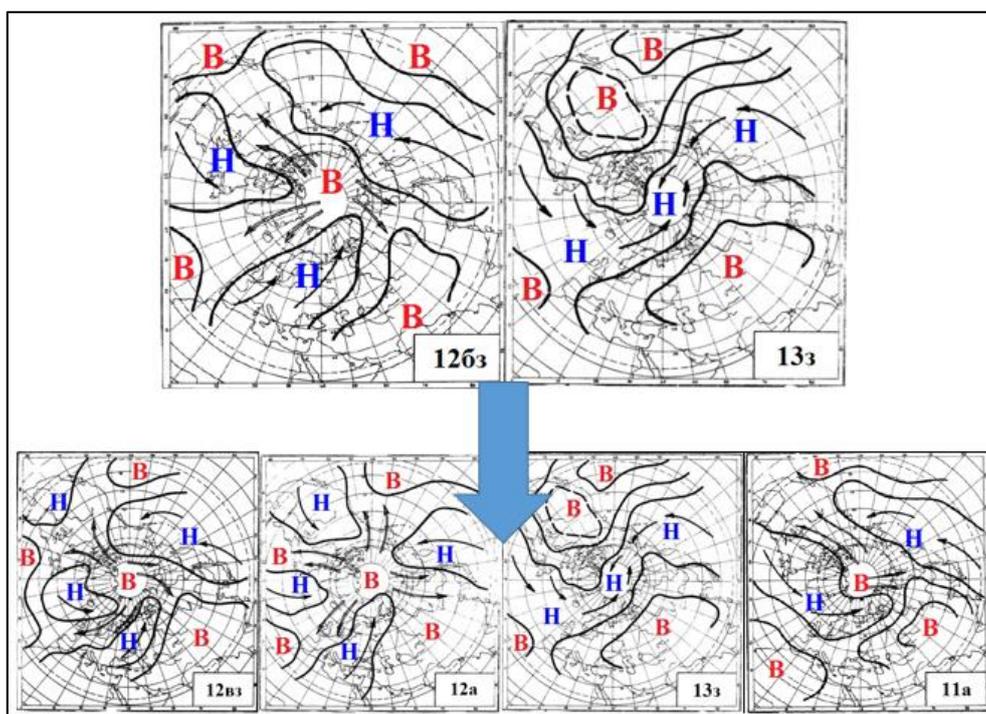


Рисунок 4 – Динамические схемы наиболее распространенных ЭЦМ за 10 суток до похолодания (верхние рисунки) и во время периодов похолодания (нижние рисунки)

В работе проведен анализ повторяемости ЭЦМ за 10 дней до и 10 дней после начала аномальных похолоданий. Установлено что, аномальные похолодания в восточной части Балтийского региона, в большинстве случаев, связаны с нарушением зональной циркуляции и вторжением арктических воздушных масс над Северной Атлантикой. Представленные динамические схемы (рис. 4) хорошо объясняют этот механизм. Сперва наблюдается вторжение арктического воздуха над Северной Атлантикой (ЭЦМ 12бз), после чего происходит нарушение западного переноса и его ослабление. После этого зона, где арктический воздух проникает в умеренные широты, движется на восток. В таком случае в анализируемом регионе фиксируются похолодания арктического происхождения, при ультраполярных вторжениях (ЭЦМ 12вз, 12а). Другая ситуация бывает при интенсификации Сибирского антициклона

(ЭЦМ 13з), когда его гребень достигает исследуемого региона. Но и в данном случае мы имеем меридиональный характер атмосферной циркуляции. В это время в исследуемом регионе фиксируется похолодание сибирского происхождения (ЭЦМ 13з, 11а).

Далее в работе (раздел 5.1.3) применялось моделирование состояния барического поля в ограниченной географической области на основании автоматизированной схемы Jenkinson-Collison [7], которая построена на применении системы типизации атмосферных процессов, разработанной Лэмбом [8]. Применяя расчеты по технике [7], был создан каталог типов атмосферной циркуляции, адаптированный для восточной части региона Балтийского моря. Для расчетов использовались среднесуточные данные давления на уровне моря с шагом 5° широты и 10° долготы для 16 (p1-p16) точек на территории $50-70^\circ$ с.ш. и $10-40^\circ$ в.д. (рис. 5). Главные компоненты этой схемы - это направление геострофического ветра и общая завихренность, которые используются для расчетов индексов геострофического потока воздушных масс.

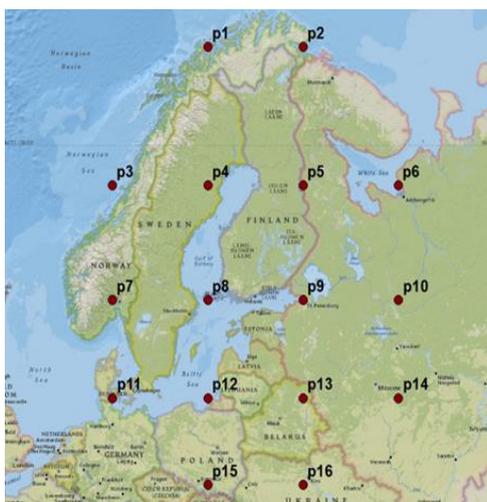


Рисунок 5 –Точки сетки координат и их порядковые номера для данных давления на уровне моря, которые были использованы для расчетов типов циркуляции с помощью схемы Jenkinson-Collison [7]

Подробный анализ повторяемости типов атмосферной циркуляции над восточной частью Балтийского региона показал, что во время аномально/экстремально холодных месяцев повторяемость восточных ветров в среднем увеличивается на 14-18%. Также, климатические данные показали, что обычно зимой антициклоническая ситуация наблюдается в среднем 43% всех дней, больше всего в феврале, но в случаях холодных зим этот процент вырастает до 51% и до 61% во время аномально/экстремально холодных месяцев.

В работе установлено, что за 10 дней до аномального похолодания преобладает циклоническая (18%) и антициклоническая (16%) деятельности, а также, западный (8%), северо-западный (7%), юго-западный (5%), юго-восточный (5%) перенос воздушных масс. Во время похолодания повторяемость циклонической циркуляции существенно падает (4%) и начинает доминировать антициклоническая деятельность (32% от всех случаев). Если перед похолоданием разброс повторяемости разных типов циркуляции большой, то во время похолодания видна четкая тенденция – господствует антициклоническая ситуация и восточный, юго-восточный перенос

воздушных масс (данные типы повторяется 70% всех случаев). Антициклоническая ситуация и восточный перенос воздушных масс, которые в среднем не характерны для данного региона, являются следствием меридиональной циркуляции атмосферы, а именно, повышенного обмена воздушных масс между высокими и умеренными широтами. Больше всего холодных зим зафиксировано в периоды 1965–1970, 1978–1980 и 1985–1987 гг. В эти годы, чаще чем обычно, наблюдались вторжения арктического воздуха над Атлантико-Европейским сектором.

Установлено, что в последние годы зимой повторяемость вторжений арктических воздушных масс резко увеличивается и уже достигла максимума 60-ых годов. Данная тенденция показывает интенсификацию обмена воздушных масс между высокими и низкими широтами и, соответственно, увеличение меридиональности атмосферной циркуляции. Данные результаты хорошо совпадают с результатами других ученых, которые основывались на симуляциях математических моделей.

Шестая глава посвящена изучению влияния глобальных механизмов циркуляции на региональные синоптические процессы и, тем самым, на формирование зимних похолоданий в восточной части Балтийского региона. Рассматриваются вариации активности Исландской депрессии, Арктического колебания и взаимосвязь тропосфера-стратосфера во время аномальных похолоданий.

При анализе изменений местоположения и интенсивности Исландской депрессии рассчитывались вариации Исландской депрессии по формуле 2:

$$I_{ISL} = \frac{\Delta\varphi}{\sigma\varphi} + \frac{\Delta\lambda}{\sigma\lambda} - \frac{\Delta P}{\sigma P} \quad (2)$$

где: $\Delta\varphi$ - отклонение широты от средней по ряду; $\Delta\lambda$ - отклонение долготы от средней по ряду; ΔP - отклонение атмосферного давления от среднего по ряду; $\sigma\varphi$, $\sigma\lambda$, σP – среднеквадратическое отклонение данных величин.

Установлено, что между динамикой Исландской депрессии (индекса I_{ISL}) и аномалиями температуры воздуха в исследуемом регионе существует тесная связь, особенно во время самых холодных месяцев зимы. Коэффициент корреляции в декабре-феврале $r=0,64$ ($\alpha<0.01$), а в январе-феврале $r=0,75$ ($\alpha<0.01$). Синоптически это объясняется так: при сдвиге Исландской депрессии на юго-запад (отрицательный индекс), ослабляется и западный перенос воздушных масс, и такая ситуация совпадает с увеличением меридиональности атмосферной циркуляции. При усилении и сдвиге Исландской депрессии на северо-восток, усиливается ее положительное влияние на погодные условия исследуемого региона. Можно сказать, что межгодовые колебания аномалий температуры зимой в нашем регионе были связаны именно с динамикой этого ЦДА.

Далее в работе проанализированы характеристики Арктического колебания (АК): связи между временными изменениями АК и повторяемостью разных типов атмосферной циркуляции, а также с температурой воздуха в восточной части Балтийского региона. Индекс АК тесно связан с интенсивностью полярного вихря, динамикой и местоположением струйного течения, и, главное, со вторжениями арктических воздушных масс в умеренные широты Северного полушария. Арктическое колебание, как глобальный механизм, контролирует и состояние Исландской де-

прессии. Установлено, что вариации индексов АК и Исландской депрессии являются очень синхронными: коэффициент корреляции, между этими параметрами, равен $r=0,69$ ($\alpha<0.01$).

В работе были построены карты распределения коэффициентов корреляции между индексом АК и среднемесячной температурой воздуха в исследуемом регионе в каждом узле сетки координат. Установлено, что величина коэффициентов зависит от географического расположения, выбранного временного интервала и включенных в анализ зимних месяцев. Коэффициент корреляции между приземной температурой воздуха и АК в декабре-феврале $r=0,68$ ($\alpha<0.01$) и $r=0,71$ ($\alpha<0.01$) в январе-феврале (рис. 6а).

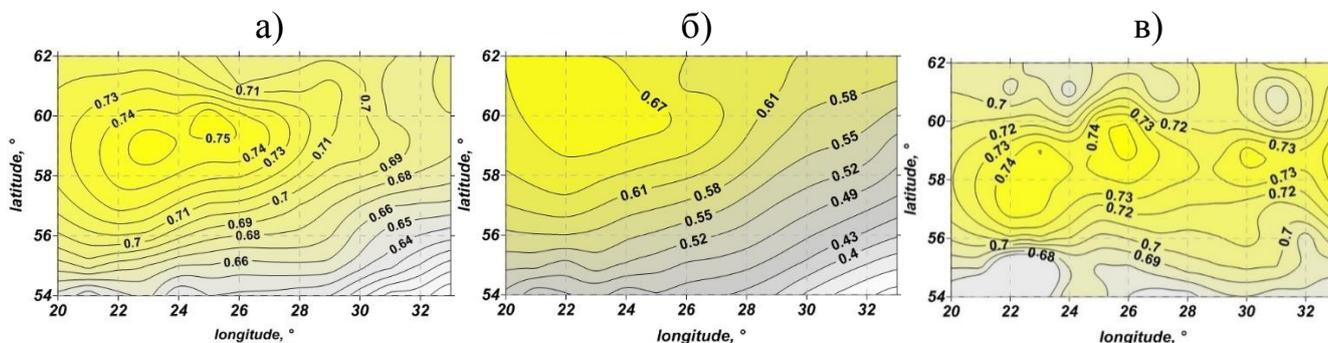


Рисунок 6 – Распределение коэффициентов корреляции между температурой воздуха и индексом АК в восточной части Балтийского региона в январе-феврале в 1951–2013 гг. (а) и в 1951–1981 гг. (б), 1982–2013 гг. (в)

Установлено, что если разделим временной ряд на две части: 1951–1981 гг. более холодный период и 1982–2013 более теплый период, то получается, что связи стали более тесными в последние десятилетия: $r=0,58$ ($\alpha<0.01$) за временной интервал 1951–1981 гг. и $r=0,77$ ($\alpha<0.01$) за 1982–2013 гг. (Рис. 6 б-в). Главное, поменялось расположение зоны высоких коэффициентов корреляции. Если в начале анализируемого периода она была на северо-западе, то во второй половине – она сдвинулась на юг и достигает восточных районов. Это хорошо отражает тот факт, что зональный перенос воздушных масс особо усилился в конце 80-х, что способствовало резкому повышению температуры воздуха в восточной части анализируемого региона.

Также в работе был проведен анализ временного хода суточных данных по аномалиям температуры и индекса АК для экстремально/аномально холодных месяцев в 1951–2013 гг. Установлено, что при смещении временного ряда температуры вперед относительно индекса АК от 2 до 6 суток вариации значений индекса АК и аномалии температуры воздуха становятся практически синхронными. Это доказывает, что температура является функцией АК и меняется быстро в связи с изменениями циркуляции атмосферы при смене фазы АК [1].

Далее в 6 главе представлен анализ значений Северной кольцевой моды (СКМ) для 17-ти изобарических поверхностей по вертикали (от 1000 до 10 гПа), чтобы понять, как связаны между собой наиболее крупные колебания циркуляции стратосферы и тропосферы. Математически стратосферный индекс СКМ полностью соответствует тропосферному индексу АК – это первая эмпирическая ортогональная функция разложения аномалий геопотенциальной высоты различных изобарических поверхностей. Рассчитанные коэффициенты корреляции показали, что

значении индекса СКМ имеют тесную связь между ближайшими изобарическими поверхностями ($r=0,95-0,995$, $\alpha<0.01$), что указывает на то, что аномалии геопотенциала передаются с высотой. Самые высокие значения коэффициентов корреляции обнаружены между величинами индекса СКМ на уровнях 200/150 гПа и величинами индекса СКМ на остальных изобарических поверхностях (в среднем $r=0,80$, $\alpha<0.01$). Поэтому, данный уровень можно считать переходным, где наиболее сильно связаны аномалии СКМ тропосферной и стратосферной циркуляции.

Проведенный автокорреляционный анализ показал, что со сдвигом временного ряда СКМ изобарической поверхности 1000 гПа вперед относительно ряда СКМ для 10 гПа, коэффициенты корреляции уменьшаются, а со сдвигом назад – увеличиваются. Это означает, что вероятно передача аномалий сверху вниз. Наибольшие коэффициенты корреляции получены со сдвигом на 20 дней.

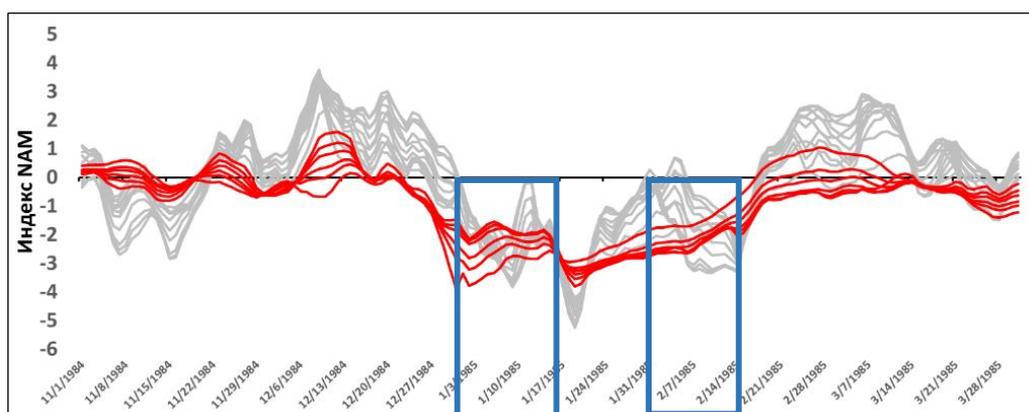


Рисунок 7 – Хронологический ход суточных значений СКМ в 1984 ноябрь -1985 г. март от 1000 до 150 гПа (серые линии) и от 100 до 10 гПа (красные линии)

Установлено, что похолодания (синие прямоугольники на рисунке 7) совпадает с ярко выраженными отрицательными аномалиями индекса СКМ, как в тропосфере, так и в стратосфере. Такое совпадение означает, что погодные аномалии связаны с изменениями геопотенциальной высоты во всей толще атмосферы. Было выяснено, что ход значений СКМ отличается на уровнях 1000-150 гПа и 100-10 гПа. Замечено, что часто отрицательные аномалии СКМ перед аномалиями холода в восточной части Балтийского региона сперва появляются в стратосфере и за тем передаются вниз (рис. 7). Однако, иногда шум колебаний значений СКМ на различных изобарических поверхностях делает затруднительными неоспоримые выводы о существующих связях, и чем больше проявляются вариации значений СКМ, тем сложнее обнаружить первоначальный сигнал. По этой причине, далее рассматривались характеристики волновой активности и термодинамическое состояние средней стратосферы во время аномальных похолоданий, наблюдаемых в восточной части Балтийского региона.

Для оценки распространения планетарных волн и их воздействия на параметры зонального ветра в стратосфере смоделированы трехмерные потоки волновой активности по уравнению Р.А. Пламба [10]. Трехмерный вектор потока волновой активности описывает распространение планетарных волн по долготе, широте и высоте.

$$\vec{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \frac{p}{p_0} \cos \varphi \begin{pmatrix} v'^2 - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(v'\varphi')}{\partial \lambda} \\ -u'v' + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(u'\varphi')}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \varphi}{S} \left[v'T' - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(T'\varphi')}{\partial \lambda} \right] \end{pmatrix} \quad (3)$$

где, p - давление, p_0 – давление равно 1000 гПа, Ω - угловая скорость вращения Земли, λ - долгота, φ - широта, a - радиус Земли, S - параметр статической устойчивости, u' - возмущение зональной скорости (отклонение от среднего по долготе значения), v' - возмущение меридиональной скорости, T' - возмущение температуры, φ' - возмущение геопотенциала.

Параметр статической устойчивости рассчитывается следующим образом:

$$S = \frac{\partial \hat{T}}{\partial z} + \frac{k\hat{T}}{H} \quad (4)$$

где \hat{T} – температура осредненная по территории Северного полушария от 20° с.ш., k - коэффициент теплопроводности, H – высота.

Для оценки изменения баланса притока и оттока вихревой энергии в качестве начального условия было выбрано полное отсутствие нисходящего волнового потока, т.е. блокирование вихревой энергии в стратосфере. Подробный анализ карт (за 1980–2013 гг.) волновой активности на высоте 30 км показал, что за несколько дней (в среднем 23 дня) до существенного похолодания в анализируемом регионе, в стратосфере нарушался энергетический баланс: зафиксированы сильные восходящие потоки волновой активности над континентом/-ами, а нисходящие потоки вообще отсутствовали (рис. 8-а). По предложенной в работе [6] схеме такая ситуация способствует нарушению термобарического поля стратосферы и развитию ВСП, так как из-за избытка энергии стратосфера согревается и полярный вихрь (ПВ) ослабляется.

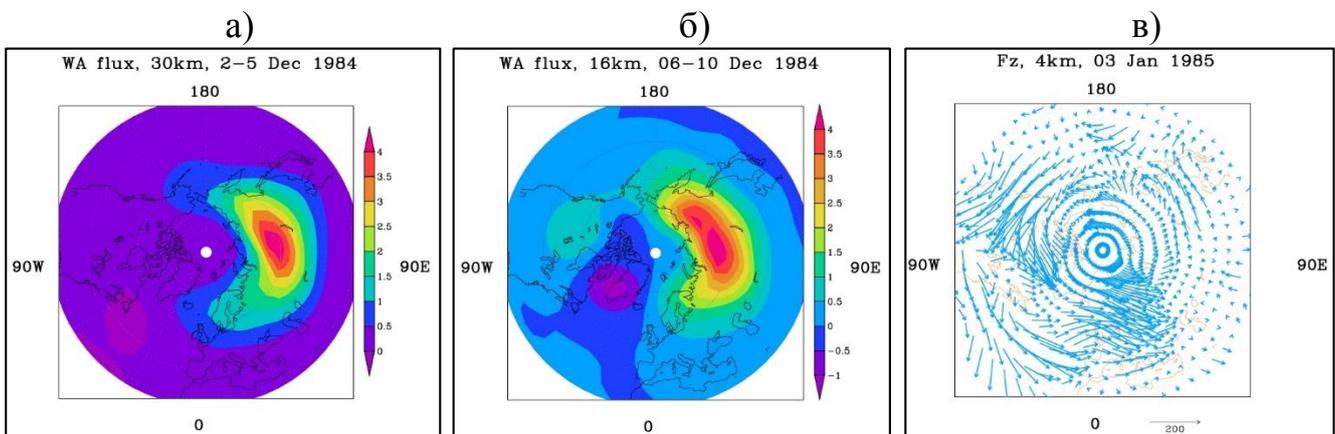


Рисунок 8 – Долготно-широтное распределение вертикального потока волновой активности на высоте 30 км, рассчитанное на 2-5 декабря 1984 г. (а) и на 6–10 декабря 1984 г. (б), и долготно-широтное распределение горизонтального потока волновой активности на высоте 4 км, рассчитанные на 3 января 1985 г. (один день до аномального похолодания) (в)

Карты, построенные по данным о геопотенциальной высоте (10 гПа), показывают, что во время блокирования энергии в стратосфере замечено образование стратосферного антициклона в большинстве случаев с местоположением его центра над

восточным побережьем Тихого океана (рис. 9-а), который в последствие усиливается и смещается в сторону полюса. Дальнейшее его развитие (интенсификация) приводит к деформации ПВ: наблюдается его смещение к югу и/или разбиение. На пример, зимой 1984–1985 г. зафиксированы два случая полного разбиения ПВ на две ячейки (Рис. 9-б), в конце декабря и в середине января, а стратосферный антициклон над полюсом наблюдался большую часть января. В 1985 году также зафиксированы два длительных периода аномальных/экстремальных похолоданий в Балтийском регионе.

Установлено, что во время появления стратосферного антициклона, обнаружено ослабление зонального ветра и дальнейшее его прогрессирующее отклонение от нормы (отрицательные аномалии), а ВСП (максимальное отклонение температуры и зонального ветра на уровне 10 гПа) происходит после блокирования энергии в стратосфере.

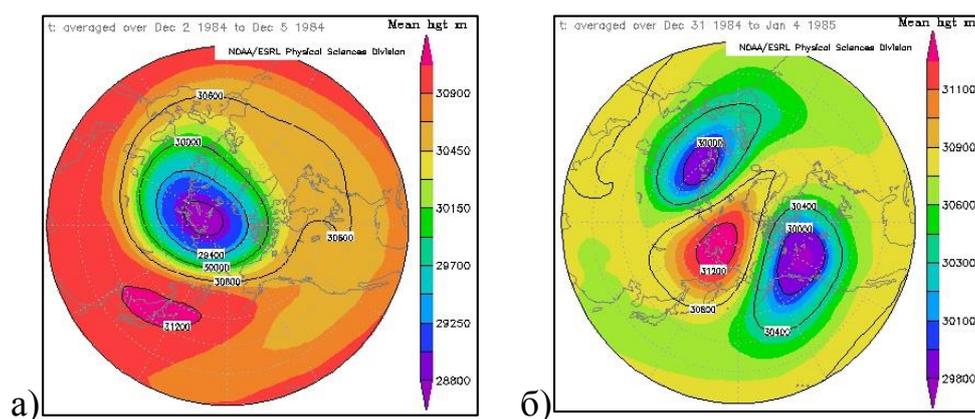


Рисунок 9 – Геопотенциальная высота на уровне 10 гПа 30 ноября - 4 декабря 2009 г. (во время блокирования энергии в стратосфере) (а) и 10-14 декабря 2009 г. (5 дней до похолодания в восточной части Балтийского региона) (б)

Далее в работе проанализирована активность волнового потока после блокирования энергии в стратосфере (рис.8-б). Установлено, что в это время усиливается нисходящий поток волновой активности в большинстве случаев над Северной Атлантикой (иногда над Азией), т.е. накопившаяся энергия стратосферы проникает вниз вплоть до тропосферы. В это время можно ожидать существенных изменений в тропосферной циркуляции. В работах отмечается, что нисходящая волновая активность, достигающая тропосферы, может повлиять на формирование аномалий в определенных регионах: усиление циклогенеза и блокирование в других регионах. Таким образом, возможно, что нисходящие потоки волновой активности над Северной Атлантикой могут усилить циклогенез в западной ее части и поспособствовать возникновению блокирующих процессов в восточной ее части, что характерно для существенных похолоданий в анализируемом регионе.

Карты долготно-широтного распределения горизонтального потока волновой активности на высоте 4 км рассчитанных за день до аномального похолодания (рис. 8-в) показывает, что в это время усиливается северная составляющая потока волновой активности, т.е. со стороны Арктики. Данная тенденция хорошо совпадает с характеристиками атмосферной циркуляции, описанными в работе, и с большой уверенностью можно сказать, что в это время можно ожидать развития аномалий погоды в восточной части Балтийского региона.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные при работе над диссертацией. К **основным результатам** проведенных исследований относятся следующие:

1. В восточной части Балтийского региона средняя температура воздуха за декабрь-февраль 1951–2013 гг. колебалась от $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в западной части региона до $-8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ на его северо-востоке. Средняя территориальная температура воздуха зимой равна $-5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тренд приземной температуры показывает, что за анализируемый временной интервал, температура воздуха поднялась на $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, но изменения не являются статистически значимыми.
2. Выделяя аномалии холода в восточной части Балтийского региона по данным МС, можно успешно применять критерий 10-го перцентиля, но при анализе аномалий температуры большой территории с разными географическими характеристиками, рекомендуется использовать стандартизированные (нормированные) ее значения, что устраняет влияние дисперсии.
3. За 1951–2013 гг. всего наблюдалось 24 холодных, 17 аномально холодных и 4 экстремально холодных месяцев зимнего времени года. За этот временной период также зафиксировано 43 случая кратковременных аномальных похолоданий: 23 случая похолоданий произошли до 1980 года и 20 после 1980 года, что свидетельствует о том, что вероятность аномальных кратковременных похолоданий, даже в условиях общего потепления климата, остается большой.
4. Сильные зимние похолодания в восточной части Балтийского региона в большинстве случаев были связаны с развитием блокирующих процессов над восточной частью Северо-Атлантического океана и вторжением арктических воздушных масс. В это время наблюдается сдвиг Исландской депрессии на юго-запад от ее климатического положения, а в анализируемом регионе зафиксировано повышенная повторяемость антициклонической циркуляции и восточный перенос воздушных масс (70% всех случаев). Данные процессы хорошо описывает изменчивость индекса Арктического колебания (АК). Реакция температурного поля запаздывает относительно изменений показателя АК в среднем на 2–6 суток.
5. В среднем за 23 дня до существенного похолодания в Балтийском регионе в стратосфере нарушается нормальная зимняя циркуляция: внезапные стратосферные потепления, уменьшение индекса Северной кольцевой моды (СКМ). Также установлено, что аномалии СКМ в стратосфере появляется в среднем на 20 дней раньше, чем в тропосфере.
6. Усиленная нисходящая волновая активность из стратосферы над Северной Атлантикой может способствовать возникновению блокирующих ситуаций на востоке океана, которые характерны для существенных похолоданий в Балтийском регионе. Долготно-широтное распределение горизонтального потока волновой активности на высоте 4 км указывает на то, что за один день до похолодания в восточной части Балтийского региона усиливается поток волновой активности со стороны Арктики на Северную Европу.

Прогностическая рекомендация: при прогнозе аномальных температурных условий зимой в восточной части Балтийского региона необходимо учитывать динамическое воздействие стратосферы на циркуляцию тропосферы.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Rimkus E., Kažys J., Butkutė S., Gečaitė I. Snow cover variability in Lithuania over the last 50 years and its relationship with large-scale atmospheric circulation // *Воревал Environment Research*. – 2014 – N. 19: 337–351.
2. Гечайте И., Погорельцев А.И., Угрюмов А.И. Влияние Арктического колебания на температурный режим восточной части Балтийского региона // *Солнечно-земная физика*, 2016. Т. 2, № 1. с. 64-70.

Другие публикации за период подготовки диссертации:

1. Gečaitė I. The role of stratosphere-troposphere coupling in the occurrence of extreme winter cold in the Eastern Baltic Sea region. Proceedings of the 19th Conference for Junior Researchers „Science – Future of Lithuania“. Environmental protection engineering. 2016, Vilnius, Lithuania.
2. Гечайте И. Макроциркуляционные процессы, влияющие на температурный режим восточной части региона Балтийского моря. Статья для конференции «Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы». 2016, Москва, Россия.

Публикации, представленные к печати:

1. Гечайте И., Угрюмов А.И., Погорельцев А.И. Волновое взаимодействие стратосфера-тропосфера, как предвестник аномальных похолоданий в восточной части Балтийского региона // *Ученые записки РГГМУ*, 2016, в печати.

Список использованных источников

1. Гечайте И., Погорельцев А.И., Угрюмов А.И. Влияние Арктического колебания на температурный режим восточной части Балтийского региона // *Солнечно-земная физика*. – 2016.– Т. 2.– № 1.– С. 64-70.
2. Холопцев А.В., Федоренко Н.И. Прогноз повторяемости меридиональной циркуляции северного типа в Северном Полушарии Земли // *Science Rise*. – 2015. – №1/1(6). – С. 7-13.
3. Cohen J. L., Furtado J. C., Barlow M. A., Alexeev V. A., Cherry J. E. Arctic warming, increasing snow cover and widespread boreal winter cooling // *Environmental Research Letters*. – 2012. – N.7. – P. 014007.
4. Hinssen Y., Van Delden A., Opsteegh T. Influence of sudden stratospheric warmings on tropospheric winds // *Meteorologische Zeitschrift*. – 2011. – N.20(3). – P.259-266.
5. IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – М.: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2001. – 881 p.
6. Jadin E.A. Stratospheric “wave hole” and interannual variations of the stratospheric circulation in late winter // *Natural Science*. – 2011. – Vol. 3. N.4. – P. 259-267.
7. Jenkinson A. F., Collison F. P. An initial climatology of gales over the North Sea // Technical report. Synoptic Climatology Branch Memorandum N. 62. Meteorological Office, Brecknell, 1977. – 18p.
8. Lamb H.H. British Isles Weather Types and a Register of Daily Sequence of Circulation Patterns, 1861–1971. – М.: Geo-physical Memoir 116, HMSO, London (UK), 1972. – 85 p.
9. Pfister C., Kington J., Kleinlogel G., Schule H., Siffert E. High resolution spatio-temporal reconstructions of past climate from direct meteorological observations and proxy-data. *Climatic Trends and Anomalies in Europe 1675-1715* /Frenzel B (ed.). G. Fischer/. – М.: Stuttgart, 1994. 329-375 pp.
10. Plumb R. A. On the Tree-Dimensional Propagation of stationary waves // *Journal of the Atmospheric Sciences*. – 1985. – Vol. 42. – N.3. – P. 217-229.
11. WMO. Guide to climatological practices (3rd ed.). (WMO-No. 100). – М.: Geneva, 2011. – 148 p.