



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование влияния стратосферы на погоду Якутии»

Исполнитель Жоховский Александр Евгеньевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук,
(ученая степень, ученое звание)

Савенкова Елена Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 10 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение.....	3
1. Стратосфера и её роль в формировании погодных условий	5
1.1. Общая характеристика стратосферы	5
1.2. Физические и динамические процессы в стратосфере.	6
1.3. Влияние стратосферных явлений на тропосферу (стратосферные потепления, полярный вихрь и др.).....	7
1.4. Современные методы исследования стратосферно-тропосферного взаимодействия.....	10
1.5. Планетарные волны	12
2. Физико-географическая характеристика территории Республики Саха (Якутия).....	14
2.1. Географическое положение и рельеф	14
2.2. Климат и климатическое районирование Якутии	16
2.3. Циркуляция атмосферы на территории Якутии и её влияние на формирование климата и погоды в регионе.....	20
3. Роль стратосферных волновых процессов в формировании экстремальных температур и погодных условий Якутии.....	23
3.1. Исходные данные	23
3.2. Анализ приземной температуры воздуха за период с 1964-2023 гг... ..	23
3.3. Анализ экстремально низких значений температуры воздуха	25
3.4. Влияние волновой активности на погоду в Якутии	26
Заключение	50
Список использованной литературы.....	51

Введение

В современном мире изменения климата приобрели характер глобального вызова, требующего глубокого научного осмысления и комплексного изучения. Трансформации атмосферных процессов оказывают многоплановое воздействие на различные сферы человеческой деятельности - от здравоохранения до продовольственной безопасности, а также на состояние природных экосистем. Среди ключевых факторов, определяющих климатическую изменчивость, особое место занимают квазидвухлетние колебания (КДК) - периодические изменения направления и скорости зональных ветров в экваториальной стратосфере с характерным временным циклом 24-30 месяцев. Не менее значимым объектом современных исследований выступают внезапные стратосферные потепления (ВСП) - резкие температурные аномалии в полярной стратосфере, способные вызывать масштабные перестройки атмосферной циркуляции. Эти явления, возникая на высотах 10-50 км, способны оказывать нисходящее влияние на тропосферные процессы, существенно модифицируя погодные условия у земной поверхности.

Особую научную ценность представляет изучение этих атмосферных феноменов в контексте Республики Саха (Якутия) - региона с уникальными климатическими характеристиками и выраженной континентальностью. Экстремальные температурные режимы Якутии, её географическое положение в высоких широтах и чувствительность к арктическим климатическим процессам делают этот регион идеальной природной лабораторией для исследования стратосферно-тропосферного взаимодействия [2]. Полученные в ходе таких исследований данные не только позволяют усовершенствовать региональные климатические модели, но и вносят существенный вклад в понимание фундаментальных механизмов глобальной атмосферной циркуляции. Это особенно актуально в условиях наблюдаемых климатических изменений, когда традиционные представления о динамике атмосферных процессов требуют

существенного пересмотра и уточнения. Целью данной работы является определить влияние волновых процессов в стратосфере на экстремальные морозы Якутии [5].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить температурный режим Якутии;
- изучить основные механизмы влияния стратосферы на тропосферу;
- исследовать роль внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в формировании аномально холодных зимних периодов.

В первой главе рассматривается стратосфера и её роль в формировании погодных условий. Дается общая характеристика стратосферы

Во второй главе рассматривается физико-географическое описание Республики Саха (Якутия).

В третьей главе проводится анализ стратосферных волновых процессов в формировании экстремальных температур и погодных условий Якутии.

1. Стратосфера и её роль в формировании погодных условий

1.1. Общая характеристика стратосферы

СТРАТОСФЕРА (от лат. *stratum* – настил, слой и сфера) представляет собой слой атмосферы, располагающийся между тропосферой и мезосферой на высотах от 7–16 км до 50–55 км над уровнем моря [1].

Высота нижней границы стратосферы увеличивается от зимы к лету и по направлению от полярных регионов к экватору. Часть атмосферы, включающая стратосферу и мезосферу, именуется средней атмосферой. Стратосфера характеризуется повышением температуры с высотой в среднем от -40 до -90 °С у тропопаузы и от -20 до $+10$ °С у стратопаузы. В холодных областях высокоширотной стратосферы зимой могут формироваться стратосферные облака.

Тепловой режим стратосферы определяется радиационным теплообменом, а также переносом теплоты планетарными волнами и меридиональной циркуляцией атмосферы. Нагревание стратосферы обусловлено, главным образом, поглощением ультрафиолетового излучения Солнца озоном, в то время как охлаждение происходит за счёт теплового излучения молекул CO_2 и H_2O [4]. Температура стратосферы в полярных и умеренных широтах испытывает значительные годовые колебания с зимним минимумом и летним максимумом. Зимой здесь наблюдаются сильные западные ветры (характерные для струйных течений), летом – более слабые восточные ветры. В областях 60° стратосферы ш. и 60° ю. ш. западные ветры достигают наибольшей скорости, достигая на верхней границе стратосферы значений около 50 м/с в Северном полушарии и около 100 м/с – в Южном. Зимой пояс сильного западного ветра формирует полярный стратосферный циклон. Этот вихрь препятствует межширотному обмену воздухом в стратосфере, что приводит к значительному охлаждению полярной стратосферы и содействует химическому

разрушению озона внутри вихря. В Северном полушарии зимой могут возникать внезапные потепления с резким (в течение нескольких дней) увеличением температуры стратосферы на 40–80 °С. При этом зональный ветер может изменить направление, а стратосферный полярный вихрь разрушиться [3].

Взаимодействие планетарных волн с западным воздушным потоком порождает в стратосфере меридиональную циркуляцию воздуха, восходящая ветвь которой располагается над экватором и в умеренных широтах «летнего» полушария, а нисходящая ветвь – в умеренных и полярных широтах «зимнего» полушария. Эта циркуляция осуществляет эффективный перенос озона из тропической верхней стратосферы в среднюю и нижнюю стратосферу умеренных и полярных широт. В нижней и средней экваториальной стратосфере происходит периодическая (со средним периодом около 29 месяцев) смена западных и восточных направлений ветра, что значительно влияет на атмосферную циркуляцию во внеэкваториальных широтах. В верхней части экваториальной стратосфере преобладают полугодовые колебания.

Газовый состав стратосферы определяется высотой над уровнем моря, широтой и сезоном.

Стратосфера – это область активных фотохимических процессов. Здесь сосредоточена основная масса атмосферного озона, отмечаются повышенные концентрации оксидов азота, паров азотной кислоты, а также водород- и хлорсодержащих радикалов. Водяного пара в стратосфере значительно меньше, чем в тропосфере, а относительное содержание CO₂ близко к его содержанию в тропосфере. В нижней стратосфере (на высоте 15–20 км) находится слой с повышенным содержанием аэрозоля (преимущественно сернокислотного), важным источником которого служат мощные вулканические извержения.

1.2. Физические и динамические процессы в стратосфере.

Физические процессы в стратосфере. Инверсия температуры – явление, которое характеризуется повышением температуры воздуха с высотой в слое

атмосферы. Оно может происходить как в приземном слое воздуха, начиная от подстилающей поверхности (приземная инверсия), так и в свободной атмосфере, а также при переходе от тропосферы к стратосфере.

Динамические процессы в стратосфере. Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой одно из наиболее интересных динамических явлений в стратосфере. ВСП характеризуются сильным и внезапным повышением температуры воздуха в средних и верхних слоях стратосферы, а также, зачастую, инверсиями климатических западных зональных ветров, связанных со струйным течением в стратосфере во время полярной ночи. Процесс возникновения ВСП обусловлен распространением планетарных волн из тропосферы в стратосферу и последующим взаимодействием с зональной циркуляцией. Тем не менее, нерегулярные колебания волновой активности, температуры и зонального ветра в верхней стратосфере также могут способствовать формированию ВСП.

Квазидвухлетние колебания. В экваториальной стратосфере (16-50 км) преобладает квазидвухлетняя изменчивость (КДК), выражающаяся в виде распространяющихся восточных и западных ветровых режимов. Период этих колебаний варьируется, однако в среднем составляет приблизительно 26 месяцев.

1.3. Влияние стратосферных явлений на тропосферу (стратосферные потепления, полярный вихрь и др.)

Из-за особенностей циркуляции внетропической стратосферы её взаимодействие с тропосферой в Северном полушарии ограничено зимним сезоном, который, как правило, продолжается с ноября по апрель. В этот период западный зональный ветер в стратосфере способствует вертикальному распространению планетарных волн из тропосферы в стратосферу. Влияние планетарных волн на зональную циркуляцию стратосферы и полярный вихрь, а также изменения их интенсивности на динамические процессы в тропосфере

представляют собой ключевой аспект взаимодействия этих двух слоёв атмосферы.

Циркумполярный (полярный) вихрь (ЦПВ) – это циклональная циркуляция, формирующаяся в полярных широтах на высоте, превышающей уровень 500 гПа [6].

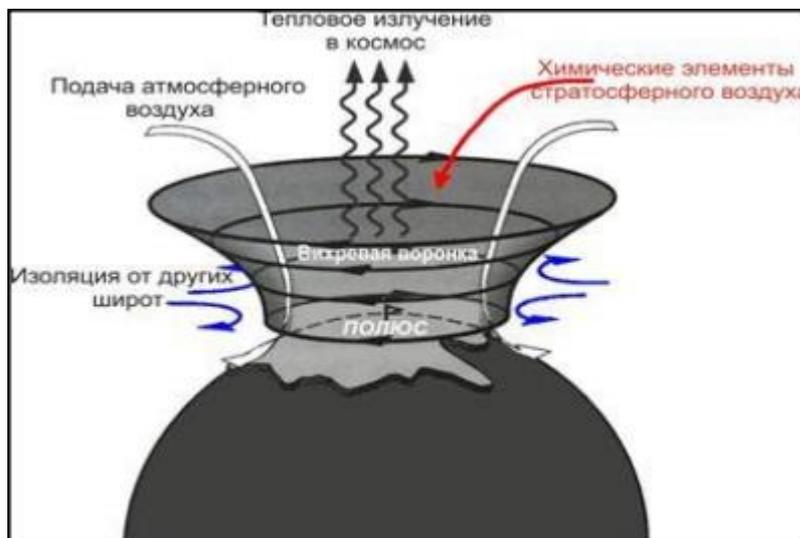


Рисунок 1 – Схематическое изображение структуры ЦПВ

ЦВП в стратосфере представляет собой:

- область снижения температуры, с увеличением на периметре области горизонтальных градиентов температуры.
- область усиления зонального западного ветра.

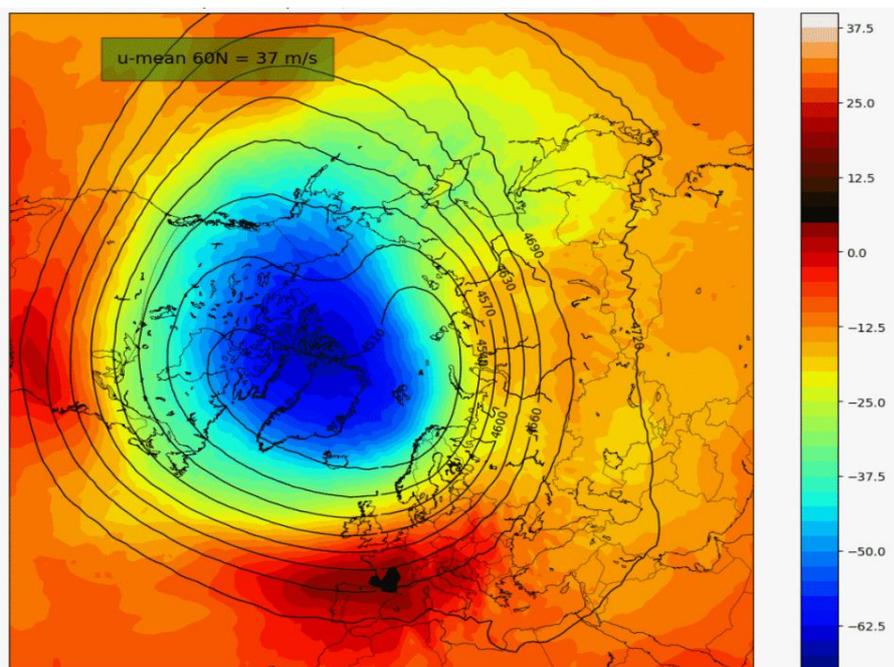


Рисунок 2 – Поле температур полярных северных широт

Наиболее мощные вестибулярные волны, возникающие в среднем каждую вторую зиму, приводят к изменению направления зонального ветра и повышению температуры в средней стратосфере (на уровне давления 10 гПа или ~32 км) с широтой к северу от 60° с.ш., что способствует формированию аномального меридионального градиента температуры. Именно от возникновения вестибулярных волн зависит степень активности и изолированности стратосферного полярного вихря в целом в течение зимнего сезона, что, в свою очередь, определяет уровень разрушения озона в полярной стратосфере.

Как известно, в условиях интенсивной зональной циркуляции в зимней стратосфере внутри холодного полярного вихря, изолированного от средних широт, могут формироваться полярные стратосферные облака (ПСО), которые участвуют в активации озоноразрушающих соединений и, как следствие, в деградации озонового слоя. В годы с ярко выраженными вестибулярными волнами стратосферный полярный вихрь ослабляется, смещается от полюса или в некоторых случаях разделяется на две части. При этом повышенная температура полярной стратосферы, а иногда и изменивший своё направление с

западного на восточный зональный ветер могут сохраняться вплоть до наступления весенней перестройки циркуляции стратосферы.

Связанные с вестибулярными волнами возмущения температурного режима распространяются до высот мезосферы и термосферы (на высотах 60–90 км), где состав атмосферы в значительной степени определяется солнечным ультрафиолетовым излучением, кинетикой химических процессов, а также переносом активных газовых компонентов из нижних слоёв, вызванным различными метеорологическими явлениями, среди которых вестибулярные волны являются наиболее значительными.

1.4. Современные методы исследования стратосферно-тропосферного взаимодействия.

Аэрологическое исследование стратосферы включает в себя анализ свойств атмосферы и характеристик атмосферных процессов с использованием, поднимаемых в верхние слои атмосферы приборов или посредством дистанционных методов.

Основной метод аэрологических исследований заключается в зондировании, то есть в осуществлении измерений различных метеорологических параметров. К ним относятся скорость и направление ветра, атмосферное давление, температура, влажность и другие физические величины, а также состав воздуха, включая газовые и аэрозольные компоненты.

Некоторые разновидности зондирования:

- ✓ Радиозондирование — осуществление измерений с использованием радиозондов.
- ✓ Самолётное зондирование — применение аппаратуры, поднимаемой на борту самолётов.

- ✓ Аэростатное зондирование — проведение исследований с помощью аэростатов.
- ✓ Ракетное и спутниковое зондирование.

Исследования стратосферы зачастую осуществляются с помощью метеорологических ракет. Сбор данных может производиться как в процессе восхождения ракеты, так и во время спуска отделившихся от неё приборов, которые возвращаются на землю с использованием парашюта.

При дистанционных методах применяются сигналы, отправляемые с земли, ракет и подобных носителей, включая акустические и электромагнитные (в том числе оптические) волны. По их изменениям в различных слоях атмосферы можно определить характеристики её состояния.

Моделирование и валидация. Моделирование стратосферы предоставляет возможность углублённого изучения динамики данного слоя атмосферы, включая исследование климатических явлений и прогнозирование метеорологических условий. Для этих целей применяются численные модели общей циркуляции, которые воссоздают физические процессы, протекающие в верхних слоях атмосферы.

Некоторые модели, которые применяют для моделирования стратосферы:

- ✓ SOCOLv4 (Solar Climate Ozone Links, версия 4) представляет собой модель, которая включает интерактивную химию, что очень важно для моделирования температуры, озона и динамических взаимосвязей между стратосферой и тропосферой в арктическом регионе.

- ✓ МСВА. Эта модель основана на Кельнской модели средней атмосферы, разработанной Лейпцигским институтом метеорологии. Радиативный компонент МСВА учитывает колебания в нагреве атмосферы в различное время суток и в разные сезоны в ультрафиолетовом и видимом спектрах, а также охлаждение в инфракрасном диапазоне.

- ✓ Модель, основанная на методе контурной динамики, позволяет смоделировать конфигурацию вихревых полей, включая мелкомасштабные структуры, с относительно невысокими вычислительными затратами.

✓ Модель средней и верхней атмосферы воспроизводит планетарные волны, включая стационарные планетарные волны и нормальные атмосферные моды (НАМ). Данные возможности модели способствуют более точному и реалистичному моделированию атмосферных процессов и явлений, что имеет первостепенное значение для исследований климата и прогнозирования погодных условий.

Валидация. Валидация моделей стратосферы является необходимым этапом для оценки их достоверности и точности. Результаты моделирования сопоставляются с данными реанализов метеорологической информации, а также с результатами наземных и спутниковых наблюдений. Кроме того, их сравнивают с выводами, полученными в результате моделирования с использованием альтернативных моделей атмосферной циркуляции.

Одной из значительных проблем, связанных с моделированием стратосферы, является ограниченный объем систематически собранных данных наблюдений в данной области, что значительно уступает объёму данных, доступных для метеорологического мониторинга в тропосфере.

1.5. Планетарные волны

Планетарные волны представляют собой крупномасштабные атмосферные возмущения, распространяющиеся в вертикальном направлении и связанные с глобальными изменениями термодинамических параметров атмосферы. Эти волновые процессы, объясняющие значительную часть долготной изменчивости в средней атмосфере, проявляются как в стационарной форме, так и в виде перемещающихся возмущений с периодами от нескольких суток до недель. Их взаимодействие с другими типами атмосферных волн и фоновыми характеристиками воздушной оболочки Земли приводит к существенным модификациям ветрового режима и термической структуры, особенно при достижении волнами значительных амплитуд. Особую климатическую

значимость планетарные волны приобретают благодаря своей роли в передаче стратосферных возмущений в тропосферные слои.

В зимний период над Северным полушарием формируется характерная циркуляционная картина, где струйное течение полярного фронта, расположенное в средних широтах (30-60° с.ш.), демонстрирует скорости от 120 до 250 миль/час. Устойчивость этого течения поддерживает стабильную конфигурацию полярного вихря с центром вблизи Северного полюса. Однако возникающие в системе волны Россби, генерируемые термическими контрастами океан-континент и орографическими препятствиями, способны существенно модифицировать эту картину. Их воздействие приводит к ослаблению и деформации вихревой структуры, делая её уязвимой для вторжений тёплых воздушных масс. Последующая дестабилизация полярного вихря может вызвать масштабные выносы арктического воздуха в южном направлении, приводя к экстремальным похолоданиям на обширных территориях Евразии и Северной Америки [7].

Современные представления о стратосферно-тропосферном взаимодействии, сформированные на основе исследований середины XX века, подчёркивают ключевую роль планетарных волн в динамических процессах атмосферы. Эти волновые возмущения, проникая из тропосферы в стратосферные слои, существенно влияют на зональную циркуляцию и становятся важным фактором формирования таких явлений, как внезапные стратосферные потепления, модификации полярного вихря и изменения в циркуляции Брюера-Добсона. Обратное влияние стратосферных волновых процессов на тропосферу через механизмы нисходящего распространения возмущений делает изучение их изменчивости критически важным для понимания комплексных механизмов климатической системы [11]. Особый научный интерес представляет анализ сверхдлинных волн, обладающих уникальной способностью к вертикальному переносу энергии между атмосферными слоями.

2. Физико-географическая характеристика территории Республики Саха (Якутия)

2.1. Географическое положение и рельеф

Республика Саха (Якутия) занимает исключительное положение в России как самый крупный по площади субъект федерации. Этот обширный регион расположен в северо-восточной части Сибири и простирается от Станового хребта на юге ($55^{\circ}30'$ с.ш.) до арктического побережья на севере (77° с.ш. на островах). Территория республики охватывает колоссальное пространство - около 3,1 млн квадратных километров, что превышает площадь многих европейских государств вместе взятых.

Географическое положение Якутии характеризуется экстремальной протяженностью: с севера на юг регион растянулся на 2000 км, а с запада на восток - на 2500 км. Столица республики - город Якутск - находится в её центральной части. Особенностью региона является то, что более 40% его территории расположено за Полярным кругом, что определяет уникальные природные условия этих районов.

Почти весь регион находится в зоне вечной мерзлоты, причем около 90% территории (2,8 млн км²) характеризуется сплошным мерзлотным распространением. Лишь на крайнем юго-западе мерзлота становится прерывистой. Рельеф Якутии преимущественно горный - около двух третей территории занимают различные горные системы и плоскогорья, тогда как низменности составляют лишь около трети общей площади.

Такие масштабы и географическое положение создают исключительное разнообразие природных условий и ресурсов. От арктического побережья на севере до горных хребтов на юге, от западных плоскогорий до восточных горных цепей - Якутия представляет собой уникальный природный комплекс с характерными только для этого региона особенностями климата, растительности и животного мира.



Рисунок 2.1. Физико-географическая карта Якутии

Территория Республики Саха (Якутия) расположена в пределах двух крупных геоструктурных элементов - стабильной Сибирской платформы на западе и подвижной Верхояно-Чукотской складчатой области на востоке, что обуславливает значительную неоднородность геологического строения и рельефа региона. Западные районы республики, приуроченные к восточной окраине Сибирской платформы, характеризуются преобладанием плоскогорий, пластовых плато и равнин, лишь на юге переходящих в расчленённое нагорье Алданского щита.

Восточная часть Якутии, относящаяся к Верхояно-Колымской горной системе, демонстрирует совершенно иной рельефный облик. Здесь преобладают меридионально вытянутые горные цепи - Верхоянский, Момский хребты и хребет Черского, чередующиеся с межгорными низменностями. Особый интерес представляет северная часть республики, где прибрежные низменности Арктического побережья контрастируют с возвышенными участками Среднесибирского плоскогорья.

Рельеф играет ключевую роль в формировании микроклиматических

особенностей региона. Горные системы создают чётко выраженную орографическую преграду, способствуя образованию устойчивых зимних инверсий в межгорных котловинах и речных долинах. Ярким примером служит контраст между температурными режимами Верхоянска, расположенного в долине (-50°C в январе), и склонов Верхоянского хребта на той же широте, но на высоте 1350 м (-28°C). Такие рельефные особенности в сочетании с тектонической неоднородностью создают уникальные природные условия, определяющие специфику якутского ландшафта.

2.2. Климат и климатическое районирование Якутии

Республика Саха (Якутия) занимает обширные пространства в экстремально высоких широтах Северного полушария, охватывая три климатических пояса: арктический, субарктический и умеренный. Такое уникальное географическое положение определяет особые климатические условия региона.

Территория Якутии находится в зоне активного взаимодействия двух основных воздушных масс:

- арктических воздушных потоков, формирующихся над просторами Северного Ледовитого океана
- континентальных воздушных масс умеренных широт Евразийского материка

Ключевые особенности географического положения региона включают: крайнюю северо-восточную локализацию в пределах Евразии, близость к Северному Ледовитому океану, значительную удалённость от смягчающего влияния Атлантического океана.

Основные климатообразующие факторы Якутии можно систематизировать следующим образом:

- географическая широта и положение относительно океанов;
- особенности рельефа местности;

- глобальные процессы атмосферной циркуляции.

Особое значение имеет меридиональная ориентация речных долин и равнинных территорий, которые способствуют аккумуляции холодных воздушных масс в зимний период, создают условия для формирования устойчивых температурных инверсий и препятствуют свободному перемещению воздушных потоков в северо-южном направлении

Такое сочетание географических и орографических факторов приводит к формированию экстремально континентального климата с рекордными годовыми амплитудами температур и ярко выраженной сезонной изменчивостью погодных условий.

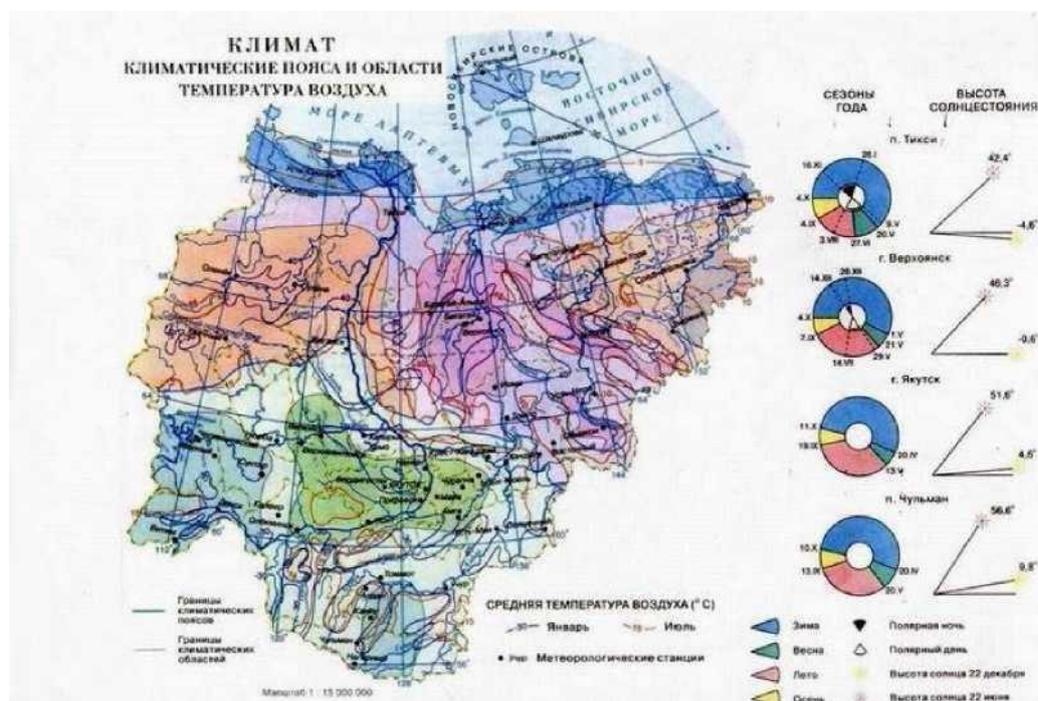


Рисунок 2.2. Карта климатических поясов и климатических областей Якутии

Якутия характеризуется экстремальными климатическими условиями, которые формируются под влиянием её географического положения и сложного взаимодействия атмосферных процессов. Для большей части региона типичен резко континентальный климат с низким уровнем влажности и выраженной сезонной изменчивостью [12].

Расположение в высоких широтах определяет неравномерное

распределение солнечной радиации в течение года, что приводит к значительным колебаниям продолжительности светового дня. Зимой преобладают длинные ночи с сумеречным освещением, а за полярным кругом наступает период полярной ночи, когда солнце не появляется над горизонтом. Летом, напротив, светлое время суток резко увеличивается — на юге наблюдаются белые ночи, а в заполярных районах устанавливается круглосуточный полярный день.

Радиационный режим Якутии также имеет ярко выраженную сезонность. С октября по март из-за низкого положения солнца и высокой отражательной способности снежного покрова земная поверхность теряет больше тепла, чем получает, что приводит к отрицательному радиационному балансу. Накопление тепла начинается лишь в апреле и достигает максимума в июле, когда солнечная активность становится наиболее интенсивной. Эти особенности радиационного фона в сочетании с континентальностью климата формируют экстремальные температурные условия, характерные для региона.

Отличительная черта климата - выраженный антициклональный режим погоды зимой и частые вторжения воздушных масс со стороны Северного Ледовитого океана с малым содержанием водяного пара летом. Зима является продолжительной, холодной и малоснежной, а лето короткое, на большей части территории засушливое с относительно высокими температурами. В Якутии самая долгая и самая холодная зима в России.

Основными факторами, определяющими уникальность климата, являются характер общей циркуляции воздушных масс и физико-географические условия региона — его удалённость и изолированность горными системами от Атлантического и Тихого океанов, открытость по направлению к Северному Ледовитому океану, а также значительная протяжённость как с севера на юг, так и с запада на восток.

На территории Якутии климат резко континентальный, проявляющийся очень низкими зимними температурами до (-50, -65С) и высокими летними температурами до + 35С. Сильные различия между зимними и летними

температурами воздуха связаны с сильным переохлаждением подстилающей поверхности зимой и прогревом летом. На морских побережьях климат более мягкий, так как моря осенью и зимой несколько согревают берега, а в тёплое время года, наоборот, остывают.

Поскольку Якутия расположена в высоких широтах, территория испытывает неравномерное солнечное освещение в течение года, что непосредственно сказывается на продолжительности дня в разные сезоны. Зимой ночи становятся продолжительными, преобладают сумеречные часы, а к северу от полярного круга наблюдается непрерывная темнота. Летом же продолжительность дня значительно увеличивается, наступают белые ночи, а севернее Полярного круга устанавливается круглосуточный полярный день. С середины октября по март, из-за низкого положения солнца и снежного покрова, эффективная радиация Земли превышает поглощённую радиацию, что приводит к отрицательному радиационному балансу, и накопление солнечного тепла начинается в основном в апреле и продолжается до июля.

Здесь длинная зима и короткое лето. Максимальная разница температур между самым холодным месяцем - январем и самым теплым месяцем - июлем составляет 90-95 ° С. В Якутии два самых холодных города в мире - Оймякон (-71,2 ° С) и Верхоянск (-68 ° С). Абсолютное значение минимальной температуры воздуха достигает -72 ° С. По общей продолжительности периода с отрицательными температурами (до 9 месяцев в году) республика не имеет аналогов в Северном полушарии. Якутск - самый контрастный по температурному режиму город в мире, его годовой перепад температур составляет 102,7 ° С, это также самый крупный город в зоне вечной мерзлоты. Якутия - зона сплошной вечной мерзлоты, которая только на крайнем юго-западе переходит в зону ее прерывистого распространения. Средняя толщина мерзлого слоя достигает 300-400 метров. В горах Восточной Якутии 485 ледников общей площадью 413 км² и запасом пресной воды около 2 тыс. Км³. Зима в Республике Саха (Якутия) начинается в начале октября и длится на большей части территории до конца апреля. Якутская зима долгая,

очень холодная и малоснежная. Вторым осенним месяцем - октябрь, в это время земля еще питает воздух своим теплом. Температура воздуха днем умеренно отрицательная (-6 - -8° С). Но прилив холода чувствуется достаточно, особенно ночью. Наличие открытых с севера меридиально вытянутых низменных низменностей, окаймленных горными системами, приводит к замерзанию холодного воздуха зимой.

С юга горные системы Алданского и Колымского нагорий препятствуют поступлению тихоокеанских морских воздушных масс. Верхоянские горы являются барьером для атлантических морских воздушных масс, что обуславливает крайнюю суровость климата Восточной Якутии. В возвышенностях, нагорных и горных районах с высотой увеличивается количество осадков.

Из-за сильного выхолаживания зимней поверхности в Якутии наблюдается удивительное явление природы - образование температурной инверсии воздуха, т.е. повышение температуры воздуха с высотой. Этот феномен впервые установил в 1917-1918 г.г. А.А. Семенов во время метеорологических наблюдений на руднике Эндыбал, находящейся на высоте 1020 м. Инверсии температур наблюдаются лишь до высоты 2-3 км, но повышение температуры может достигнуть 30°С.

Природно-климатические условия Республики Саха (Якутия) характеризуются как экстремальные. Здесь накоплен уникальный опыт ведения промышленности и сельского хозяйства в экстремальных климатических условиях Севера, применены первые технологии жилищного строительства на вечной мерзлоте.

2.3. Циркуляция атмосферы на территории Якутии и её влияние на формирование климата и погоды в регионе

Атмосферные процессы на территории Якутии формируются под воздействием глобальных циркуляционных механизмов, однако существенно

модифицируются под влиянием уникальных физико-географических характеристик региона. Сезонная изменчивость циркуляционных режимов проявляется в резких трансформациях свойств воздушных масс, перераспределении барических полей и изменении траекторий перемещения циклонов и антициклонов.

В осенне-зимний период над регионом устанавливается доминирующее влияние континентального воздуха умеренных широт, формирующегося в области отрога Азиатского антициклона. К октябрю происходит усиление и часто полная автономизация барического гребня, ориентированного в юго-западном - северо-восточном направлении. Эта устойчивая барическая система, редко подвергающаяся разрушению в зимний период, обуславливает формирование исключительно холодных (до -50°C и ниже) и сухих воздушных масс с минимальным влагосодержанием. Установление антициклонического режима приводит к преобладанию малооблачной погоды со слабыми ветрами и интенсивными радиационными выхолаживаниями.

Зимний циркуляционный режим характеризуется полным доминированием Сибирского антициклона, создающего условия для экстремально холодной и безветренной погоды с частыми морозными туманами в населённых пунктах. Кратковременные нарушения этого режима связаны преимущественно с адвекцией атлантических и тихоокеанских воздушных масс, сопровождающейся незначительным потеплением и слабыми снегопадами. Особый интерес представляют случаи зимней адвекции:

- на северо-востоке региона - при восточных и северо-восточных потоках тихоокеанского воздуха;
- в центральных и юго-восточных районах - при северо-западном выносе воздушных масс со стороны Охотского моря.

Весенний переходный период характеризуется активизацией западно-восточного переноса с увеличением повторяемости циклонов западного и южного происхождения, приносящих значительные осадки. Летний циркуляционный режим определяется положением:

- арктического фронта (около 65° с.ш.) - разделяющего арктические и умеренные воздушные массы;

- умеренного фронта (около 50° с.ш.) - разграничивающего умеренные и тропические воздушные потоки.

Адвекция арктического воздуха вызывает летние похолодания с заморозками, тогда как вторжение тропических масс приводит к установлению аномально жаркой погоды. Основное количество осадков связано с западными циклонами, тогда как южные циклонические вторжения наблюдаются значительно реже.

Осенняя перестройка циркуляции проявляется в постепенном усилении антициклонического влияния с формированием устойчивых барических гребней в тыловых частях циклонов. Вертикальная составляющая циркуляционных процессов играет важную роль в формировании регионального климата, особенно в условиях интенсивного радиационного выхолаживания зимой и выраженного прогрева летом.

Уникальность атмосферной циркуляции Якутии заключается в контрастном чередовании арктических и континентальных умеренных воздушных масс, отличающихся исключительно низким влагосодержанием, что обуславливает дефицит атмосферных осадков на большей части территории. Эти особенности необходимо учитывать при анализе современных климатических изменений в регионе.

3. Роль стратосферных волновых процессов в формировании экстремальных температур и погодных условий Якутии

3.1. Исходные данные

Данные для расчетов по 17 станциям Республики Саха (Якутия) были взяты из архива ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (Мировой Центр данных) [10]. Ниже представлена карта с указанием географических положений станций.



Рисунок 3.1 – Карта Республики Саха (Якутия) с расположением метеорологических станций

3.2. Анализ приземной температуры воздуха за период с 1964-2023 гг.

Для исследования стратосферных влияний на погоду Якутии были проанализированы температуры воздуха по 17 станциям. Ниже представлен годовой ход температуры воздуха по выбранным станциям (рис. 3.2).

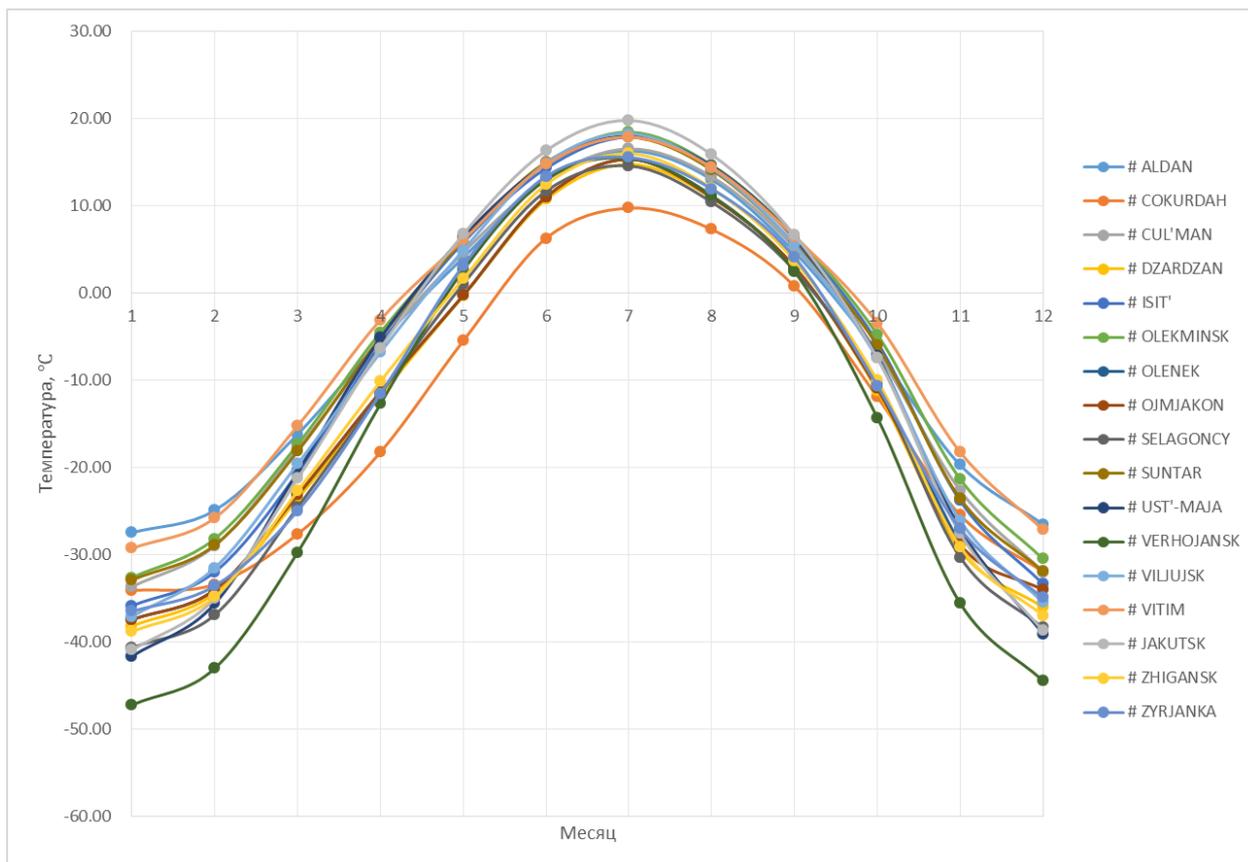


Рисунок 3.2 – Среднемесячные температуры воздуха

По полученным данным выявили экстремумы для зимнего периода с декабря по февраль. В зимний период экстремально низкие температуры наблюдались в Верхоянске (-47.2 °C), обусловлено это тем, что Верхоянск находится в глубокой долине, и подвержен влиянию Азиатского антициклона, который приносит холодный и сухой воздух. Самыми теплыми пунктами являются Витим (-29.2 °C) и Алдан (-27.4 °C).

В летний период в Якутске наблюдались самые теплые дни, такое значение относительно других станций можно обусловить сильным антропогенным влиянием и географическим положением. А самое холодное лето наблюдается в Чокурдахе (9.8 °C), обусловлено это тем, что это один из самых северных населенных пунктов из рассматриваемого списка.

После анализа годового хода приземных температур был проведен анализ средних температур за период исследуемых данных и составлена карта

температурного распределения, по которой можно выделить холодные и теплые территории региона (рис. 3.3).

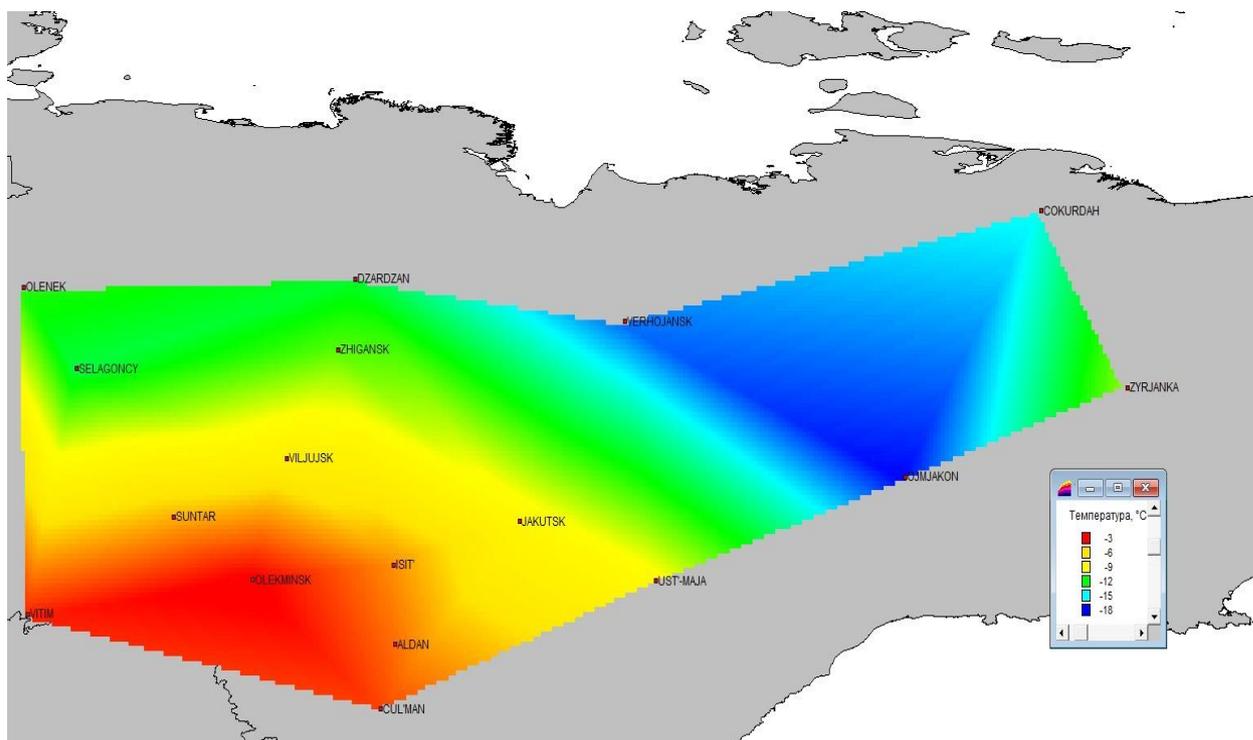


Рисунок 3.3 – Пространственное распределение температуры воздуха

Из выше представленного рисунка 3.3 можно отметить, что три станции – Верхоянск, Оймякон и Верхоянск находятся самые холодные и три станции в южной стороне – Витим, Олёмминск и Чульман являются самыми тёплыми. В дальнейшем для изучения и анализа будут отобраны эти станции, а также Якутск как столица региона.

3.3. Анализ экстремально низких значений температуры воздуха

Далее были проанализированы экстремальные значения температур для каждой станции отдельно, в два периода. Старый климат, который длился с 1964 по 1993 и новый климат с 1994 по 2023. Под экстремальными значениями были взяты 10% самых холодных показателей температур. Далее из этих значений были выявлены периоды сильных и устойчивых морозов, которые должны длиться от 5 дней и более (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Анализ экстремально низких значений температуры воздуха г. Якутска.

1	2	3	4	5	13	14	15	16	17
Индекс	Год	Месяц	День	Температура		1964-1993	-41,3	1994-2023	-38,0
24959	1964	12	21	-44,0					
24959	1964	12	22	-33,8					
24959	1964	12	23	-34,0					
24959	1964	12	24	-34,6					
24959	1964	12	25	-45,0					
24959	1964	12	26	-54,3					
24959	1964	12	27	-54,5					
24959	1964	12	28	-54,6					
24959	1964	12	29	-54,0					
24959	1964	12	30	-50,7					
24959	1964	12	31	-49,4					
24959	1965	1	1	-49,4					
24959	1965	1	2	-47,6					
24959	1965	1	3	-41,6					
24959	1965	1	4	-46,8					
24959	1965	1	5	-47,5					
24959	1965	1	6	-46,8					
24959	1965	1	7	-48,4					
24959	1965	1	8	-48,6					
24959	1965	1	9	-45,0					
24959	1965	1	10	-47,7					
24959	1965	1	11	-46,7					
24959	1965	1	12	-39,2					
24959	1965	1	13	-40,2					
24959	1965	1	14	-37,0					

Выше представлен пример таблицы анализа экстремально низких значений температур в г. Якутске. Из таблицы 3.1 можно заметить, что за последние 30 лет температура повысилась на 3.3°C, что говорит о том, что происходит потепление. Аналогичным образом были выделены устойчивые экстремально низкие температуры по остальным 6 станциям Республики.

3.4. Влияние волновой активности на погоду в Якутии

После того, как были выделены дни с экстремально низкими значениями температура за период с 1964 по 2023 гг. проанализировали архивные данные по волновым процессам в стратосфере за каждый зимний период. Ниже на рисунках 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 представлены распределения среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км,

амплитуда планетарной волны с волновым числом 1 и амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 для конкретных зимних периодов. Выделенные экстремальные продолжительные морозы по каждой станции были сравнены с теми датами, когда наблюдались сильная волновая активность и внезапные стратосферные потепления. Также были замечены случаи, когда наблюдались сильные морозы, но какой-либо стратосферной активности не наблюдалось.

Из рисунка 3.4 можно сделать вывод, что в те даты, когда наблюдались продолжительные низкие температуры в рассматриваемых пунктах, действительно было усиление волновой активности, а также внезапные стратосферные потепления. Ниже приведен пример таблицы по г. Якутску за зимний период с 1988-1989 гг. (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 1988-1989 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	1989	1	0	-33,0		
24959	1989	1	7	-26,3		
24959	1989	1	8	-34,9		
24959	1989	1	9	-45,1		
24959	1989	1	10	-47,5		
24959	1989	1	11	-43,3		
24959	1989	1	12	-42,1		
24959	1989	1	13	-44,1		
24959	1989	1	14	-35,2		
24959	1989	1	15	-34,5		
24959	1989	1	16	-35,3		
24959	1989	1	17	-39,9		
24959	1989	1	18	-43,9		
24959	1989	1	19	-46,7		
24959	1989	1	20	-47,2		
24959	1989	1	21	-42,4		
24959	1989	1	22	-43,4		
24959	1989	1	23	-44,7		
24959	1989	1	24	-44,0		
24959	1989	1	25	-44,7		
24959	1989	1	26	-45,0		
24959	1989	1	27	-47,3		
24959	1989	1	28	-41,0		
24959	1989	1	29	-37,2		
24959	1989	1	30	-36,3		

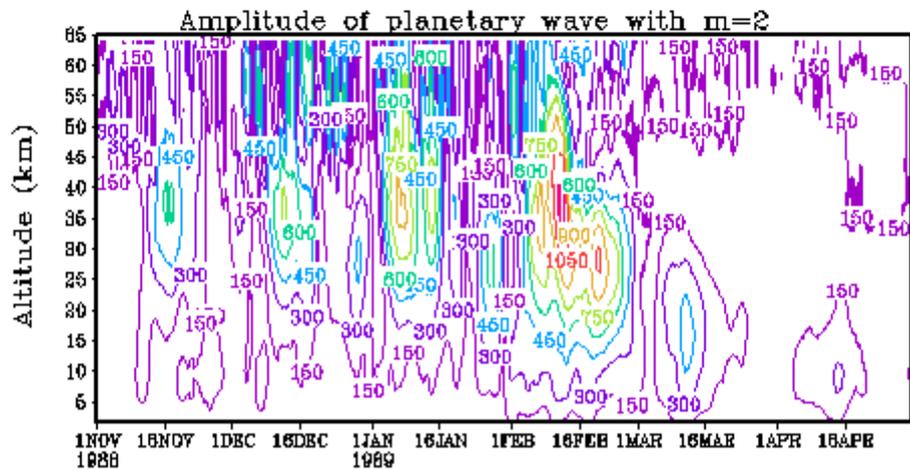
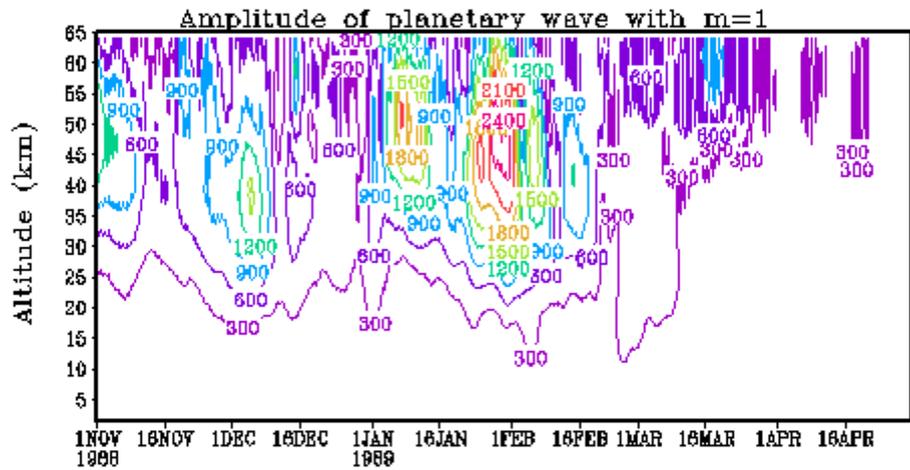
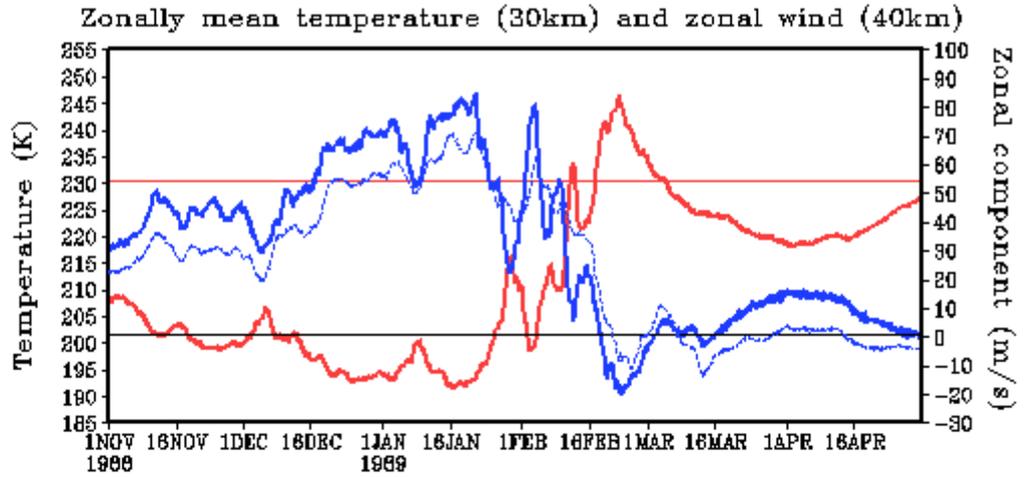


Рисунок 3.4 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 1988-1999)

Если сравнить таблицу 3.2 и рисунок 3.4, то можно заметить, что действительно в эти даты наблюдалось усиление волновой активности с волновым числом 1.

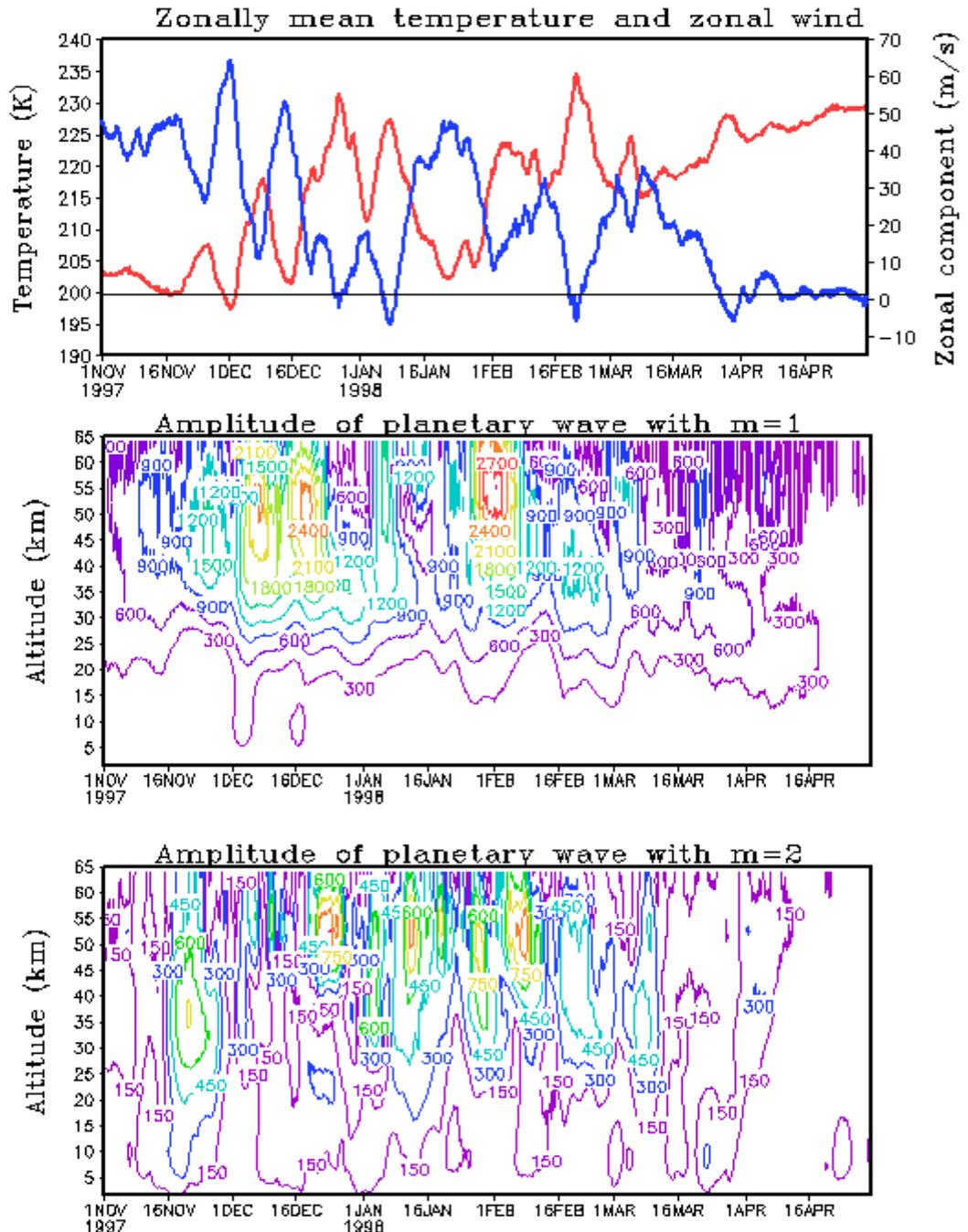


Рисунок 3.5 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2

(зима 1997-1998)

Таблица 3.3. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 1997-1998 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	1997	12	15	-34,9		
24959	1997	12	16	-43,1		
24959	1997	12	17	-47,6		
24959	1997	12	18	-47,5		
24959	1997	12	19	-47,7		
24959	1997	12	20	-45,9		
24959	1997	12	21	-38,7		
24959	1997	12	22	-37,2		
24959	1997	12	23	-39,6		
24959	1997	12	24	-34,5		
24959	1997	12	25	-25,7		
24959	1997	12	26	-38,0		
24959	1997	12	27	-40,1		

Судя по рисунку 3.5 и таблице 3.3, также можно сделать вывод, что 16.12.1997 было маленькое усиление волны с волновым числом 1.

Таблица 3.4. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2004-2005 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2005	1	15	-30,8		
24959	2005	1	16	-33,1		
24959	2005	1	17	-38,3		
24959	2005	1	18	-41,9		
24959	2005	1	19	-41,6		
24959	2005	1	20	-42,3		
24959	2005	1	21	-44,0		
24959	2005	1	22	-41,7		
24959	2005	1	23	-42,9		
24959	2005	1	24	-41,0		
24959	2005	1	25	-42,9		
24959	2005	1	26	-46,4		
24959	2005	1	27	-41,8		

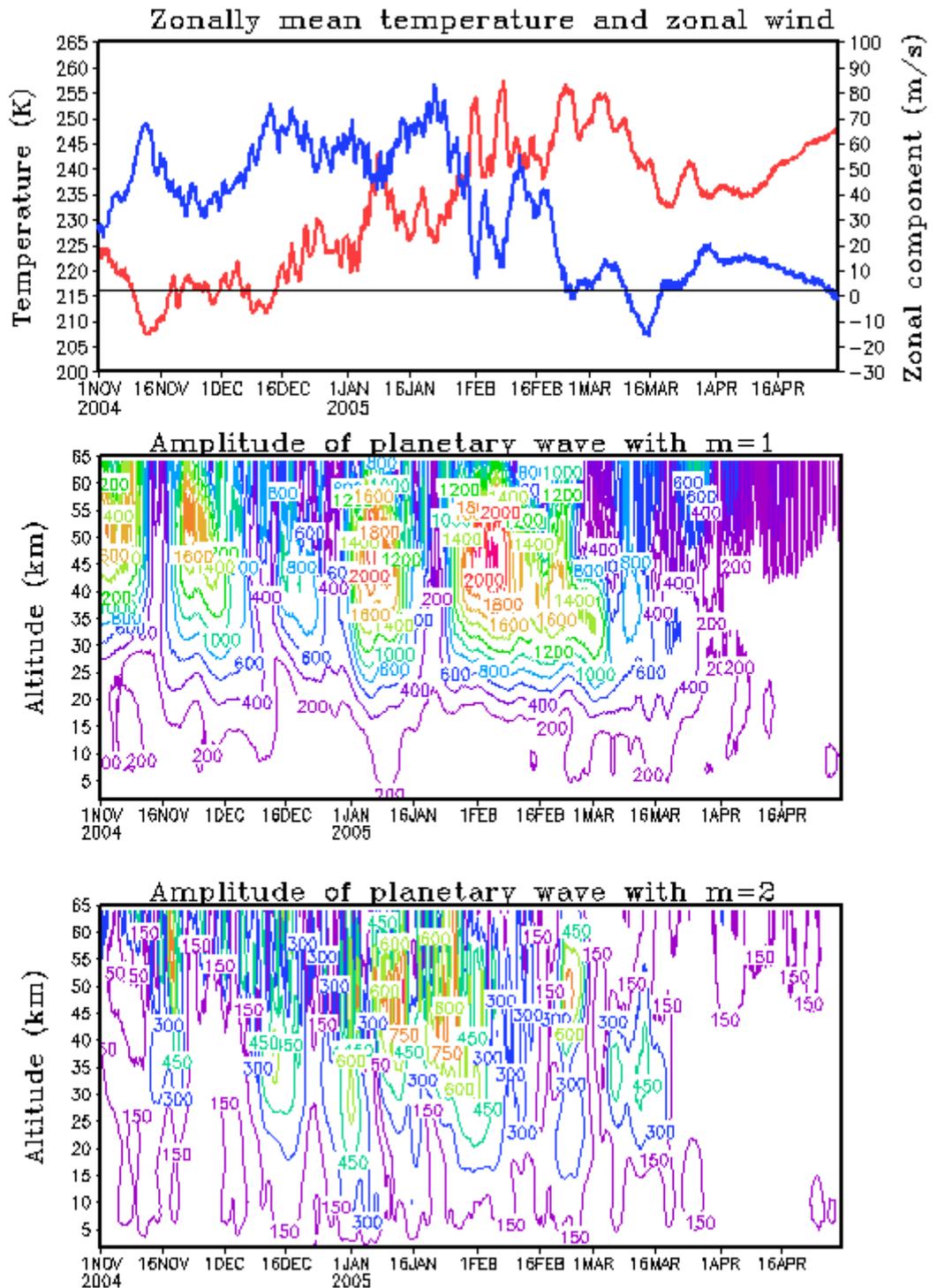


Рисунок 3.6 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2004-2005)

По рисунку 3.7 также видно, что ближе к середине января наблюдается усиление волны ($m=1$) и в таблице 3.4 отмечено, что были продолжительные морозы.

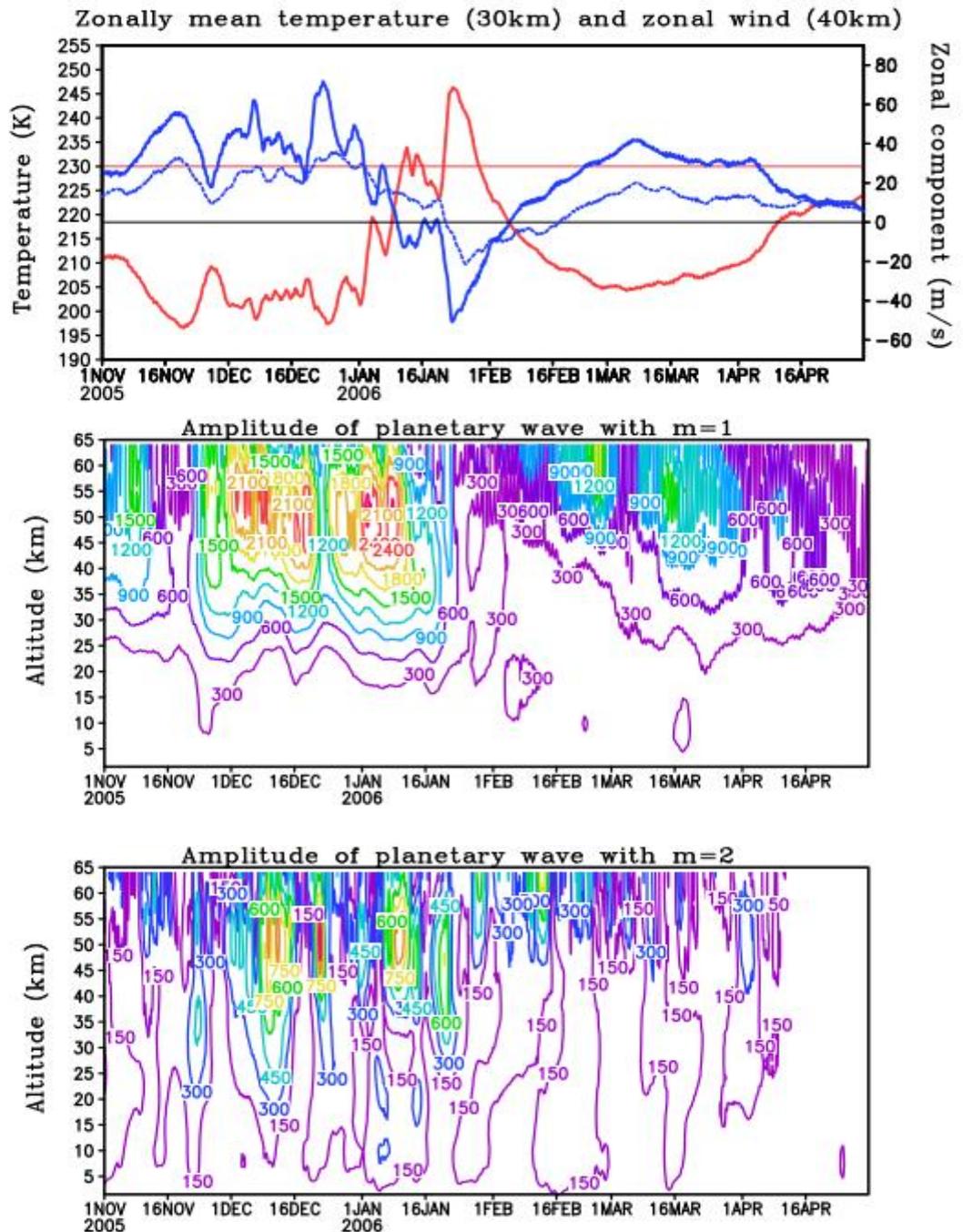


Рисунок 3.7 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2005-2006)

Таблица 3.5. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2005-2006 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2005	12	31	-40,3	сильная волна до середины января	
24959	2006	1	1	-38,5		
24959	2006	1	2	-39,9		
24959	2006	1	3	-45,4		
24959	2006	1	4	-44,7		
24959	2006	1	5	-39,5		
24959	2006	1	6	-43,2		
24959	2006	1	7	-44,1		
24959	2006	1	8	-39,8		
24959	2006	1	9	-36,5		
24959	2006	1	10	-40,8		
24959	2006	1	11	-41,7		
24959	2006	1	12	-43,4		
24959	2006	1	13	-44,4		
24959	2006	1	14	-45,1		
24959	2006	1	15	-46,7		
24959	2006	1	16	-45,6		
24959	2006	1	17	-47,1		
24959	2006	1	18	-49,3		
24959	2006	1	19	-50,8		
24959	2006	1	20	-49,2		
24959	2006	1	21	-43,5		
24959	2006	1	22	-41,7		
24959	2006	1	23	-38,3		

По рисунку 3.7 видно, что было усиление волновой активности ($m=1$) примерно с 01.01.2006 до середины января, а также по таблице 3.5 видно, что были продолжительные морозы в эти же даты.

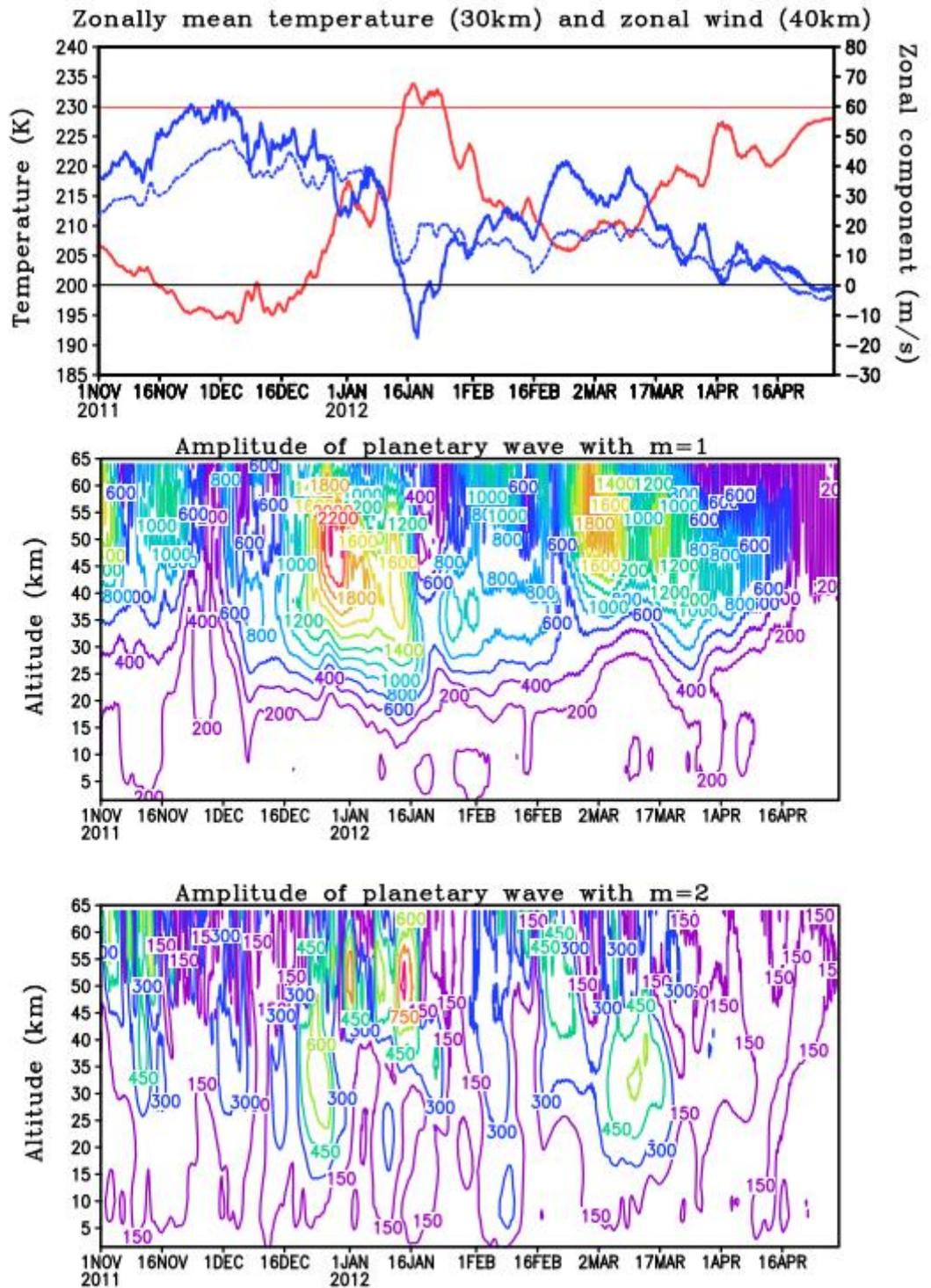


Рисунок 3.8 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2011-2012)

На рисунке 3.8 можно увидеть усиление волны ($m=2$) в середине января и, соответственно в таблице 3.6 тоже наблюдаются сильные морозы.

Таблица 3.6. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2011-2012 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2012	1	8	-42,9		
24959	2012	1	9	-43,1		
24959	2012	1	10	-44,3		
24959	2012	1	11	-48,8		
24959	2012	1	12	-48,9		
24959	2012	1	13	-49,0		
24959	2012	1	14	-45,8		

Ниже в таблице 3.7 представлена ситуация зимы 2012-2013 гг., когда экстремальные морозы длились 3 недели. Если посмотреть на рисунок 3.9, то в эти даты мы видим усиление волны с волновыми числами 1 и 2 ($m=1$, $m=2$).

Таблица 3.7. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2012-2013 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2012	12	26	-34,3		
24959	2012	12	27	-36,3		
24959	2012	12	28	-39,1		
24959	2012	12	29	-40,9		
24959	2012	12	30	-39,8		
24959	2012	12	31	-40,0		
24959	2013	1	1	-39,0		
24959	2013	1	2	-42,3		
24959	2013	1	3	-44,3		
24959	2013	1	4	-46,0		
24959	2013	1	5	-43,4		
24959	2013	1	6	-43,9		
24959	2013	1	7	-44,6		
24959	2013	1	8	-44,7		
24959	2013	1	9	-44,6		
24959	2013	1	10	-45,5		
24959	2013	1	11	-45,6		
24959	2013	1	12	-44,7		
24959	2013	1	13	-44,0		
24959	2013	1	14	-43,9		
24959	2013	1	15	-43,4		
24959	2013	1	16	-43,6		
24959	2013	1	17	-42,7		
24959	2013	1	18	-39,1		

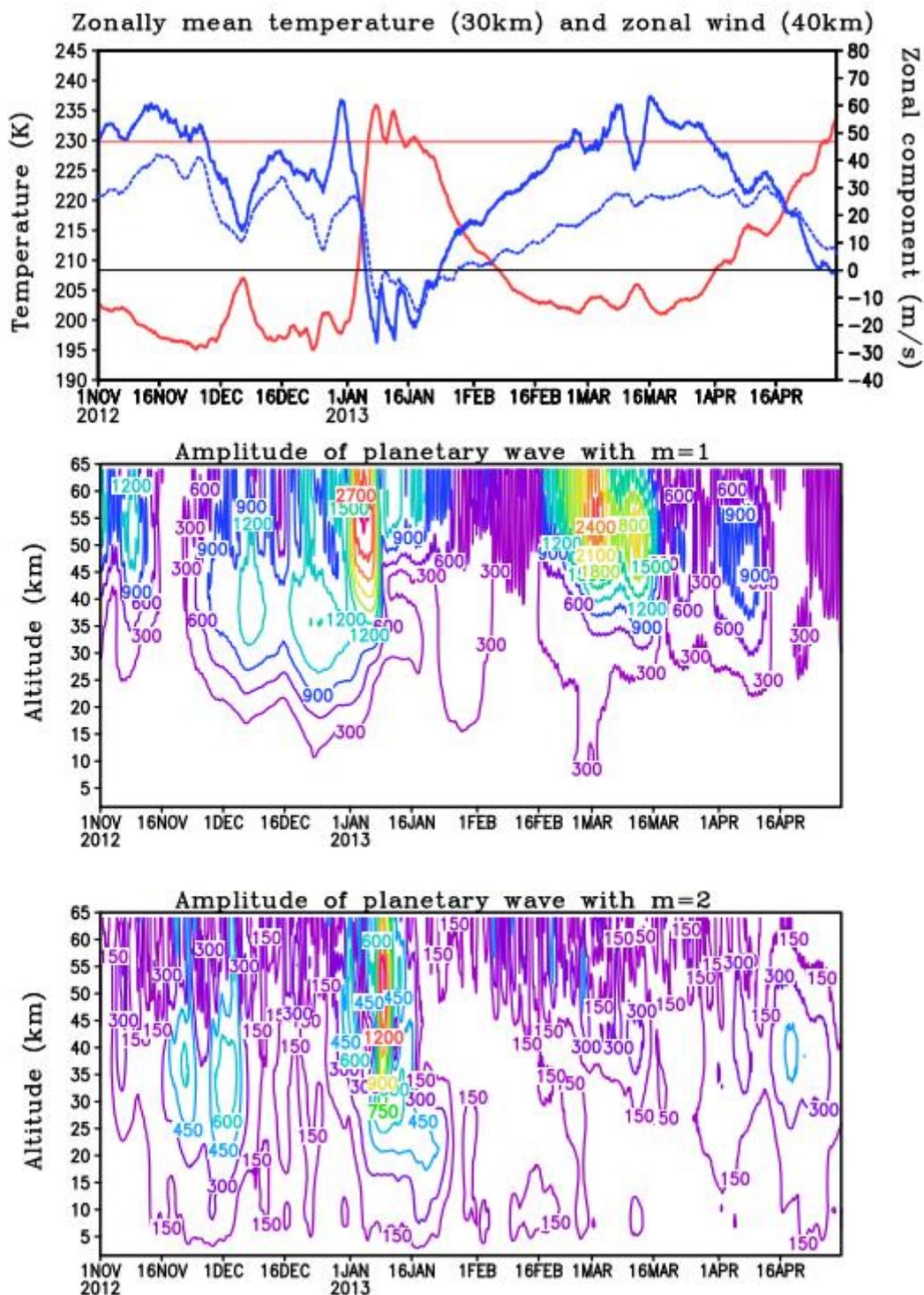


Рисунок 3.9 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2012-2013)

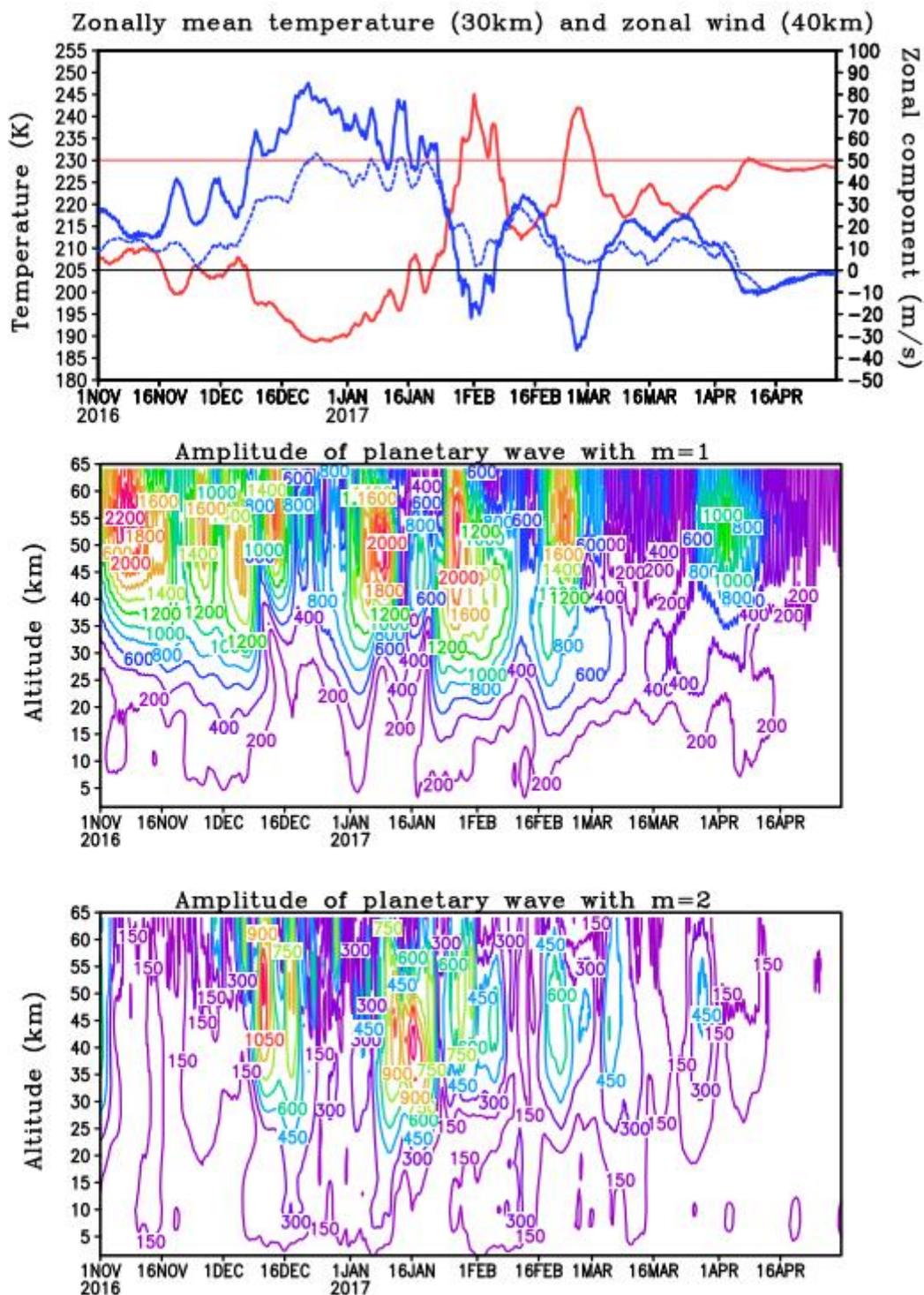


Рисунок 3.10 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2016-2017)

Таблица 3.8. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2016-2017 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2017	1	1	-35,0		
24959	2017	1	2	-33,5		
24959	2017	1	3	-33,2		
24959	2017	1	4	-26,5		
24959	2017	1	5	-28,8		
24959	2017	1	6	-40,6		
24959	2017	1	7	-41,9		
24959	2017	1	8	-40,1		
24959	2017	1	9	-39,5		
24959	2017	1	10	-39,3		
24959	2017	1	11	-43,6		
24959	2017	1	12	-33,2		
24959	2017	1	13	-31,3		
24959	2017	1	14	-31,8		
24959	2017	1	15	-36,5		

По рисунку 3.10 мы видим, что было усиление волновой активности с волновым числом 1 ($m=1$) и, аналогично, в таблице 3.8, также наблюдаются сильные морозы в те же даты.

Ниже на рисунке 3.11 представлены продолжительные морозы за зимний период 2017-2018 гг. можем увидеть два периода усиления волновой активности. В первом случае незначительно усиление волновой активности ($m=1$) происходит в те же даты, когда были сильные морозы по таблице 3.9. А второе усиление волновой активности происходит в начале февраля, что тоже совпадает с датами, когда были сильные морозы.

Таблица 3.9. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2017-2018 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2017	12	19	-38,9		
24959	2017	12	20	-42,0		
24959	2017	12	21	-42,3		
24959	2017	12	22	-41,8		
24959	2017	12	23	-41,0		
24959	2017	12	24	-42,5		
24959	2017	12	25	-42,8		
24959	2017	12	26	-43,2		
24959	2017	12	27	-44,4		
24959	2017	12	28	-41,1		
24959	2017	12	29	-38,9		
24959	2017	12	30	-32,6		
24959	2017	12	31	-32,1		
24959	2018	1	1	-30,1		
24959	2018	1	2	-28,1		
24959	2018	1	3	-28,0		
24959	2018	1	4	-27,0		
24959	2018	1	5	-32,3		
24959	2018	1	6	-34,9		
24959	2018	1	7	-36,2		
24959	2018	1	8	-38,2		
24959	2018	1	9	-38,4		
24959	2018	1	10	-40,7		
24959	2018	1	11	-39,4		
24959	2018	1	12	-40,8		
24959	2018	1	13	-44,7		
24959	2018	1	14	-41,5		
24959	2018	1	15	-39,9		
24959	2018	1	16	-38,9		

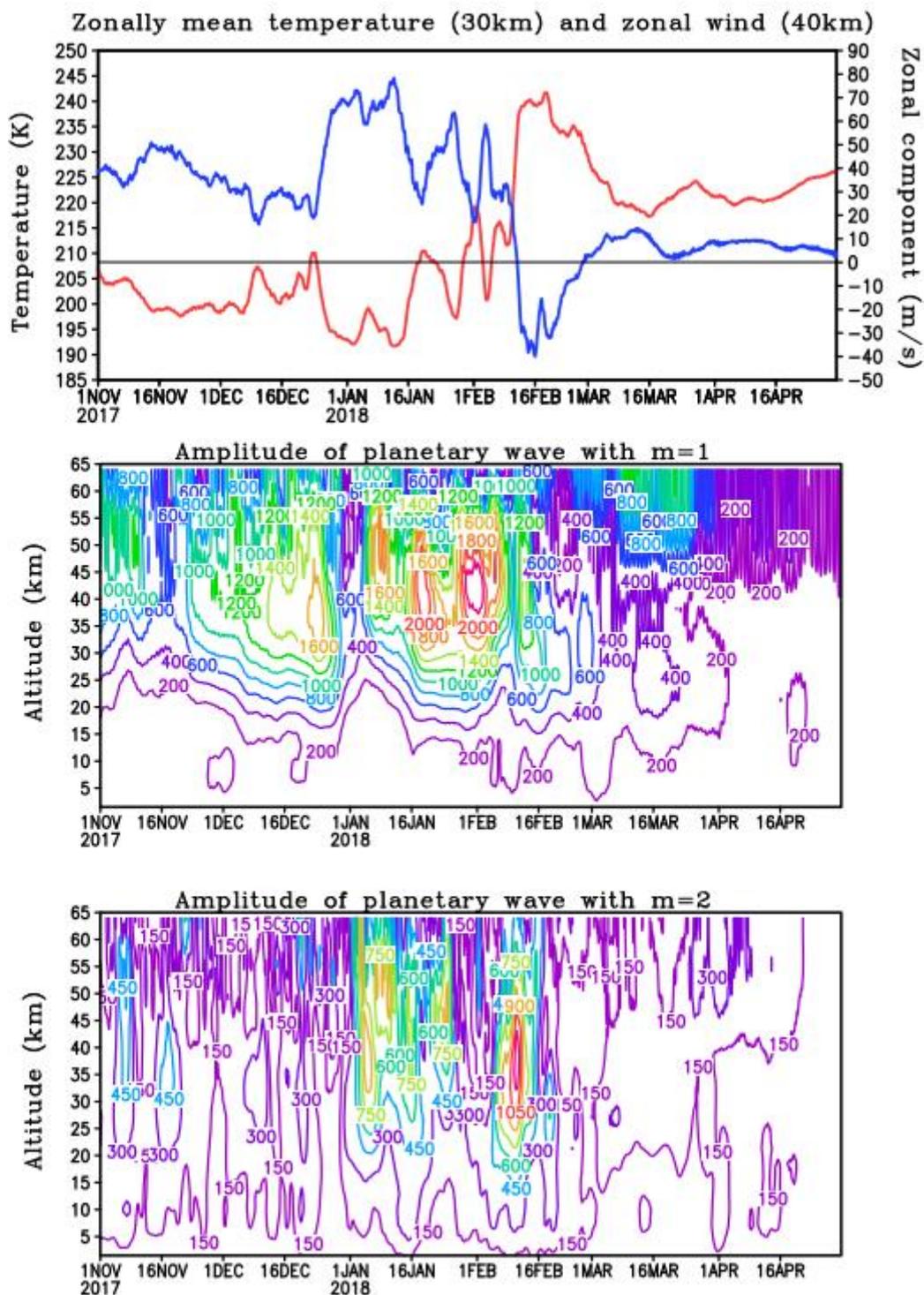


Рисунок 3.11 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2017-2018)

Следующая аналогичная ситуация с волновой активностью происходит в зимний период 2020-2021 гг. (рис. 3.12)

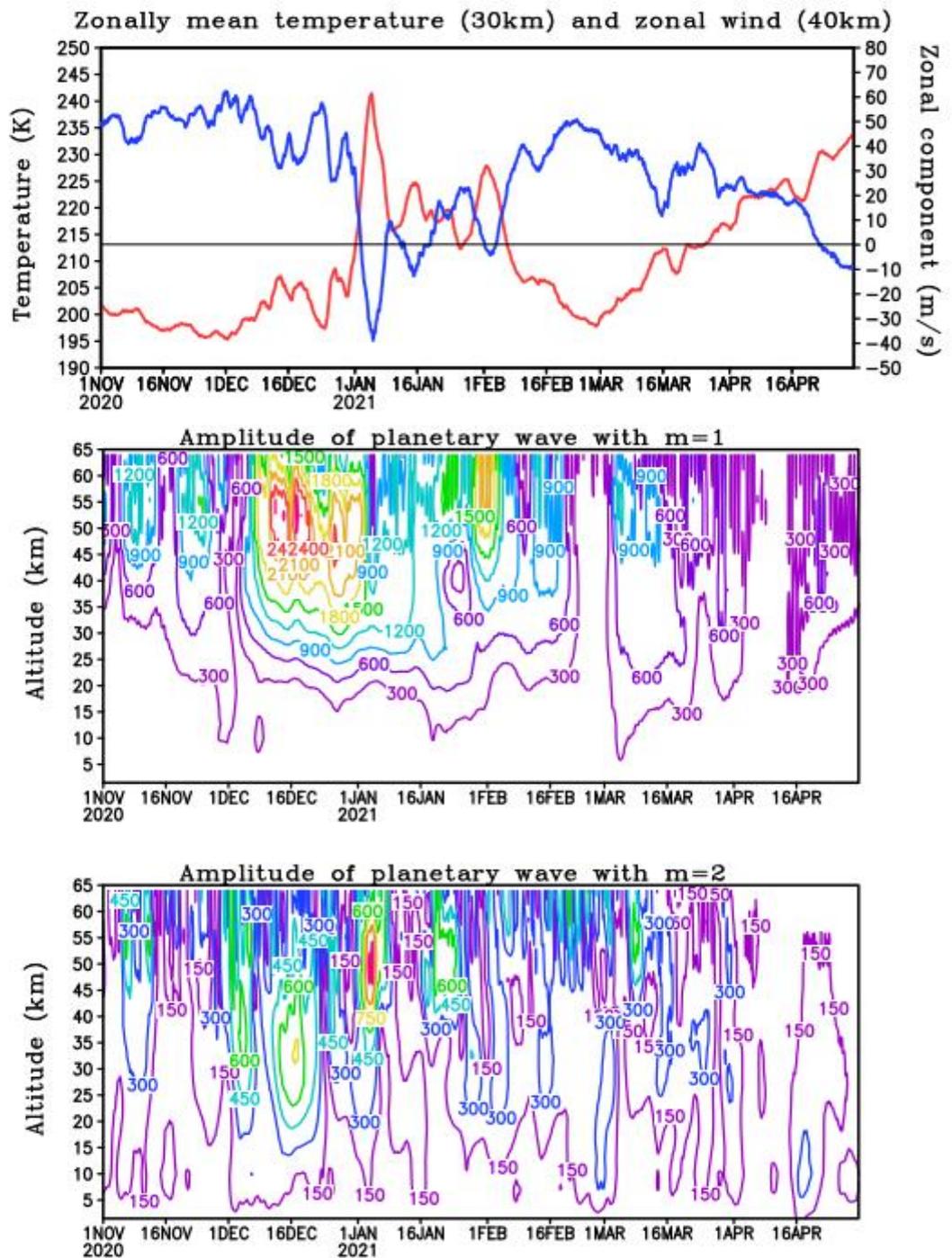


Рисунок 3.12 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2020-2021)

Таблица 3.10. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2020-2021 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2020	12	15	-47,0		
24959	2020	12	16	-47,6		
24959	2020	12	17	-43,8		
24959	2020	12	18	-36,5		
24959	2020	12	19	-39,9		
24959	2020	12	20	-44,9		
24959	2020	12	21	-42,7		
24959	2020	12	22	-41,2		
24959	2020	12	23	-44,6		
24959	2020	12	24	-46,1		
24959	2020	12	25	-44,7		
24959	2020	12	26	-43,9		
24959	2020	12	27	-44,1		
24959	2020	12	28	-42,2		
24959	2020	12	29	-42,1		
24959	2020	12	30	-43,4		
24959	2020	12	31	-40,5		
24959	2021	1	1	-37,8		
24959	2021	1	2	-33,3		
24959	2021	1	3	-42,4		
24959	2021	1	4	-46,5		
24959	2021	1	5	-44,9		
24959	2021	1	6	-43,0		
24959	2021	1	7	-41,4		
24959	2021	1	8	-40,9		
24959	2021	1	9	-41,0		
24959	2021	1	10	-41,3		
24959	2021	1	11	-44,3		
24959	2021	1	12	-47,1		

Интересная ситуация происходит в зимний период 2020-2021 гг., так как тут усиление волновой активности ($m=1$) было с начала декабря и до конца месяца. Если посмотреть на таблицу 3.10, то можно увидеть продолжительность экстремальные морозы продлились до конца декабря. Также, если посмотреть на амплитуду планетарной волны ($m=2$), то тоже можно увидеть усиление волны в начале января.

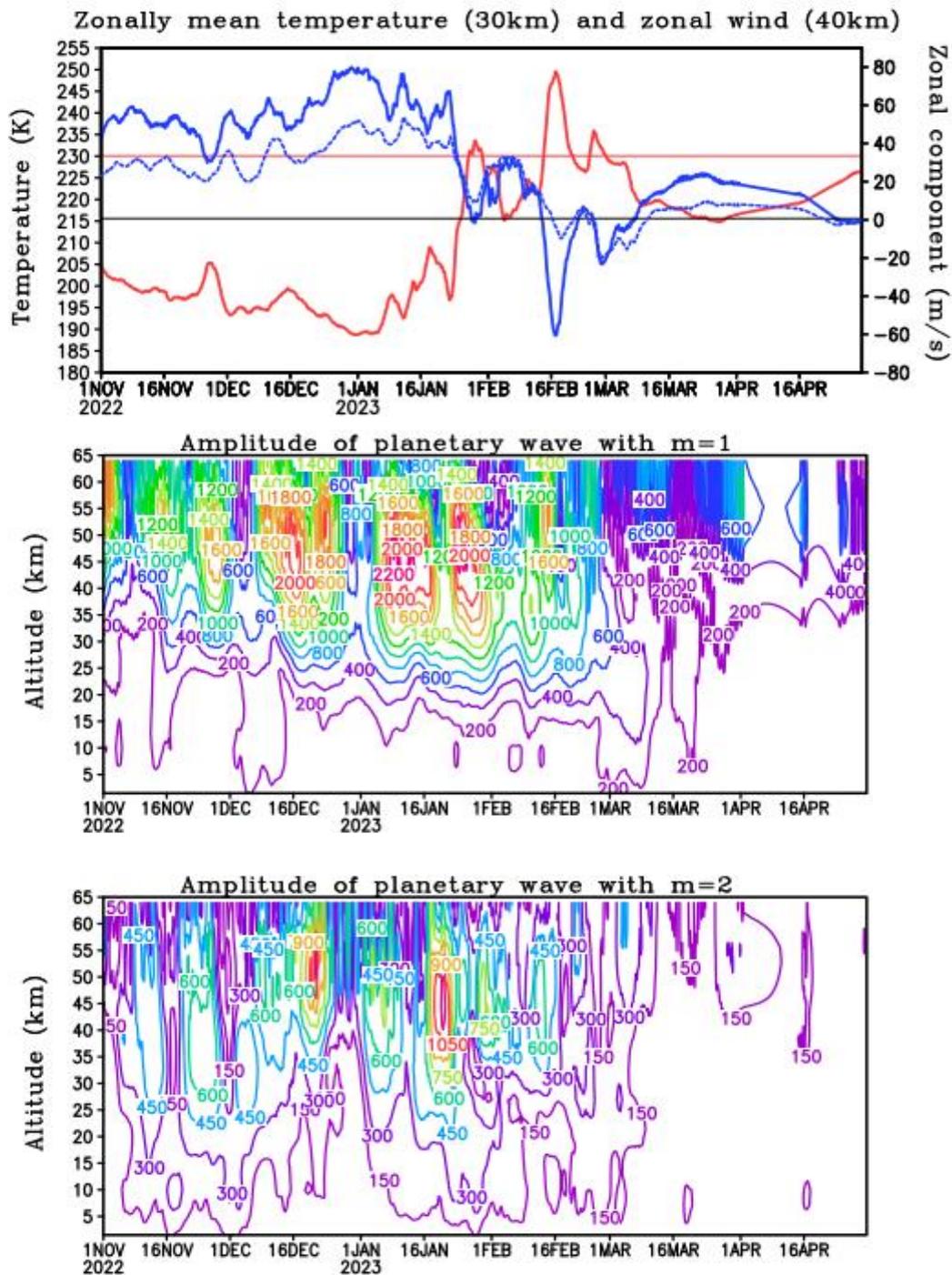


Рисунок 3.13 Распределение среднезональной температуры на высоте 30 км, зональный ветер на высоте 40 км, амплитуда планетарной волны с волновым числом 1, амплитуда планетарной волны с волновым числом 2 (зима 2022-2023)

Таблица 3.11. Экстремально низкие значения температуры воздуха г. Якутска за зимний период 2022-2023 гг.

Индекс	Год	Месяц	День	Температура	1964-1993 -41,3	1994-2023 -38,0
24959	2022	12	10	-39,5		
24959	2022	12	11	-40,7		
24959	2022	12	12	-39,3		
24959	2022	12	13	-41,2		
24959	2022	12	14	-46,0		
24959	2022	12	15	-47,0		
24959	2022	12	16	-41,8		
24959	2022	12	17	-45,2		
24959	2022	12	18	-46,4		
24959	2022	12	19	-38,7		
24959	2022	12	20	-40,9		
24959	2022	12	21	-36,7		
24959	2022	12	22	-36,4		
24959	2022	12	23	-29,8		
24959	2022	12	24	-25,7		
24959	2022	12	25	-25,9		
24959	2022	12	26	-34,2		
24959	2022	12	27	-36,0		
24959	2022	12	28	-36,5		
24959	2022	12	29	-33,6		
24959	2022	12	30	-31,2		
24959	2022	12	31	-34,8		
24959	2023	1	1	-41,3		
24959	2023	1	2	-41,3		
24959	2023	1	3	-43,0		
24959	2023	1	4	-39,2		
24959	2023	1	5	-39,1		
24959	2023	1	6	-40,9		
24959	2023	1	7	-43,0		

Также интересная ситуация происходит ещё в зимний период 2022-2023 гг., так как видно по рисунку 3.13 достаточно мощное усиление волновой активности ($m=1$, $m=2$) в период с начала декабря и до конца месяца. И. такое же усиление волновой активности ($m=1$, $m=2$) наблюдается с начала января и до конца месяца. В таблице 3.11 видим также продолжительные морозы.

Все вышеперечисленные даты были специально отобраны для данного исследования, поскольку в этот период на всех метеорологических станциях Якутии фиксировались синхронные экстремальные морозы. Такой согласованный характер похолоданий указывает на воздействие

крупномасштабных атмосферных процессов, вероятно, связанных с аномалиями стратосферной циркуляции.

В таблице 3.12. приведены случаи, когда наблюдались усиления волны, а также внезапные стратосферные потепления.

Таблица 3.12. Экстремально низкие значения температуры воздуха во время ВСП и усилении планетарной волны

Ситуация	Пункты						
	Витим	Олёкминск	Чульман	Якутск	Верхоянск	Оймякон	Чокурдах
Местные особенности	Февраль 1994						
	Январь 2021						
	Январь 2005			Январь 2005	Январь 2005	Январь 2005	Январь 2005
	Февраль 2009		Февраль 2009				
Усиление волны				Декабрь 1983			
	Январь 2000						
	Декабрь 2001	Декабрь 2001	Декабрь 2001	Декабрь 2001		Декабрь 2001	
			Декабрь 2002				
	Декабрь 2004						
			Декабрь 2006	Декабрь 2006		Декабрь 2006	
		Январь 2011	Январь 2011	Январь 2011			
		Декабрь 2014					
				Декабрь 1983	Декабрь 1983	Декабрь 1983	
	Январь 1985						
	Январь 1987	Январь 1987		Январь 1987	Январь 1987	Январь 1987	
	Январь 1989	Январь 1989	Январь 1987	Январь 1989	Январь 1989	Январь 1989	Январь 1989
		Декабрь 1993					
	Декабрь 1994						
	Январь 1996	Январь 1996	Январь 1996	Январь 1996		Январь 1996	
	Декабрь 1996	Декабрь 1996	Декабрь 1996	Декабрь 1996		Декабрь 1996	Декабрь 1996
	Декабрь 1997						

	Январь 1998						
	Январь 1998						
	Январь 1999	Январь 1999	Январь 1999		Январь 1999	Январь 1999	
							Февраль 1999
			Декабрь 2001	Декабрь 2001			Декабрь 2001
		Январь 2003		Январь 2003	Январь 2003	Январь 2003	Январь 2003
		Январь 2004		Январь 2004	Январь 2004	Январь 2004	Январь 2004
		Январь 2004					
	Январь 2006						
				Январь 2007		Январь 2007	
		Декабрь 2008					
	Февраль 2011	Февраль 2011		Февраль 2011	Февраль 2011	Февраль 2011	Февраль 2011
	Декабрь 2011						
	Январь 2014						
	Февраль 2016						
		Январь 2019					
				Декабрь 2020			
	Январь 2021						
		Февраль 2023		Февраль 2023	Февраль 2023	Февраль 2023	Февраль 2023
Последствия потепления нет				Январь 1987	Январь 1987	Январь 1987	Январь 1987
	Февраль 1989						
				Январь 1999	Январь 1999	Январь 1999	Январь 1999
	Январь 2012	Январь 2012	Январь 2012				

Что касается ситуаций, когда волновой активности не было обнаружено, но достаточно продолжительное время были сильные морозы, то были проанализированы синоптические ситуации по тем датам, которые были зафиксированы (табл. 3.12).

По данным реанализа модели ECMWF (рис. 3.14, 3.15) [8,9] и реанализа ERA 5 (рис.3.16, 3.17) можно сделать вывод, что на рассматриваемой территории наблюдался малоградиентный антициклон. Низкие приземные температуры были связаны с выхолаживанием подстилающей поверхности в соответствующих синоптических условиях.

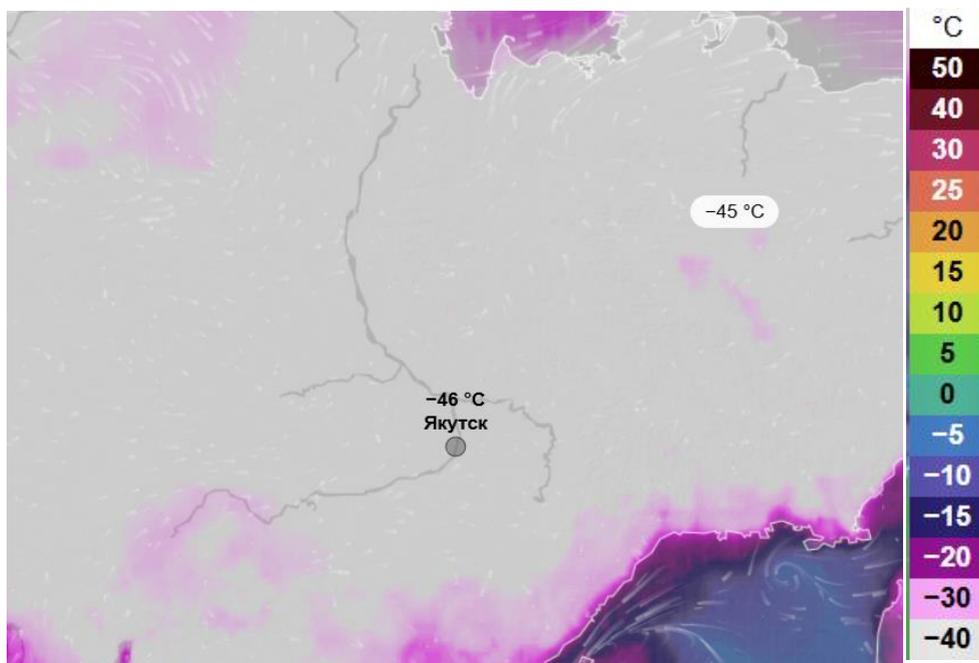


Рисунок 3.14 – Температура на уровне 2 м. по данным реанализа модели ECMWF

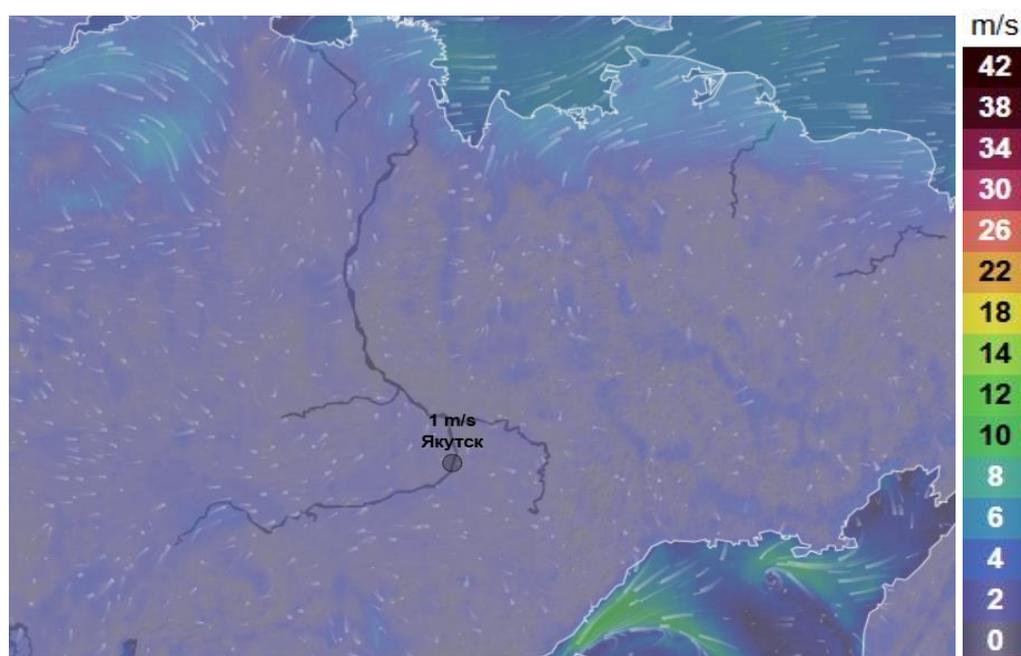


Рисунок 3.15 – Скорость ветра на уровне 10 м. по данным реанализа модели ECMWF

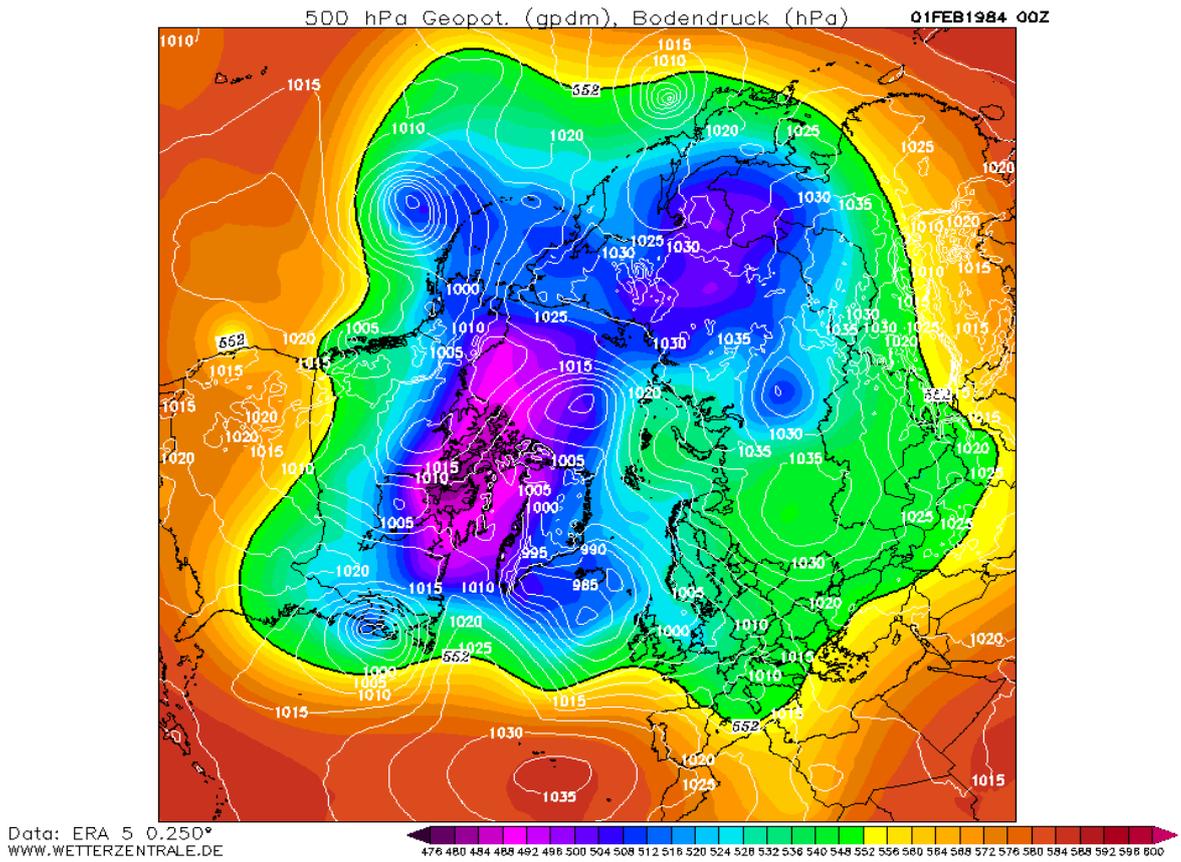


Рисунок 3.16 – Давление у Земли

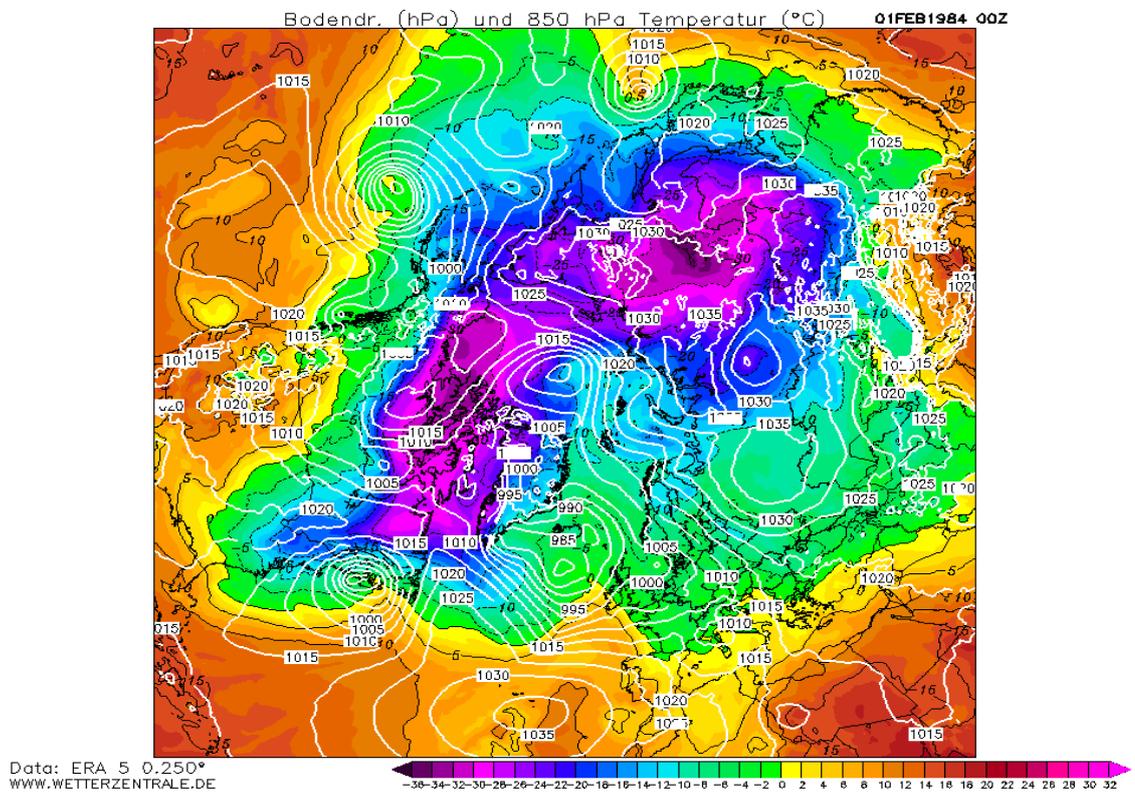


Рисунок 3.17 – Температура поверхности 850 гПа

Заключение

В рамках исследования был проведен комплексный анализ экстремально низких температур на территории Якутии за шестидесятилетний период с 1964 по 2023 год. Основное внимание уделялось выявлению устойчивых связей между динамикой стратосферных процессов и аномальными похолоданиями в регионе. Особый интерес представляли периоды, когда экстремальные морозы наблюдались одновременно на большей части Якутии, что указывало на влияние крупномасштабных атмосферных процессов.

Параллельно с анализом приземных температурных данных проводилось исследование стратосферных условий в соответствующие периоды, с акцентом на такие ключевые явления, как внезапные стратосферные потепления (ВСП), ослабление и смещение полярного вихря, а также изменения в характере стратосферной волновой активности. При этом наиболее выраженное влияние стратосферных процессов наблюдалось в середине зимы.

Для более полного понимания механизмов этого влияния специально изучались также периоды, когда значительные похолодания происходили без видимых стратосферных предпосылок. Такой сравнительный подход позволил не только подтвердить существенную роль стратосферы в формировании экстремальных погодных условий Якутии, но и оценить относительный вклад стратосферных и тропосферных процессов в температурные аномалии региона. Полученные результаты имеют важное значение для совершенствования методов долгосрочного прогнозирования погоды в условиях быстро меняющегося арктического климата.

Список использованной литературы

1. Белинский Н.А. Динамика стратосферы и её влияние на тропосферные процессы. — М.: Наука, 2010. — 245 с.
2. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Климатические изменения в Арктике и их последствия. — СПб.: Гидрометеоздат, 2018. — 180 с.
3. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Атмосферный озон и климат. — М.: Физматлит, 2015. — 320 с.
4. Курганский М.В. Планетарные волны и их роль в атмосферной циркуляции. — Новосибирск: СО РАН, 2012. — 210 с.
5. Семёнов А.А. Экстремальные климатические условия Якутии. — Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. — 156 с.
6. Кислов А.В., Торопов П.А. Роль полярного вихря в формировании климата Арктики // Лёд и Снег. — 2019. — № 2. — С. 34–48.
7. Фролов И.Е., Гудкович З.М. Современные изменения климата в высоких широтах // Доклады Академии наук. — 2021. — Т. 500, № 4. — С. 412–417.
8. Данные реанализа ECMWF и ERA5 за 1964–2023 гг. — Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2023.
9. База данных NOAA по стратосферным процессам. — URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov> [электронный ресурс]
10. Архив метеоданных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». — URL: <http://meteo.ru> [электронный ресурс]
11. Смирнов А.П. Влияние стратосферных аномалий на погоду в Северном полушарии: Дис. ... канд. геогр. наук. — М., 2017. — 180 с.
12. Тихонова В.М. Климатические особенности Якутии в условиях глобального потепления: Автореф. дис. д-ра геогр. наук. — Якутск, 2021. — 48 с.