



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: «Влияние ранних стратосферных перестроек на температурный режим в
Арктике»

Исполнитель Хорошилова Юлия Андреевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Лаврова Ирина Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 3 » июни 2021 г.

Санкт-Петербург
2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1 Климатическое описание Арктики.....	5
1.1 Особенности климата Арктики.....	5
1.2 Обзор климата Арктики за последние десятилетия.....	7
Глава 2 Циркуляция в стратосфере.....	17
2.1. Зимний режим циркуляции стратосферы.....	17
2.2. Летний режим циркуляции стратосферы.....	20
2.3. Сезонные перестройки стратосферной циркуляции.....	21
2.4. Влияние стратосферных процессов на погоду.....	24
Глава 3 Исследование влияния ранних стратосферных перестроек на температурную аномалию в Арктике.....	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	38
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	39
Приложение А.....	40

ВВЕДЕНИЕ

Арктика – один из самых уникальных регионов планеты. Здесь обитает более 20 тысяч видов растений, животных, грибов и микроорганизмов, а некоторые животные и растения встречаются только в Арктике. Главная особенность видов Арктики – невероятная способность к выживанию в экстремальных условиях. Но, конечно, у большинства людей Арктика ассоциируется с холодом и льдом. По оценкам специалистов льда в Арктике становится все меньше, а арктический регион наиболее остро подвержен климатическим изменениям.

Арктика находится около северного полюса. Ее площадь примерно 27 млн км². Зона Арктики включает в себя акватории всех земных океанов кроме Индийского, а также североамериканские окраины и границы Евразии. Границу Арктики обычно проводят через северный полярный круг (66,5° с.ш.) или по южной границе зоны тундры.

Арктика – это не только самая холодная область нашей планеты (не считая Антарктиды), это район, который наиболее сильно реагирует на все климатические изменения, происходящие на планете.

Арктика является частью климатической системы. Все процессы, так или иначе, взаимосвязаны. И климатические изменения в Арктике естественным образом влияют на климат окружающих территорий.

Изменение климата, происходящее в мире больше всего заметно в Арктике. За последние десятилетия отметили, что Арктический регион теплеет в 2-3 раза сильнее, чем остальные регионы планеты. За последние 30 лет температура в Арктике выросла более чем на 3°С. Началось активное таяние ледников, что послужило следствием к изменению климата на всей планете.

Целью данной работы является исследование влияния сроков весенних стратосферных перестроек на температурный режим в Арктическом регионе.

Для достижения цели поставлены определенные задачи:

1. Сформировать массив сеточных данных по температуре воздуха у земли и массив данных геопотенциальной высоты на 10 гПа в Арктике.

2. Сформировать массив со сроками стратосферных перестроек в весенний период до 2020 г.

3. Разложить поля аномалии температуры на классы для марта, апреля и мая при ранних перестройках.

4. Проанализировать повторяемость положительных и отрицательных аномалий при ранних перестройках.

Глава 1 Климатическое описание Арктики

1.1 Особенности климата Арктики

Арктический климат считается одним из самых суровых и холодных в мире. Причина этого в том, что наклон оси Земли по отношению к Солнцу составляет около $23,44^\circ$, поэтому в зимние месяцы меньше солнечной энергии достигает полярных регионов. К тому же он непредсказуемо нестабилен. Температура воздуха может подняться до $7-10^\circ\text{C}$ в результате проявления сильного тёплого циклона.

В то время, когда в Арктике бывают полярные ночи (от 50 до 150 дней в году), в эти места не поступает ни тепло, ни свет. Температура земли постоянно понижается. В полярные дни много тепла поглощают облака, снег и лед.

Климат Арктики резко континентальный, хотя большую его часть покрывают океаны. В связи с тем, что большая часть территории покрыта льдом, вода практически не влияет на воздушный поток.

По мере того как воздушные массы из океана перемещаются с запада на восток и влага постепенно теряется, континентальность климата увеличивается с запада на восток.

Характеристики арктического климата можно сгруппировать, с одной стороны, как типичные для тундровых земель, где в теплое время года температура достигает в среднем от 0 до 10 градусов Цельсия, а с другой стороны, как наиболее подходящий климат для покрытые льдом участки (для местности, где не тает снег и средняя температура составляет около 0 градусов Цельсия).

В районах, граничащих с водами Тихого океана и Атлантического океана, как правило, теплее и выпадает больше снега. Климат внутренних районов более сухой и холодный.

Арктическая зима характеризуется усилением воздействия циклонов. Часть циклона, выходящая из Атлантики, обычно отвечает за такие показатели, как высокая температура воздуха, частые и сильные ветры, большая облачность и частые осадки.

Антициклоны, в основном, действуют на территории Сибирской части Арктики и немного слабее они действуют в районе Канадского архипелага и о. Гренландия. В этих районах преимущественно слабый ветер, небольшое количество осадков, легкая облачность и сильные морозы.

Наиболее теплый арктический период это – июль, средние значения температуры воздуха достигают от 0 до 5 градусов Цельсия в Арктическом бассейне, от 2 до 3 градусов Цельсия у морского побережья и от 6 до 10 градусов Цельсия на материке. В центральном районе Гренландии температуры воздуха достигают до 12 градусов Цельсия.

В тоже время на протяжении всего теплого периода возможны заморозки. В районе Арктического бассейна очень влажно (до 98%). Летом в Арктике можно увидеть низкую слоистую облачность, умеренный ветер, частые туманы и осадки в виде мокрого снега или дождя. Баренцево море почти полностью свободно от покрова льда благодаря теплоте Северо-Атлантического течения.

В настоящий момент средняя температура в Арктических областях растет. Арктическая зима с каждым годом становится более теплой. В Северном Ледовитом океане меняются течения [1,2].

1.2 Обзор климата Арктики за последние десятилетия

Северные регионы Земли играют значительную роль в процессах, влияющих на окружающую среду в глобальном масштабе, и служат индикаторами глобальных природных изменений, особенно изменения климата. Изменения, наблюдаемые в Арктике, такие как повышение температуры воздуха, уменьшение ледяного покрова, увеличение речного стока и деградация вечной мерзлоты, уже показывают, что Арктика претерпевает самые большие изменения по сравнению с другими регионами на Земле.

Фактически, очень мало известно о будущем климате арктического региона. Это связано с отсутствием знаний о причинах текущих изменений глобального климата и в связи с особыми условиями формирования климата в высоких широтах Земли, что затрудняет построение надежных прогнозов будущего состояния арктического климата.

Арктика - уникальный регион с точки зрения формирования температурного режима. Первая особенность заключается в том, что климат Арктики формируется в условиях гораздо меньшего поступления солнечного тепла, чем климат неполярных регионов. На Земле к северу от 70° широты солнце не появляется несколько месяцев (полярная ночь) и несколько месяцев не выходит за горизонт (полярный день). Высокая отражательная способность снега и льда, а также малая высота солнца над горизонтом не позволяет формировать температурный фон, наблюдаемый в Арктике. Жара арктического региона в значительной степени определяется количеством адвективного тепла, приносимого океанскими течениями и воздушными потоками из низких географических широт. Количество адвективного тепла в Арктике зависит от процессов глобальной океанической и атмосферной циркуляции. Вторая особенность Арктики - это территория с климатом,

наиболее чувствительным к изменениям количества так называемых парниковых газов в атмосфере (водяного пара, углекислого газа, метана и т. д.) И количества облачности. Радиационный баланс в высоких широтах преимущественно отрицательный, и температурный режим там в основном определяется способностью атмосферы предотвращать тепловое излучение адвективного тепла, поступающего в космос. В средних и низких широтах все по-другому, где температурный режим определяется в основном количеством солнечной радиации, поступающей на земную поверхность, и мало зависит от парникового эффекта. В условиях антропогенного увеличения количества парниковых газов в атмосфере эта особенность Арктики приобретает особое значение. Третья особенность заключается в том, что геомагнитный полюс находится вблизи географического полюса, что создает наиболее благоприятные условия для вторжения в атмосферу заряженных солнечных и космических частиц на высоких широтах. Интенсивность потоков этих частиц зависит от переменной солнечной активности. В последние десятилетия появилось множество публикаций, подтверждающих связь между изменениями погоды и климата и изменяющимися потоками частиц с изменениями солнечной активности, но механизм этой связи не объяснен.

Изменение климата в Арктике усиливается обратной связью, в том числе деградация морского льда в Северном Ледовитом океане, который чрезвычайно чувствителен к изменению климата, привлекает особое внимание. Вынос пресной воды из Северного Ледовитого океана влияет на распределение морского льда, термохалинную циркуляцию (циркуляцию, создаваемую из-за разницы в плотности воды в результате неравномерного распределения температуры и солености в океане) в прилегающей акватории Северной Атлантики и через них на региональный и глобальный климат. Наличие нескольких переменных источников тепла, а также обратных связей между ними делают Арктику регионом наибольших климатических

изменений и колебаний. Многие особенности связанных процессов остаются малоизученными.

В современной истории климат долгое время считался неизменным. Но в 1920-е гг. было много сообщений о признаках потепления в Арктике. Н.М. Книпович обнаружил в 1921 году, что воды Баренцева моря заметно потеплели. Поначалу даже считалось, что потепление коснулось только Арктики. Позже выяснилось, что это глобальное потепление. Признаком потепления было то, что в высоких полярных широтах северного полушария оно было более выраженным и выраженным. Так, в период с 1912 по 1926 год температура в западной Гренландии повысилась на 5°C , а на Шпицбергене даже на $8-9^{\circ}\text{C}$. Наибольшее повышение средней глобальной температуры на поверхности Земли во время пика потепления составило $0,6^{\circ}\text{C}$.

После 1940-х годов стала проявляться тенденция к похолоданию. Лед в северном полушарии снова начал атаковать. Это отразилось главным образом на увеличении ледникового покрова Северного Ледовитого океана. С начала 1940-х до конца 1960-х годов ледяной щит Арктики увеличился на 10%. Первое потепление сменилось кратковременным и легким похолоданием в середине 20 века.

С середины 70-х гг. началось второе в истории инструментальных наблюдений глобальное потепление, получившее совершенно иную интерпретацию, связанную с усилением парникового эффекта от антропогенного увеличения концентрации углекислого газа и других парниковых газов в атмосфере.

Но в некоторых публикациях сам факт появления второй волны потепления климата обсуждался долго, вплоть до начала 90-х годов, когда реальность глобального потепления получила широкое признание. В то же время основной гипотезой о причинах потепления стала антропогенная

гипотеза. За признанием антропогенной гипотезы последовали прогностические сценарии ожидаемых односторонних и необходимых катастрофических изменений климата к концу 21 века. Такие сценарии до сих пор считаются главными. Однако с начала XXI в. Глобальное потепление неожиданно сменилось так называемой паузой потепления - рост глобальной температуры остановился, как это было на пике первого глобального потепления в 30-х и 40-х годах. Возник вопрос: наблюдаем ли мы колебания или изменение климата?

Инструментальные наблюдения за температурой стали доступны в основном с конца 19 века, но в центральной Англии информация о температуре была известна с 17 века. Согласно этим данным, всегда проявлялись долговременные колебания температуры. Согласно температурным данным в центральной Англии в доиндустриальную эпоху в 17-19 вв. наблюдали три полные волны вековых колебаний климата, а во второй половине 20 века. началась фаза потепления четвертой волны, достигнув максимума к концу 20 века, но затем наступила пауза, продолжавшаяся более 15 лет. Если экстраполировать естественные колебания, то в ближайшие десятилетия следует ожидать перехода к фазе падения температуры, но если антропогенная гипотеза верна, то потепление продолжится.

По спутниковым наблюдениям со второй половины 20 века и до сих пор самая высокая температура тропосферы в северном полушарии наблюдалась в 1998 году, после чего последовала пауза. Важно сравнить региональные характеристики изменения климата до и после 1998 г. В период 1976-1998 гг. потепление наблюдалось в северном полушарии. На больших территориях, особенно на материке, наибольшее потепление составило $1,5 \div 2,0 \text{ } ^\circ \text{C} / 10 \text{ лет}$. После 1998 г. в глобальном потеплении наступила пауза, при этом повышение температуры продолжалось только в

российской части Арктики и в Гренландии. А температура в Канадской Арктике упала за последние 16 лет.

Вопрос о причинах современного изменения климата остается дискуссионным. В настоящее время чаще признаются только четыре возможных фактора современного изменения климата, которые происходят в глобальном и региональном масштабе:

1. Антропогенное воздействие парниковых газов считается главным фактором.
2. Увеличение потока падающего солнечного света (обычно игнорируется).
3. Снижение роли аэрозольного рассеивания.
4. Внутренние колебания климатической системы, состоящей из суши, океана, криосферы, атмосферы и гидросферы (игнорируются или считаются незначительным фактором).

Региональные изменения температуры воздуха всегда связаны с изменениями атмосферной циркуляции. Изменения общей циркуляции атмосферы часто считают климатическим фактором. Атмосферная циркуляция не только перераспределяет тепло по планете, но и создает новые условия в глобальной атмосфере, которые сопровождаются колебаниями глобального климата. Изменения атмосферной циркуляции могут быть долгосрочными - климатическими, поэтому атмосферную циркуляцию можно рассматривать как фактор климата. Однако возникает вопрос о причинах изменения самой атмосферной циркуляции. В атмосферной циркуляции могут присутствовать как естественные собственные колебания, так и изменения или колебания под влиянием внешних факторов.

Потепление 1930-х годов 20 века, вошедшее в историю как «потепление Арктики», был связан с расширением зональной циркуляции.

Увеличение общей продолжительности движения атлантических циклонов вдоль побережья Евразии способствовало повышению температуры воздуха на прибрежных метеостанциях в Арктике и в умеренных широтах. Наибольшая продолжительность зональной циркуляции отмечена в десятилетие 1931-1940 гг. Это годы первого глобального потепления.

Второе глобальное потепление начинается в 70-х годах и хорошо согласуется с увеличением продолжительности группы циркуляции с циклонами на полюсах. Во время этих макропроцессов в Северном и Южном полушариях циклоны выходят из низких широт в высокие широты, что сопровождается повышением температуры в средних и высоких широтах.

Первое потепление было зональным и наиболее ярко проявилось в высоких широтах. Оказалось, что второе потепление было более распространенным в разных широтах. В 1998 году оно достигло максимума. Похолодание началось после достижения максимума продолжительность группы циркуляции с циклонами в 1997 году.

Наблюдаемые современные изменения климата хорошо согласуются с перестройками общей циркуляции атмосферы. Н.В. Кононова выяснила, что изменения среднегодовой глобальной температуры воздуха в течение 20 - начала 21 века находятся в противофазе с изменением общей годовой продолжительности блокирующих процессов и в фазе с продолжительностью определенного типа циркуляции на полюсах. В настоящее время продолжительность блокирующих процессов увеличивается, а температура поверхности океана понижается, что способствует дальнейшему снижению глобальной среднегодовой температуры воздуха.

Нарушения атмосферной циркуляции могут быть результатом вынужденных или естественных колебаний климатической системы под влиянием внешних колебаний или эпизодических внешних воздействий. Атмосфера является наименее инертным элементом климатической системы

и подвержена многофакторным воздействиям как в процессе взаимодействия с другими компонентами климатической системы, так и под влиянием внешних факторов. Из-за малой тепловой инерции атмосферы длительные процессы могут формироваться в ней только под воздействием внешних источников энергии.

Ближайшим источником энергии для длительных возмущений в атмосфере является теплообмен океана и атмосферы, а также процессы циркуляции океана. Академик А.С. Мониин отметил, что климат формируется под влиянием нескольких факторов, которые можно разделить на три группы:

1. Внешние или астрономические факторы - яркость Солнца, положение и движение Земли в солнечной системе, наклон оси вращения Земли к плоскости орбиты и скорость осевого вращения, которые определяют влияние на планету со стороны другие тела Солнечной системы, ее солнечные и гравитационные эффекты, которые создают приливы и колебания характеристик орбитального движения и собственного вращения планеты;

2. Геофизические и географические факторы - ряд планетных характеристик, наиболее важными из которых для климата Земли являются свойства подстилающей поверхности, определяющие ее динамическое и тепловое взаимодействие с атмосферой;

3. Атмосферные факторы – состав и масса атмосферы.

Возможно, что список этих известных и предполагаемых факторов изменения климата не является полным.

Антропогенный фактор потепления. В последние десятилетия наибольшее внимание уделяется антропогенным изменениям состава атмосферы, которые являются возможным фактором усиления парникового эффекта атмосферы и глобального потепления во второй половине 20 века. В

публикациях Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) сделан вывод о том, что антропогенный характер современного потепления связан с повышенными концентрациями CO₂, метана и других парниковых газов в атмосфере. Судя по большому количеству публикаций, основанных на модельных оценках, сделан вывод, что быстрое увеличение выбросов парниковых газов связано с активизацией деятельности человека. По-прежнему, а особенно в последнее время, появляется все больше публикаций, излагающих альтернативные гипотезы.

Вывод Международной группы экспертов по изменению климата основан на оценках, полученных в результате физико-математического моделирования, при условии, что модели учитывают все факторы и адекватно отражают все процессы с их многосторонней прямой и обратной связями во всех компонентах климатической системы. Хотя известно, что модели далеки от совершенства. Первое сомнение в безусловной антропогенной природе современного потепления основано на исторических фактах о климате из прошлого, согласно которым подобное и более сильное потепление климата наблюдалось много раз в прошлом и каждый раз позже сменялось похолоданием. Происходило это в доиндустриальную эпоху.

По мнению академика В. Котлякова, концентрации парниковых газов и глобальные температуры постоянно менялись в прошлом, а количество атмосферных газов резко возросло за последние 100 лет, но современные изменения температуры не превышают естественных исторических колебаний в доиндустриальную эпоху. Концентрация CO₂ в атмосфере подвержена естественным колебаниям. Согласно известным законам физики, в зависимости от температуры верхнего слоя океана, CO₂ либо сильно растворяется в океане во время холода, либо выделяется из океана в атмосферу во время потепления. Согласно этим данным, изменение концентрации CO₂ в атмосфере можно рассматривать как следствие потепления, а не как его причину.

По мнению академика Р.И. Нигматулина, значения естественных потоков CO₂ из океана в атмосферу и из атмосферы в океан во много раз превышают выбросы CO₂ в результате деятельности человека. Можем ли мы быть уверены, что существующие несовершенные модели океана описывают состояние верхнего слоя океана с такой исчерпывающей точностью, что можно правильно оценить баланс естественных долгосрочных колебаний концентрации CO₂ и оценить влияние исключительно антропогенной добавки CO₂ в изменения климата? Признавая наличие антропогенной составляющей в современном изменении климата, нельзя исключать наличие естественных климатических колебаний, которые всегда сохранялись.

На основании наблюдений на полутора тысячах метеостанций в России автор исследовал вклад повышения концентрации CO₂ во второй половине 20 века в изменения температуры воздуха. Проводились статистические эксперименты, в которых проводились уравнивания влияния тепловой адвекции, парникового эффекта водяного пара и облачности в изменениях температуры воздуха на разных широтах и в разных сезонах, и оценивалась зависимость оставшихся изменений температуры от радиационного баланса у земной поверхности. После исключения этих природных факторов изменения радиационного баланса и температуры могут происходить в основном из-за изменений концентрации CO₂ в атмосфере. Было установлено, что вклад CO₂ в общую изменчивость температуры воздуха составляет около 25%. Данные наблюдений подтвердили влияние повышенных концентраций парниковых газов на климат, но также показали, что оценки физико-математических моделей о доминирующей роли усиления парникового эффекта в глобальном потеплении во второй половине 20 века были сильно переоценены.

Солнечная активность. Климат Земли - это прежде всего результат влияния солнечной энергии на существующие астродинамические параметры Земли. Поэтому первые два условия устойчивости климата - это сохранение

светимости Солнца и параметров орбиты Земли. На самом деле ни один из них не остается строго постоянным, наблюдаются небольшие отклонения. В начале 80-х гг. обнаружена изменчивость солнечной постоянной с амплитудой 0,1-0,2%, связанная с 11-летним солнечным циклом. Уменьшение солнечной постоянной связано с появлением на Солнце очень больших групп пятен, а небольшое увеличение - с солнечными факелами. При высокой солнечной активности на Солнце количество солнечных пятен увеличивается (пятна - это темные образования), от которых в некоторой степени зависит солнечная постоянная. Появление пятен и факелов на диске Солнца объясняет лишь 50-70% всех наблюдаемых вариаций солнечной постоянной. Изменения диаметра Солнца также могут быть возможными причинами циклической изменчивости солнечной постоянной. По мнению Х.И. Абдусаматова, изменения солнечной постоянной составляют 0,07%. Вопрос о влиянии таких небольших изменений солнечной постоянной остается спорным, и сводится к вопросу о чувствительности климатической системы к этим изменениям.

Изменение яркости Солнца не исчерпывает явления, называемого изменением солнечной активности. Солнце также является источником потоков заряженных солнечных частиц и модулятором потоков космических лучей, которые влияют на магнитосферу Земли и верхние слои атмосферы, особенно в высоких широтах, и могут создавать нарушения в атмосферной циркуляции с соответствующими последствиями для погоды и климата [3].

Глава 2 Циркуляция в стратосфере

2.1. Зимний режим циркуляции стратосферы

В зимней стратосфере в приполярных широтах образуется крупный центр холода из-за отсутствия поглощения озона – основного источника тепла для стратосферы ультрафиолетовым излучением в течение полярной ночи. Напротив, в тропических и экваториальных регионах есть глобальный центр относительного тепла. В соответствии с глобальным распределением температуры также формируется поле давления: низкое давление в полярных регионах, высокое - в тропических. Это так называемый циркумполярный циклон (рис. 2.1).

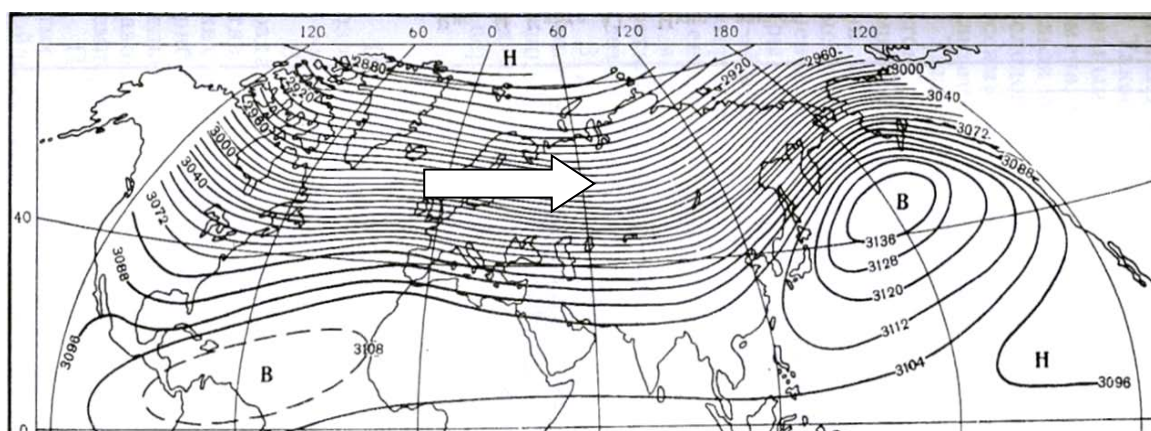


Рисунок 2.1. Давление и циркуляция воздуха в зимней стратосфере (поверхность 10 гПа, 31 км). Линии – изогипсы, стрелка – вектор ветра

Циркуляция воздушных масс в зимней стратосфере формируется по геострофическому закону (рис. 2.2). Поскольку барический шаг в холодном воздухе меньше, чем в теплом, то изобарические поверхности наклонены от

экватора к полюсу. Это приводит к градиентам температуры и давления, направленным горизонтально от экватора к полюсу (рис. 2.2).

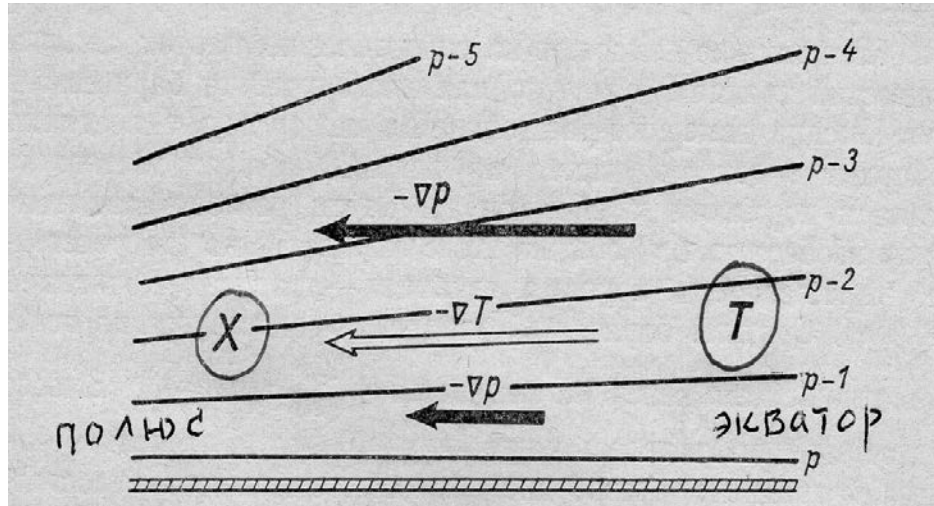


Рисунок 2.2. Направления градиентов температуры и давления в зимней стратосфере (р-давление, т-температура, Т-тепло, Х-холод, Н и В – низкое и высокое давление)

Под влиянием силы барического градиента F_p воздух начинает двигаться к полюсу, но возникающая при этом сила Кориолиса F_a отклоняет его движение вправо, до тех пор, пока не будет достигнут баланс сил ($F_p = F_a$). В этом случае возникает перенос воздушных масс (ветер), строго параллельный изобарам (низкое давление слева, высокое давление справа). Процесс установления геострофического ветра приведен на рис. 2.3.

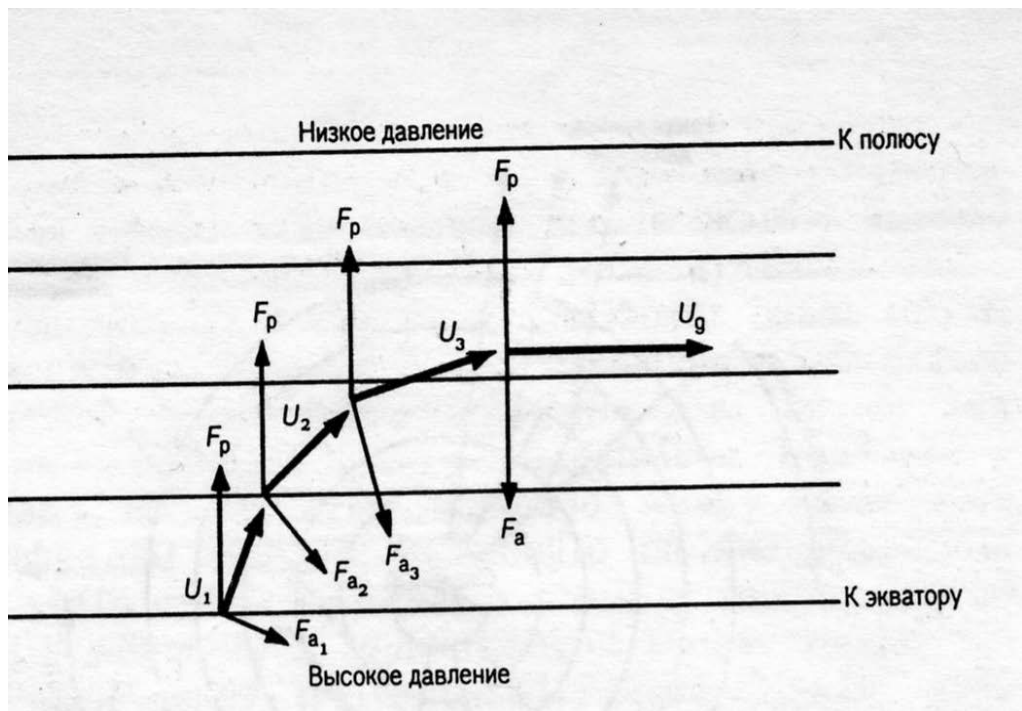


Рисунок 2.3. Формирование западно-восточного переноса в зимней стратосфере (U -вектор ветра, F_p - сила градиента давления, F_a -сила Кориолиса)

В результате в зимней стратосфере устанавливается глобальный геострофический западно-восточный перенос (рис. 2.1), который в целом типичен для зимней циркуляции, как в стратосфере, так и в тропосфере.

Однако режим циркуляции в зимней стратосфере не всегда остается зональным, как на рис. 2.1. Зимой бывает от одного до нескольких периодов, когда циркуляция претерпевает внезапные меридиальные преобразования. В эти периоды циркумполярный циклон делится на два центра, которые выталкиваются на юг антициклонами, подходящими к полюсу.

Адвекция тепла вдоль западной периферии антициклонов увеличивает температуру в полярных регионах на несколько десятков градусов. В данном примере температура на полюсе достигает -5°C , а при зональной циркуляции она в среднем климатическом равна -74°C . Именно поэтому это явление было названо внезапным стратосферным потеплением (ВСП). А

внезапным потому, что предвестников перестройки полей давления и температуры первоначально не было обнаружено, да и совершается она практически мгновенно, за 1-2 дня.

Явление ВСП может происходить в любой зимний месяц и длится от недели до месяца. Так в 1958-2013 гг. явление ВСП было зарегистрировано 55 раз без какой-либо конкретной привязки к их датам, за исключением немного увеличенной частоты в 1-й и 3-й декадах января и в 3-й декаде февраля. По окончании ВСП нормальная зимняя циркуляция восстанавливается.

Причины ВСП не совсем ясны. Некоторые ученые связывают их возникновение с влиянием вертикального распространения длинных волн из тропосферы (нижнее влияние), другие ученые считают, что это результат динамических процессов в самой мезосфере (верхнее влияние). Как бы то ни было – это выдающийся процесс стратосферной циркуляции, и далее будет показано, что он отражается на тропосферных процессах и на погоде.

2.2. Летний режим циркуляции стратосферы

Летом температурный и барический глобальные градиенты меняют знак на обратный: относительная жара и высокое давление на полюсе, относительный холод и низкое давление на экваторе. Соответственно, над всем летним полушарием устанавливается восточно-западный перенос (рис. 2.4).

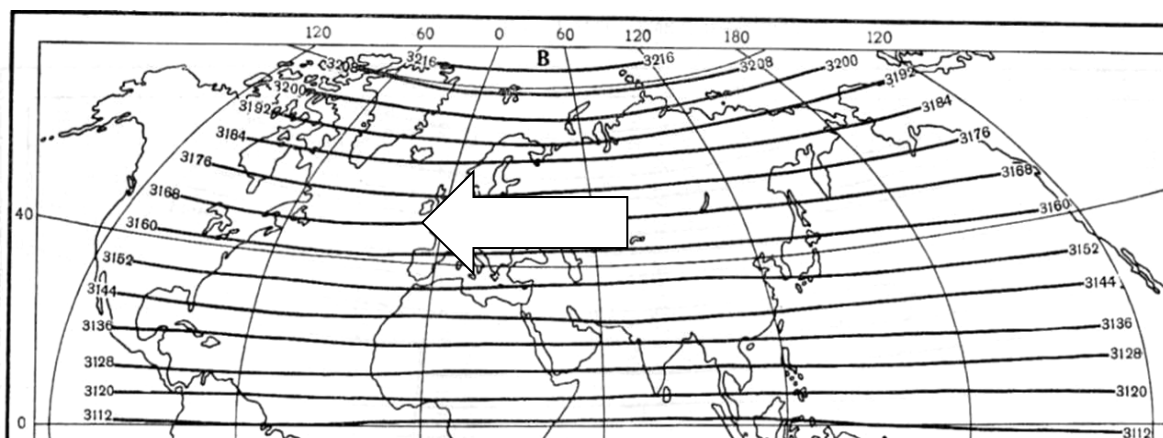


Рисунок 2.4. Давление и циркуляция воздуха в летней стратосфере (поверхность 10 гПа, 31 км). Линии – изогипсы, стрелка – вектор ветра

Обращает на себя внимание идеальная параллельность изогипс AT_{10} кругам широты, что свидетельствует о состоянии лучистого равновесия при котором развивается циркуляция в летней стратосфере. Такой характер изогипс может быть лишь только при полном отсутствии проникновения длинных волн из тропосферы в стратосферу. Впоследствии на границе между западными ветрами тропосферы и летними восточными ветрами стратосферы появляется слой замедления для обширного волнового обмена. Это важное обстоятельство, влияющее на характер весенней погоды.

Таким образом, на высотах от 20 до 80 км режим циркуляции принципиально отличается от тропосферного: зимой такой же глобальный западно-восточный перенос, а летом – восточно-западный, чего в тропосфере никогда не бывает.

2.3. Сезонные перестройки стратосферной циркуляции

Перестройка с зимнего режима циркуляции в стратосфере на летний и наоборот происходит весной и осенью под влиянием изменений радиационной обстановки. Осенняя перестройка к зимнему режиму проводится ежегодно примерно в одно и то же время, в конце августа -

начале сентября. Однако сроки весенней перестройки испытывают сильные межгодовые изменения и могут колебаться от первой декады марта до второй декады мая (диапазон более двух месяцев).

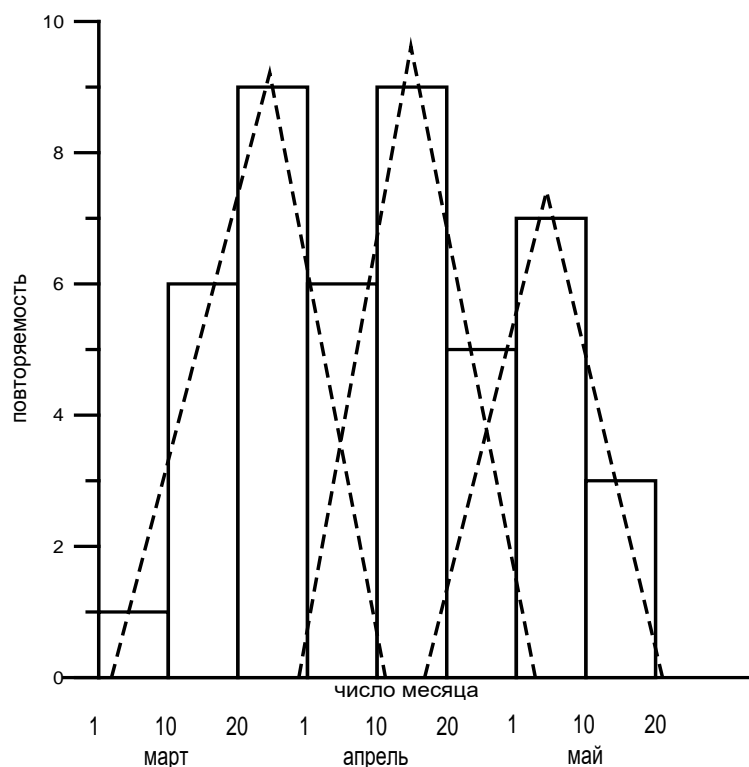


Рисунок 2.5. Повторяемость (число случаев) дат весенней перестройки стратосферной циркуляции в марте-мае по данным 1958-2000 гг. (прерывистые линии – аппроксимация повторяемости нормальной кривой распределения).

Из данных на рис. 2.5 следует, что гистограмма повторяемости дат весенней перестройки стратосферной циркуляции является трехмодальной, т.е. с тремя вершинами. Это означает, что существуют три типа перестройки по времени: ранние (с 9 марта по 5 апреля), средние (с 6 по 26 апреля) и поздние (с 27 апреля по 13 мая).

Наличие разных типов перестройки означает, что в их реализации действуют разные физические причины весеннего прогрева полярной стратосферы.

Если полярная стратосфера нагревается только радиацией (поглощение УФР озоном), то срок перестройки может быть поздним (начало мая).

Но в большинстве лет включается также и адвективный механизм прогрева полярной стратосферы, который ускоряет переход к летнему режиму циркуляции. В этих случаях весенние перестройки бывают либо ранние по сроку (начало марта), либо средние (середина апреля) в зависимости от интенсивности адвекции тепла.

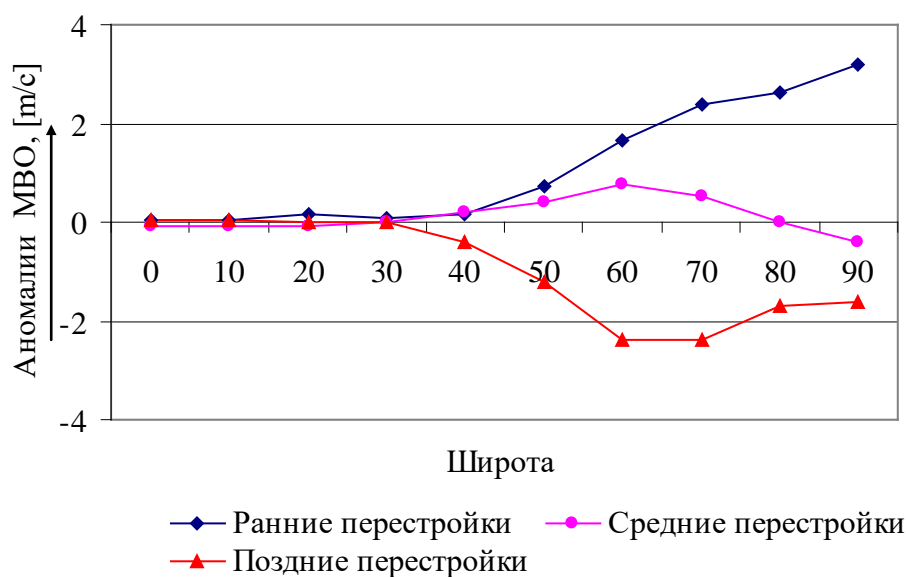


Рисунок 2.7. Аномалии межширотного воздухообмена (МВО, 10 гПа) в феврале в годы разных типов весенних перестроек циркуляции (числа по оси абсцисс – географические широты)

Интенсивность теплового воздействия на полюс можно охарактеризовать аномалиями межширотного воздухообмена (МВО) перед весенней перестройкой, в феврале, приведенными на рис. 2.7. Ясно, что во

время ранних перестроек МВО увеличивается, что приводит к аномальному раннему нагреву полярной стратосферы. При средних по сроку перестройках МВО практически равен норме, но при поздних перестройках МВО аномально низкий, поэтому здесь действует только радиационный прогрей полярной стратосферы за счет поглощения озоном УФР [4].

2.4. Влияние стратосферных процессов на погоду

Известно, что циркумполярный вихрь (ЦПВ), как крупнейший планетарный объект, сильно влияет на формирование погоды в полушарии. Не затрагивая многие аспекты его воздействия, рассмотрим только конкретный вопрос - взаимосвязь между временем весенних изменений типов циркуляции в стратосфере (приземный уровень 10 мб) и последующими погодными условиями в северном полушарии.

Впервые на указанную особенность обратили внимание японские метеорологи. Вада предсказал летнюю погоду на севере Японии на основе поведения полярного вихря (на основе карты среднемесячных значений H500), который влияет на распределение температуры воздуха в средних широтах. Установлена связь между его перемещением и летней температурой. Холодное лето наступает, когда вихрь в апреле или мае значительно перемещается на Дальний Восток от своего нормального положения. Расположение очага холода в Арктике и тип перехода от зимы к весне в стратосфере определяют циркуляцию в северном полушарии и аномалии температуры воздуха летом на севере Японии. В течение холодного лета центр холода в тропосфере и нижней стратосфере остается близко к полюсу в марте, а переход к теплу происходит медленно и завершается не раньше мая. Теплое лето наступает тогда, когда переход от

зимних холода в Арктике к весеннему теплу происходит быстро и заканчивается в апреле. Особое значение придается времени стратосферного («взрывного») потепления весной, которое сопровождается разрушением полярного циклона (с этого процесса начинается сезон). При поздней весне лето холодное, при ранней - теплое.

Лабитцке, анализируя весенние изменения циркуляции в стратосфере, обнаружила, что при раннем переходе на антициклонический режим лето в Западной Европе будет характеризоваться положительной аномалией температуры воздуха ($\Delta t > 0$), а при позднем - отрицательной ($\Delta t < 0$).

Важную роль стратосферным процессам и их применению в сезонных прогнозах отводит С.Т. Пагава. Поскольку в этом слое макропроцессы более выражены, чем в тропосфере, по ним четко прослеживается смена естественных синоптических сезонов. Между тем подобное изучение важно проводить не только для определения границ естественных синоптических сезонов, но и для целей сезонных прогнозов погоды. В частности, особенности перехода в нижней стратосфере над Арктикой от зимнего холода к весеннему теплу имеют прогностическое значение. Высказывается предположение о наступлении двух типов весен на Европейской территории России и в Западной Сибири. При затяжном и позднем переходе весна будет теплой. При ускоренном и раннем преобразовании наступит холодная весна. Об этих Выводах можно судить еще в конце зимы.

Английский метеоролог Эбдон связывает время наступления весеннего потепления в стратосфере с особенностью лета на юге Англии. Степень развития зимней циркуляции в высоких широтах определяется по полям среднемесячных температур на уровне 100 мб с января по апрель, указывает на раннее или позднее разрушение ЦПВ и «окончательное» потепление в нижней стратосфере. При раннем потеплении лето теплое, при позднем - холодное. Впоследствии Эбдон обнаружил связь между временем весеннего обращения стратосферного ветра на поверхности 50 мб и условиями летней

погоды в Лондоне. Обычно обращение происходит в апреле-мае и имеет прогностическое значение. Перестройка ветра с западного на восточный режим определяется по трем классам - ранняя, средняя или поздняя. Погода в течение трех летних месяцев оценивается с использованием специального индекса летней погоды Поултера для района Лондона. При сравнении периода обращения весеннего ветра с индексом было обнаружено, что ранняя перестройка никогда не сопровождалась малым значением летнего индекса (ниже среднего 681). При позднем или среднем преобразовании не встречалось большого индекса. Выявилась зависимость: чем раньше в стратосфере происходит весеннее обращение ветра, тем теплее, суше и солнечнее будет предстоящее лето. Установлено, что ранняя перестройка поля ветра почти всегда обуславливает хорошее лето, а поздняя — среднее или неблагоприятное.

Х. Х. Рафаиловой изучено распределение аномалии температуры воздуха в отдельные летние месяцы в связи с началом перехода стратосферной циркуляции (уровень 10 мб) в летний режим. Оказывается, что при ранней перестройке стратосферы последующее лето над большей частью России будет теплое, при поздней холодное.

А. И. Угрюмов предполагает, что интенсивность и форма циркуляции в тропосфере (июнь) зависят от периода формирования летнего стратосферного антициклона и квазидвухлетних колебаний. Установлено, что после раннего образования антициклона июнь (месяц наибольших межгодовых контрастов) на Европейской территории России будет теплый и сухой, после позднего – холодный и влажный. Ранняя весенняя перестройка в стратосфере приводит к усилению меридионального переноса в летней тропосфере, поздняя способствует сохранению зональной циркуляции [7].

Метод прогноза температуры воздуха строится, так же, как и для $\Delta H500$, с использованием уравнений регрессии. В нем учитывалось, что изменение погоды от одного года к другому состоит из двух частей. Первая

часть обусловлена внутренними колебаниями теплообмена между подстилающей поверхностью и тропосферой, вторая – внешним влиянием стратосферы на нижнюю циркуляционную систему. Если период формирования летнего антициклона испытывает сильные межгодовые колебания, то вторая часть почти полностью отражает общее межгодовое изменение циркуляции в тропосфере. При этом в тропосфере хорошо наблюдается двухлетняя цикличность. Когда колебания стратосферной циркуляции малы, тогда общее межгодовое изменение поля давления в летней тропосфере в основном зависит от ее внутренних колебаний теплообмена.

Позже А. И. Угрюмов несколько изменил составление прогнозов. Принималось в расчет, что срок весенней перестройки циркуляции в стратосфере зависит от фазы экваториального квазидвухлетнего цикла, т. е. от направления потоков в слое 18-35 км. над экватором. Если весной в нем преобладают западные ветры, то преобразование происходит рано (во второй половине марта - начале апреля), если восточные – поздно (во второй половине апреля — начале мая). В 1970 и 1971 гг. выпускались прогнозы погоды (на март и апрель) для западной половины России. При их составлении вначале определялся срок весенней перестройки циркуляции в стратосфере (поздно, рано). Затем были выбраны годы - аналоги, в которых произошла такая же перестройка, а распределение потоков в экваториальной стратосфере было подобно экстраполированному на ожидаемую весну. Аномалия температуры воздуха на отдельные месяцы берется из аналога.

Анализ исследований показал, что уже предпринимались попытки использовать время перехода типа циркуляции ЦПВ в стратосфере для составления долгосрочных прогнозов погоды. Однако этот учет велся в основном качественно, а даты смены циркуляции с циклонической на антициклоническую определялись приблизительно и не всегда точно. В результате выводы, полученные разными авторами, оказались мало

сопоставимыми между собой. Только в последнее время появилось несколько методов объективного определения соответствующих дат. Кроме того, из-за ограниченности исходного материала никто не проводил достаточно корректного статистического исследования указанной связи. С увеличением срока наблюдений назрела необходимость более тщательного изучения ранее выявленных зависимостей по данным последних 14 лет (1958-1971). Таким образом можно будет выяснить реальность их существования и установить возможность их использования в практической работе [6].

Глава 3 Определение типов температурных аномалий

Исходные данные для работы взяты с американского сайта NOAA [9] и представляют собой данные реанализа NCEP в узлах сетки 2,5 на 2,5 градуса. Сформированы базы данных: температуры у поверхности земли с 1948 года по 2020 год и геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 10 гПа с 2000 года по 2020 год на широтах 40°с.ш. и 90°с.ш.

Ежегодные даты весенних стратосферных перестроек с 1958 по 2003 г. включительно взяты из работы Е.А. Бакулиной и А.И. Угрюмова [5]. Авторы используют индекс зональной циркуляции атмосферы А.Л. Каца, рассчитанный на изобарической поверхности 10 гПа (31 км).

За последние годы с 2003 года по 2020 год даты весенних перестроек определялись по методу Д.А. Педя с использованием временного хода значений планетарного вихря скорости на изобарической поверхности 10 гПа.

$$\Omega = \frac{10g}{L\nabla^2 H} = \frac{10g^4(H-H_0)}{Lr^2}, \quad (1)$$

где $H = n\sum H_i$

L – параметр Кориолиса; g – ускорение свободного падения; H – средняя величина абсолютного геопотенциала H_i (гп.дам) вдоль окружности радиуса r (вдоль параллели $\varphi = 40^\circ$ с.ш.); H_0 – значение геопотенциала на полюсе. r – расстояние между полюсом и широтой 40° с.ш.

Для определения типа перестроек использованы градации из работы С.В. Махнорыловой и А.И. Угрюмова. [8]: ранние – с 9 марта по 5 апреля, средние – с 6 по 26 апреля и поздние – с 27 апреля по 13 мая.

Таким образом дополненная таблица по типам весенних перестроек циркуляции в стратосфере на уровне 10 гПа с 1958 по 2020 выглядит следующим образом:

Таблица 1. Даты весенних стратосферных перестроек с 1958 по 2020 гг.

Типы перестроек		
Ранние	Средние	Поздние
1959 - 20 марта	1960 - 17 апреля	1958 - 10 мая
1961 - 15 марта	1965 - 18 апреля	1962 - 1 мая
1964 - 19 марта	1966 - 25 апреля	1963 - 10 мая
1972 - 25 марта	1969 - 16 апреля	1967 - 27 апреля
1974 - 23 марта	1970 - 11 апреля	1968 - 28 апреля
1975 - 18 марта	1971 - 24 апреля	1973 - 12 мая
1976 - 31 марта	1979 - 8 апреля	1981 - 13 мая
1977 - 29 марта	1982 - 6 апреля	1987 - 1 мая
1978 - 25 марта	1988 - 8 апреля	1990 - 12 мая
1980 - 9 марта	1989 - 18 апреля	1997 - 29 апреля
1983 - 18 марта	1991 - 10 апреля	1999 - 1 мая
1984 - 13 марта	1993 - 13 апреля	2001 - 9 мая
1985 - 28 марта	1995 - 17 апреля	2002 - 8 мая
1986 - 22 марта	1996 - 10 апреля	2004 - 29 апреля
1992 - 24 марта	2000 - 11 апреля	2006 - 11 мая
1994 - 3 апреля	2003 - 17 апреля	2008 - 2 мая
1998 - 28 марта	2007 - 20 апреля	2009 - 8 мая
2005 - 2 апреля	2011 - 8 апреля	2010 - 30 апреля
2015 - 2 апреля	2012 - 17 апреля	2013 - 2 мая
2016 - 6 марта	2014 - 12 апреля	2018 - 27 апреля
	2017 - 7 апреля	2020 - 1 мая
	2019 - 20 апреля	

Все данные обрабатывались с использованием СУБД Microsoft Office Access и Microsoft Office Excel.

Для анализа распределения сроков перестройки по годам построены графики, представленные на рисунках 3.1 и 3.2.

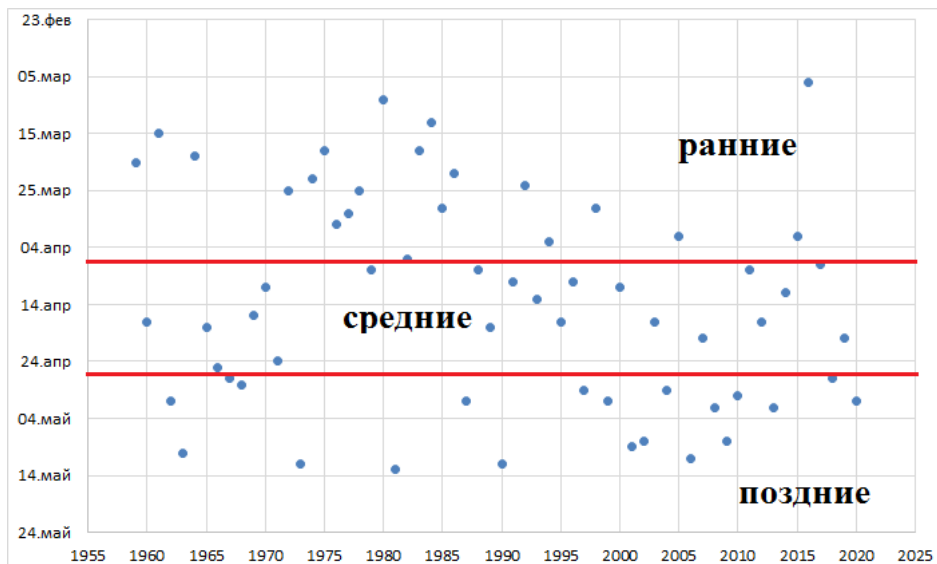


Рисунок 3.1. Распределение сроков наступления стратосферных перестроек в весенний период с 1958 по 2020 гг.

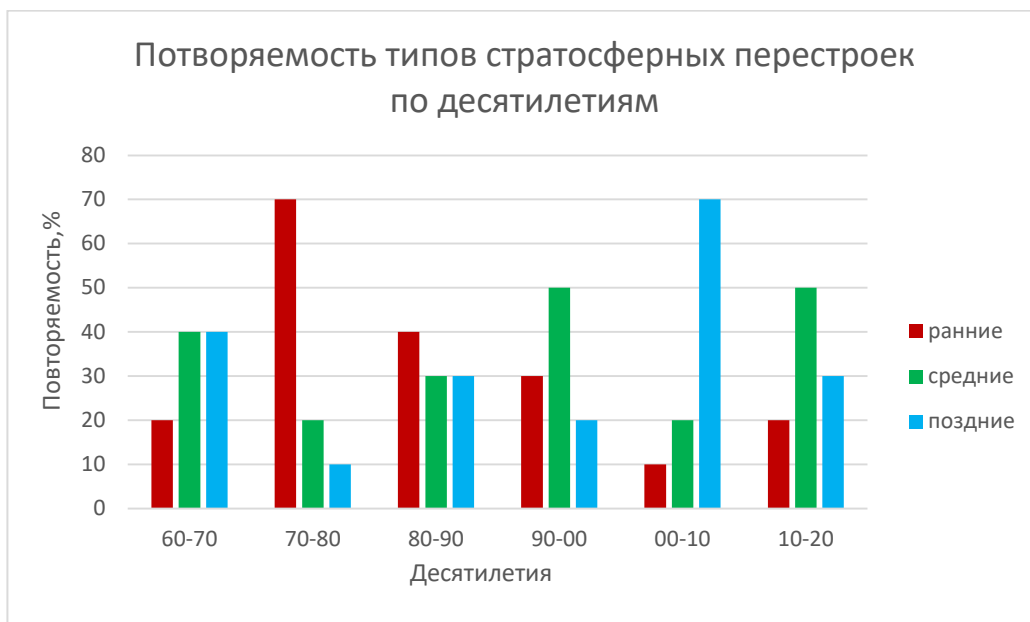


Рисунок 3.2. Повторяемость типов стратосферных перестроек по десятилетиям

С 1970 по 1980 гг. отмечался максимум ранних перестроек. С 1980 по 1990 гг. количество ранних перестроек заметно уменьшилось, но все равно их число преобладало над другими типами. С 1990 г. большую часть перестроек уже составляли средние. Максимальное число поздних типов

отмечено с 2000 по 2010 гг. На рисунках видно, что в последние года значительно уменьшилось количество ранних перестроек и увеличилось число средних и поздних.

Для лет с ранними перестройками для каждого месяца с марта по май включительно построены поля аномалии температуры воздуха в Арктике следующим образом. По временному ряду значений указанной величины в период 1958-2010 гг. в каждой точке посчитаны ежегодные аномалии приземной температуры для марта, апреля и мая по следующей формуле:

$$\Delta T_a = T_{i,j,k} - T_{срi,j}, \quad (2)$$

где ΔT_a – аномалия температуры в узле сетки; $T_{i,j,k}$ – средняя месячная температура в узле сетки; $T_{срi,j}$ – средняя месячная температура в узле сетки, осредненная за период 1958-2020 гг.

С помощью коэффициентов корреляции Фехнера оценена связь между аномалиями температуры воздуха для всех рассматриваемых лет:

$$\rho = \frac{n_{совп} - n_{несовп}}{N}, \quad (3)$$

где $n_{совп}$ – количество точек сетки, в которых аномалии 2х сравниваемых полей совпали по знаку, $n_{несовп}$ – количество точек сетки, в которых аномалии 2х сравниваемых полей не совпали по знаку, N – общее количество точек сетки [8].

Таким образом, получены корреляционные матрицы полей аномалии температуры воздуха для марта, апреля и мая в годы ранних стратосферных перестроек (Приложение А).

Будем считать, что поля похожи если коэффициент корреляции $\rho \geq 0.2$. Таким образом, все года можно разделить на классы. Для дальнейшего исследования выбраны по два классам за каждый рассматриваемый месяц: теплый и холодный. Брать большее количества классов не целесообразно,

при увеличении числа классов появляются новые типы холодных полей с разной интенсивностью.

Март

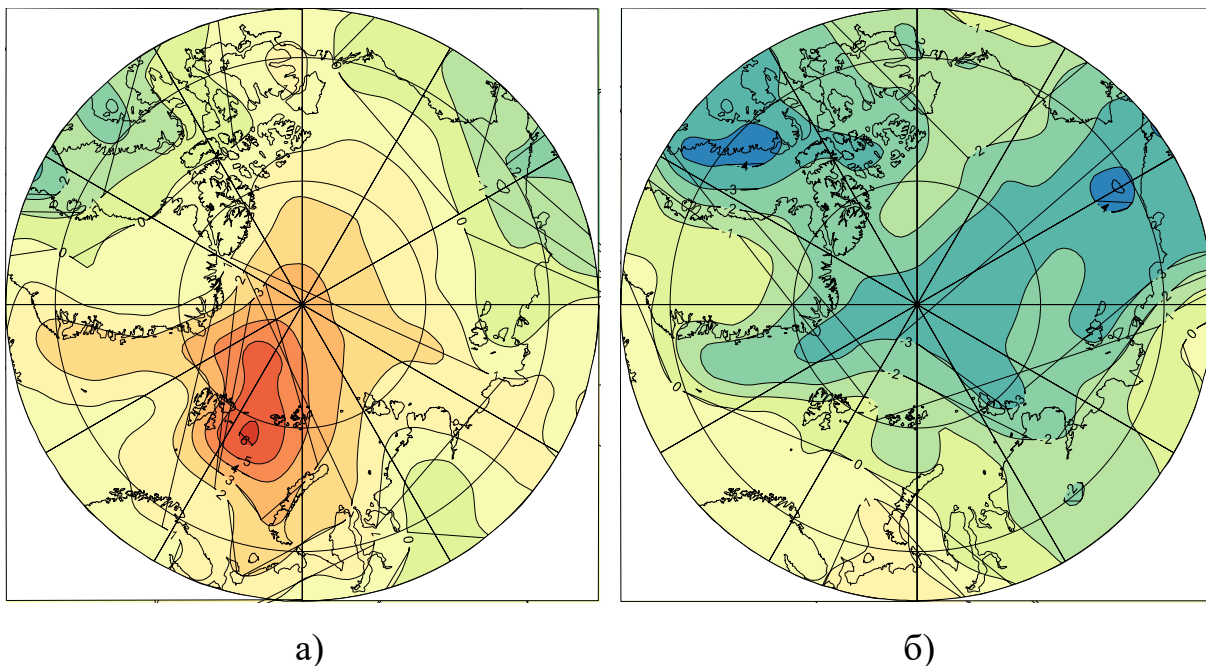


Рисунок 3.3. Типы температурных аномалий в марте.

Тип 1. Теплый. Вся центральная часть Арктики находится в области положительных аномалий температур. Максимум наблюдается между архипелагом Шпицберген и Земля Франца-Иосифа и составляет 6°C . Небольшой минимум температурных аномалий наблюдается около Канадского архипелага, Восточно-Сибирского и Чукотского морей до -2°C .

Тип 2. Холодный. На большей части Арктики отмечены температуры ниже нормы. С минимумом в центральной части, около Канадского архипелага, Восточно-Сибирского и Чукотского морей до -4°C . Максимум температурных аномалий наблюдается в Норвежском и Баренцевом морях и составляет 1°C .

Апрель

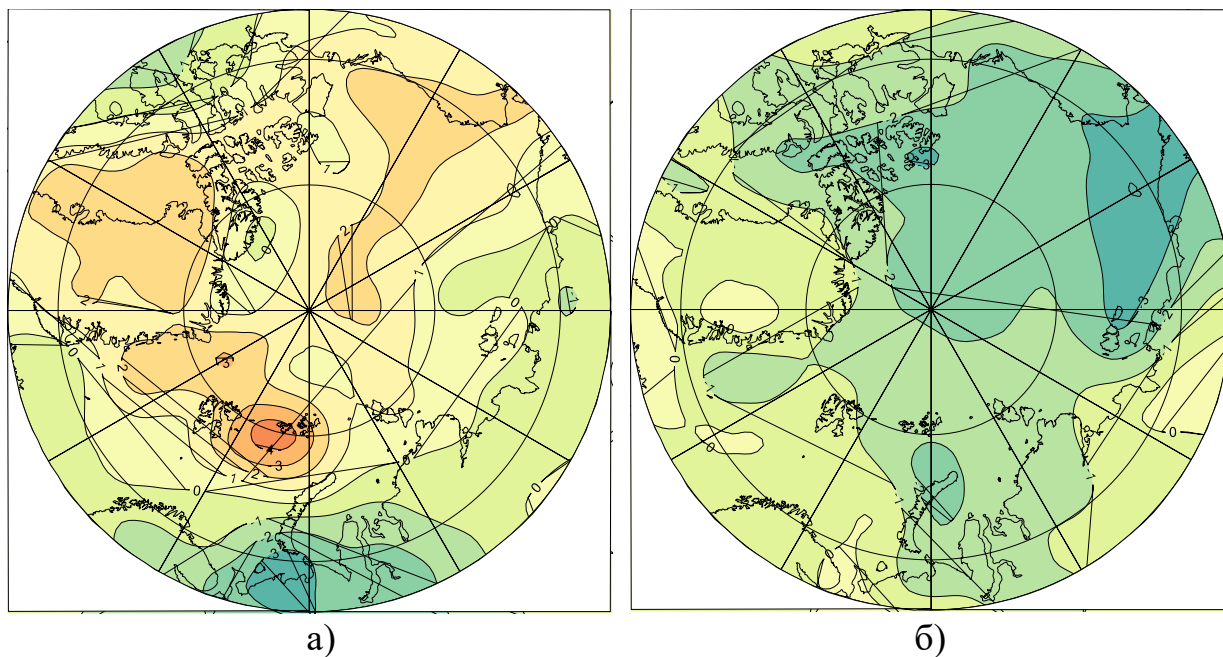


Рисунок 3.4. Типы температурных аномалий в апреле.

Тип 1. Теплый. На всей территории Арктики преобладают положительные аномалии температуры с максимумом в северной части Баренцева моря 4°C. Отрицательные вытянуты вдоль всего арктического побережья Евразии.

Тип 2. Холодный. На всей рассматриваемой территории наблюдаются отрицательные аномалии температуры. На Восточно-Сибирском морем находится минимум с аномалией температуры до -3°C.

Май

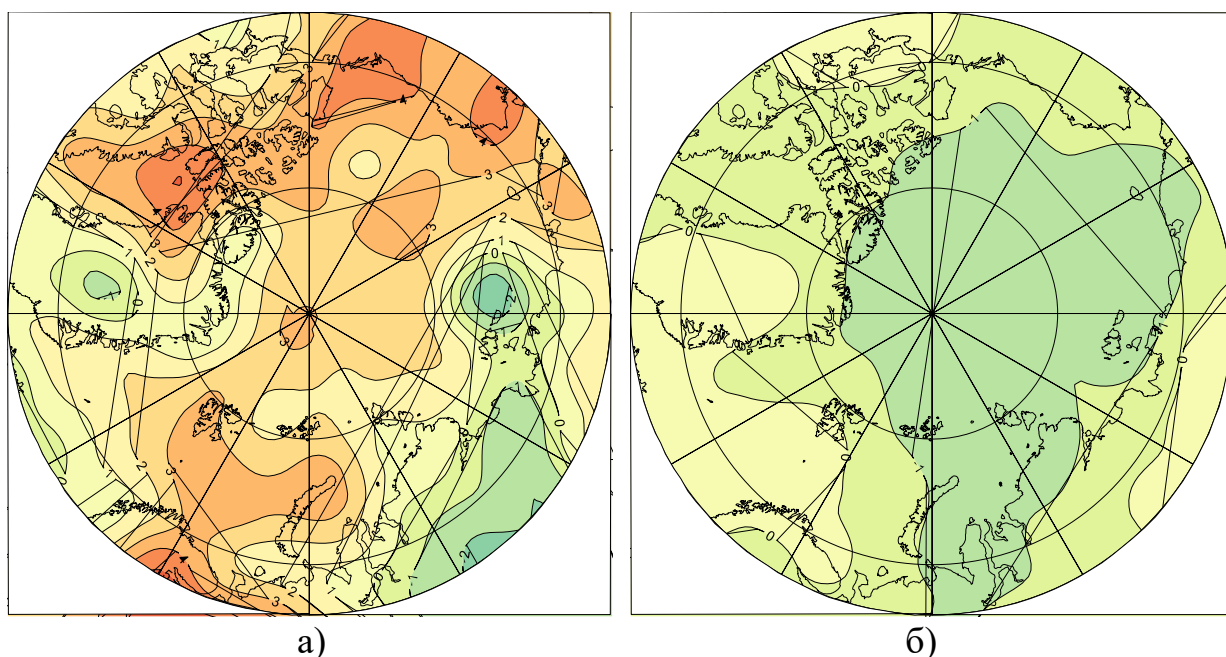


Рисунок 3.5. Типы температурных аномалий в мае.

Тип 1. Теплый. Аномалии температуры на всей территории Арктики выше 0°C , за исключением Восточно-Сибирского моря и центральной части Гренландии. Максимум температурных аномалий наблюдается около Кольского полуострова, Канадского архипелага и полуострова Аляска и составляет 4°C .

Тип 2. Холодный. Поле аномалии температуры на всей рассматриваемой территории незначительно ниже нормы (-1°C). Положительные аномалии охватывают территории большей части Гренландии, Норвежского моря и западной части Баренцева.

Далее оценена повторяемость классов для ранних перестроек по месяцам. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Повторяемость типов полей аномалии температуры для ранних стратосферных перестроек с марта по май, %

	Март	Апрель	Май
1 тип. Теплый	45	30	10
2 тип. Холодный	55	70	90

Таким образом для лет с ранними перестройками в стратосфере для всей Арктики в целом преобладают отрицательные аномалии температуры: в мае в 90% случаев, в апреле - 70%, в марте число холодных месяцев незначительно превышает число теплых – 55%. Возможно почти одинаковая вероятность теплых и холодных месяцев в марте связана с тем что в этот период и происходит сама перестройка (с середины марта по начала апреля). После ее наступления весной (апрель, май) отмечаются температуры ниже нормы преимущественно в центральной части Арктики. Вероятно, преобладание холодных месяцев над теплыми можно объяснить особенностями циркуляции атмосферы в этом регионе. В центральной Арктике тепло в атмосферу поступает главным образом из верхних слоев. При ранних перестройках в стратосфере забрасываемый теплый воздух из более южных широт формирует область высокого давления. Установление восточных ветров в стратосферном антициклоне при ранних перестройках создает задерживающий слой на границе с западным переносом тропосферы. Через него ничего не проникает, в том числе и тепло сверху, из стратосферы. Температурный режим у поверхности в этот период складывается при меньшем участии верхних слоев, формируя отрицательные аномалии у земли. Таким образом, полученный результат имеет прогностическое значение, уже в марте при наступлении ранней перестройки можно прогнозировать отрицательные аномалии температуры в центральных районах Арктики.

Кроме того, интересно отметить, что в последние года, в период потепления, когда температуры в Арктическом районе отмечаются выше среднестатистических значений, наблюдается значительное уменьшение количества ранних перестроек в весенний период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе написания выпускной квалифицированной работы перед мною были поставлены задачи, связанные с формированием массивов сеточных данных по температуре и геопотенциальной высоте, разложением поля аномалии температуры на классы для марта, апреля и мая и оценкой повторяемости положительных и отрицательных аномалий температуры у поверхности при ранних перестройках. Так же при написании работы нами была изучена специальная литература, включая статьи о весенних перестройках и формировании длительных аномалий температуры под влиянием особенностей стратосферной циркуляции. Все поставленные задачи выполнены в полном объеме.

В результате работы мной были сделаны следующие выводы:

1. В последние года количество ранних весенних перестроек в стратосфере значительно сократилось.
2. При ранних стратосферных перестройках в центральных районах Арктики в марте, апреле и мае преобладают аномалии температуры воздуха ниже средне климатических. Особенно хорошо это прослеживается в апреле и мае. В марте преобладание отрицательных аномалий незначительное.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. <https://будущее-арктики.рф/klimat-arktiki/>
2. <https://будущее-арктики.рф/izmenenie-klimata-arktiki-kakie-posledstviya-nas-zhdut/>
3. Шерстюков Б. Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата. //Жур. Арктика и Север, 2016, № 24, с. 39-67.
4. Угрюмов А.И., Лаврова И.В. Особенности закономерности общей циркуляции атмосферы. // 2021, с. 72.
5. Бакулина, Е.А., Угрюмов А.И. Весенние перестройки циркуляции в стратосфере в 1958-2003 годах. //Уч. зап. РГГМУ, 2008, № 5, с. 25-32.
6. Педь Д.А. Сезонные условия погоды, связанные со сроками весенней смены циркуляции в стратосфере. //Тр. Гидрометцентра СССР, 1973, вып.120, с. 57-67.
7. Угрюмов А.И. Квазидвухлетняя цикличность весенне-летней циркуляции атмосферы. //Тр. Гидрометцентра СССР, 1971, вып.77, с. 82
8. Махнокрылова, С.В., Угрюмов А.И. Формирование длительных аномалий температурного режима весенне-летнего периода на Европейской территории России под влиянием особенностей стратосферной циркуляции. //Уч. зап. РГГМУ, 20012, № 24, с. 38-53.
9. <https://www.noaa.gov>

Таблица А.1. Корреляционная матрица полей аномалий температуры воздуха для марта в годы ранних стратосферных перестроек.

2016	2015	2005	1998	1994	1992	1986	1985	1984	1983	1980	1978	1977	1976	1975	1974	1972	1964	1961	1959	
0.13	0.17	0.07	-0.37	-0.11	0.13	0.01	-0.18	-0.06	0.34	-0.26	-0.13	-0.17	0.24	0.10	0.23	0.25	-0.02	-0.01	1.00	1959
-0.59	-0.37	-0.66	0.04	0.58	-0.29	0.65	0.49	0.59	-0.15	-0.30	0.34	0.43	-0.27	0.34	0.08	-0.09	0.47	1.00	-0.01	1961
-0.64	-0.50	-0.31	-0.24	0.34	-0.54	0.72	0.66	0.62	-0.46	-0.19	0.45	0.65	-0.26	0.47	0.19	-0.19	1.00	0.47	-0.02	1964
0.27	0.37	-0.11	-0.26	0.03	0.44	-0.09	-0.18	-0.24	0.51	0.23	-0.36	-0.38	0.48	-0.26	0.07	1.00	-0.19	-0.09	0.25	1972
0.12	0.21	-0.11	-0.18	0.32	-0.14	0.21	0.27	0.10	0.13	-0.23	-0.06	-0.03	0.22	0.05	1.00	0.07	0.19	0.08	0.23	1974
-0.46	-0.43	-0.24	-0.12	0.22	-0.29	0.48	0.38	0.38	-0.29	-0.38	0.59	0.35	-0.44	1.00	0.05	-0.26	0.47	0.34	0.10	1975
0.55	0.55	0.08	-0.15	-0.07	0.47	-0.25	-0.10	-0.29	0.53	0.44	-0.54	-0.48	1.00	-0.44	0.22	0.48	-0.26	-0.27	0.24	1976
-0.83	-0.65	-0.28	-0.17	0.18	-0.67	0.54	0.44	0.53	-0.65	-0.22	0.49	1.00	-0.48	0.35	-0.03	-0.38	0.65	0.43	-0.17	1977
-0.60	-0.48	-0.24	-0.04	0.18	-0.52	0.48	0.35	0.46	-0.44	-0.44	1.00	0.49	-0.54	0.59	-0.06	-0.36	0.45	0.34	-0.13	1978
0.38	0.28	0.17	-0.02	-0.10	0.33	-0.24	-0.01	-0.22	0.04	1.00	-0.44	-0.22	0.44	-0.38	-0.23	0.23	-0.19	-0.30	-0.26	1980
0.48	0.50	0.00	0.00	0.03	0.59	-0.31	-0.37	-0.35	1.00	0.04	-0.44	-0.65	0.53	-0.29	0.13	0.51	-0.46	-0.15	0.34	1983
-0.67	-0.45	-0.41	-0.05	0.53	-0.41	0.71	0.56	1.00	-0.35	-0.22	0.46	0.53	-0.29	0.38	0.10	-0.24	0.62	0.59	-0.06	1984
-0.39	-0.25	-0.38	-0.09	0.48	-0.33	0.69	1.00	0.56	-0.37	-0.01	0.35	0.44	-0.10	0.38	0.27	-0.18	0.66	0.49	-0.18	1985
-0.62	-0.39	-0.53	-0.18	0.52	-0.37	1.00	0.69	0.71	-0.31	-0.24	0.48	0.54	-0.25	0.48	0.21	-0.09	0.72	0.65	0.01	1986
0.57	0.46	0.09	0.10	-0.08	1.00	-0.37	-0.33	-0.41	0.59	0.33	-0.52	-0.67	0.47	-0.29	-0.14	0.44	-0.54	-0.29	0.13	1992
-0.32	-0.10	-0.56	0.04	1.00	-0.08	0.52	0.48	0.53	0.03	-0.10	0.18	0.18	-0.07	0.22	0.32	0.03	0.34	0.58	-0.11	1994
0.08	-0.01	-0.11	1.00	0.04	0.10	-0.18	-0.09	-0.05	0.00	-0.02	-0.04	-0.17	-0.15	-0.12	-0.18	-0.26	-0.24	0.04	-0.37	1998
0.43	0.27	1.00	-0.11	-0.56	0.09	-0.53	-0.38	-0.41	0.00	0.17	-0.24	-0.28	0.08	-0.24	-0.11	-0.11	-0.31	-0.66	0.07	2005
0.75	1.00	0.27	-0.01	-0.10	0.46	-0.39	-0.25	-0.45	0.50	0.28	-0.48	-0.65	0.55	-0.43	0.21	0.37	-0.50	-0.37	0.17	2015
1.00	0.75	0.43	0.08	-0.32	0.57	-0.62	-0.39	-0.67	0.48	0.38	-0.60	-0.83	0.55	-0.46	0.12	0.27	-0.64	-0.59	0.13	2016

Таблица А.2. Корреляционная матрица полей аномалий температуры воздуха для апреля в годы ранних стратосферных перестроек.

2016	2015	2005	1998	1994	1992	1986	1985	1984	1983	1980	1978	1977	1976	1975	1974	1972	1964	1961	1959
0.15	0.27	-0.19	0.19	-0.30	0.42	-0.20	-0.06	-0.22	-0.22	-0.13	-0.22	-0.52	-0.34	-0.26	-0.01	-0.25	-0.15	-0.18	1.00
-0.46	-0.45	-0.10	-0.12	0.29	-0.06	0.36	0.48	0.23	0.26	0.27	0.38	0.49	0.26	0.19	-0.04	0.29	0.36	1.00	-0.18
-0.62	-0.63	-0.01	-0.40	0.46	0.06	0.73	0.69	0.60	0.66	0.44	0.74	0.39	0.17	0.36	0.39	0.61	1.00	0.36	-0.15
-0.59	-0.53	-0.05	-0.60	0.23	-0.04	0.69	0.61	0.51	0.62	0.45	0.59	0.52	0.37	0.36	0.39	1.00	0.61	0.29	-0.25
-0.10	-0.35	0.22	-0.36	0.17	-0.16	0.33	0.27	0.18	0.27	0.14	0.37	0.22	0.05	0.24	1.00	0.39	0.39	-0.04	-0.01
-0.35	-0.33	0.13	-0.31	0.31	-0.12	0.36	0.27	0.37	0.33	0.38	0.35	0.33	0.53	1.00	0.24	0.36	0.36	0.19	-0.26
-0.29	-0.16	-0.01	-0.38	0.20	-0.13	0.19	0.23	0.24	0.21	0.49	0.13	0.30	1.00	0.53	0.05	0.37	0.17	0.26	-0.34
-0.47	-0.69	0.08	-0.33	0.33	-0.33	0.51	0.42	0.29	0.32	0.13	0.44	1.00	0.30	0.33	0.22	0.52	0.39	0.49	-0.52
-0.54	-0.65	0.04	-0.25	0.38	0.01	0.73	0.71	0.58	0.59	0.31	1.00	0.44	0.13	0.35	0.37	0.59	0.74	0.38	-0.22
-0.40	-0.10	-0.07	-0.48	0.41	0.12	0.28	0.41	0.43	0.47	1.00	0.31	0.13	0.49	0.38	0.14	0.45	0.44	0.27	-0.13
-0.61	-0.49	-0.08	-0.48	0.38	0.10	0.70	0.62	0.57	1.00	0.47	0.59	0.32	0.21	0.33	0.27	0.62	0.66	0.26	-0.22
-0.61	-0.44	0.15	-0.28	0.38	0.07	0.56	0.48	1.00	0.57	0.43	0.58	0.29	0.24	0.37	0.18	0.51	0.60	0.23	-0.22
-0.69	-0.64	-0.19	-0.37	0.34	0.10	0.77	1.00	0.48	0.62	0.41	0.71	0.42	0.23	0.27	0.27	0.61	0.69	0.48	-0.06
-0.70	-0.75	-0.10	-0.44	0.33	0.04	1.00	0.77	0.56	0.70	0.28	0.73	0.51	0.19	0.36	0.33	0.69	0.73	0.36	-0.20
-0.11	0.16	-0.43	0.04	-0.08	1.00	0.04	0.10	0.07	0.10	0.12	0.01	-0.33	-0.13	-0.12	-0.16	-0.04	0.06	-0.06	0.42
-0.21	-0.35	0.02	-0.26	1.00	-0.08	0.33	0.34	0.38	0.38	0.41	0.38	0.33	0.20	0.31	0.17	0.23	0.46	0.29	-0.30
0.39	0.27	0.01	1.00	-0.26	0.04	-0.44	-0.37	-0.28	-0.48	-0.48	-0.25	-0.33	-0.38	-0.31	-0.36	-0.60	-0.40	-0.12	0.19
0.12	-0.04	1.00	0.01	0.02	-0.43	-0.10	-0.19	0.15	-0.08	-0.07	0.04	0.08	-0.01	0.13	0.22	-0.05	-0.01	-0.10	-0.19
0.60	1.00	-0.04	0.27	-0.35	0.16	-0.75	-0.64	-0.44	-0.49	-0.10	-0.65	-0.69	-0.16	-0.33	-0.35	-0.53	-0.63	-0.45	0.27
1.00	0.60	0.12	0.39	-0.21	-0.11	-0.70	-0.69	-0.61	-0.61	-0.40	-0.54	-0.47	-0.29	-0.35	-0.10	-0.59	-0.62	-0.46	0.15

Таблица А.3. Корреляционная матрица полей аномалий температуры воздуха для мая в годы ранних стратосферных перестроек.

2016	2015	2005	1998	1994	1992	1986	1985	1984	1983	1980	1978	1977	1976	1975	1974	1972	1964	1961	1959
-0.19	0.19	-0.16	-0.02	-0.17	0.39	-0.05	-0.02	-0.13	-0.17	-0.44	-0.01	0.22	0.14	0.12	0.30	0.33	0.24	0.38	1.00
-0.49	0.40	-0.53	0.35	0.16	0.24	0.23	0.42	0.04	-0.04	-0.18	0.25	0.12	0.45	0.32	0.48	0.56	0.50	1.00	0.38
-0.64	0.44	-0.88	0.39	0.09	0.59	0.38	0.47	0.46	0.14	-0.09	0.47	0.26	0.78	0.64	0.66	0.49	1.00	0.50	0.24
-0.56	0.13	-0.53	0.27	0.24	0.20	0.30	0.46	0.16	0.17	0.08	0.39	0.27	0.56	0.33	0.57	1.00	0.49	0.56	0.33
-0.60	0.20	-0.70	0.32	0.22	0.41	0.25	0.52	0.28	0.22	0.02	0.35	0.35	0.65	0.58	1.00	0.57	0.66	0.48	0.30
-0.57	0.38	-0.62	0.51	0.37	0.44	0.31	0.63	0.51	0.08	0.06	0.21	0.50	0.57	1.00	0.58	0.33	0.64	0.32	0.12
-0.57	0.40	-0.80	0.32	0.13	0.51	0.38	0.45	0.49	0.19	0.01	0.52	0.25	1.00	0.57	0.65	0.56	0.78	0.45	0.14
-0.38	0.23	-0.31	0.38	0.29	0.37	0.14	0.50	0.17	-0.09	0.07	0.07	1.00	0.25	0.50	0.35	0.27	0.26	0.12	0.22
-0.32	0.08	-0.44	0.08	0.07	0.27	0.51	0.22	0.40	0.23	0.19	1.00	0.07	0.52	0.21	0.35	0.39	0.47	0.25	-0.01
0.12	-0.34	0.02	0.11	0.22	-0.25	0.28	0.25	0.09	0.35	1.00	0.19	0.07	0.01	0.06	0.02	0.08	-0.09	-0.18	-0.44
-0.22	-0.27	-0.19	-0.22	-0.20	-0.00	0.15	-0.08	0.02	1.00	0.35	0.23	-0.09	0.19	0.08	0.22	0.17	0.14	-0.04	-0.17
-0.27	0.31	-0.43	0.31	0.32	0.33	0.36	0.36	1.00	0.02	0.09	0.40	0.17	0.49	0.51	0.28	0.16	0.46	0.04	-0.13
-0.48	0.26	-0.55	0.72	0.53	0.18	0.39	1.00	0.36	-0.08	0.25	0.22	0.50	0.45	0.63	0.52	0.46	0.47	0.42	-0.02
-0.30	0.12	-0.40	0.28	0.18	0.19	1.00	0.39	0.36	0.15	0.28	0.51	0.14	0.38	0.31	0.25	0.30	0.38	0.23	-0.05
-0.48	0.46	-0.55	0.18	-0.14	1.00	0.19	0.18	0.33	-0.00	-0.25	0.27	0.37	0.51	0.44	0.41	0.20	0.59	0.24	0.39
-0.18	-0.07	-0.17	0.42	1.00	-0.14	0.18	0.53	0.32	-0.20	0.22	0.07	0.29	0.13	0.37	0.22	0.24	0.09	0.16	-0.17
-0.42	0.32	-0.48	1.00	0.42	0.18	0.28	0.72	0.31	-0.22	0.11	0.08	0.38	0.32	0.51	0.32	0.27	0.39	0.35	-0.02
0.71	-0.38	1.00	-0.48	-0.17	-0.55	-0.40	-0.55	-0.43	-0.19	0.02	-0.44	-0.31	-0.80	-0.62	-0.70	-0.53	-0.88	-0.53	-0.16
-0.36	1.00	-0.38	0.32	-0.07	0.46	0.12	0.26	0.31	-0.27	-0.34	0.08	0.23	0.40	0.38	0.20	0.13	0.44	0.40	0.19
1.00	-0.36	0.71	-0.42	-0.18	-0.48	-0.30	-0.48	-0.27	-0.22	0.12	-0.32	-0.38	-0.57	-0.57	-0.60	-0.56	-0.64	-0.49	-0.19

