



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: «Проявление ВСП в погоде полярного региона»

Исполнитель Кондратова Мария Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

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

Ермакова Татьяна Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 01 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Внезапные стратосферные потепления	5
1.1 Механизм возникновения ВСП	6
1.2 Влияние на погоду и климат	9
1.3 Возможности прогнозирования	13
2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ.....	17
2.1 Реанализ MERRA-2.....	18
2.2 Реанализ JRA– 55	20
2.3 Реанализ ERA INTERIM.....	21
2.4 Данные радиозондирования	22
3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	24
3.1 Определение периода ВСП	24
3.2 Геопотенциальная высота.....	28
3.3 Приземная температура воздуха и атмосферное давление	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	49

ВВЕДЕНИЕ

Крупные атмосферные аномалии во время эпизодов внезапного стратосферного потепления (ВСП) позволяют лучше понять процессы взаимодействия во всей атмосфере. Эта связь предоставляет практическую возможность улучшить прогнозирование как атмосферной, так и космической погоды. Детальные знания о том, как стратосферные аномалии влияют на тропосферную погоду, откроют дверь для улучшения прогнозов. Воздействие ВСП на верхние слои атмосферы позволит ученым улучшить прогнозирование космической погоды, особенно для определения межсуточной изменчивости ионосферы. Физические процессы, влияющие на изменчивость слоев атмосферы Земли, действуют и в атмосферах других планет.

Вертикальный перенос энергии может быстро нагреть стратосферу и привести к разрушению стратосферного полярного вихря, представляющего собой круг сильных ветров, окружающих область низкого давления над полюсом. Известно, что со временем ВСП влияет на нижнюю тропосферу, что в свою очередь может привести к изменению погоды в высоких широтах. Такое влияние может продлиться более месяца.

Неясно, какое влияние оказывает изменение климата на частоту возникновения и характеристики ВСП. Более того, современные определения событий ВСП могут оказаться неуместными в условиях совершенно другого климата. Но важно понимать, что в сложной и развивающейся системе Земли любое изменение ВСП неизменно повлечет за собой изменения во всей атмосфере.

Актуальность данной работы заключается в выявлении влияния внезапного стратосферного потепления на температуру воздуха и атмосферное давление у поверхности земли. Такое влияние возможно так как уже известно, что ВСП воздействует на термодинамическую ситуацию в стратосфере

полярного региона, что в свою очередь сказывается на погоде в тропосфере приводя к погодным аномалиям.

Полученные в работе результаты могут помочь в совершенствовании краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды.

Целью данной работы является выявление зависимости температуры воздуха и атмосферного давления в полярном регионе при ВСП.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи

- Определить период ВСП по данным среднезональной температуры и зональной компоненты ветра, используя данные реанализа.
- Исследовать ход приземной температуры и атмосферного давления на метеостанциях полярного региона до, во время и после ВСП по данным реанализа и по данным зондирования.
- Выявить влияние ВСП на ход приземной температуры и давления в высоких широтах
- Выявить взаимосвязь приземной волны холода и ослабление циркумполярного вихря.

1. Внезапные стратосферные потепления

К числу наиболее ярких атмосферных процессов, во время которых проявляется динамическое взаимодействие тропосферы и стратосферы, относятся зимние события внезапного стратосферного потепления.

Внезапное стратосферное потепление описывает явление атмосферной изменчивости в масштабе от дня до месяца, когда температура в средней стратосфере (около 30 км или 10 гПа) быстро возрастает ($>30\text{--}40\text{ K}$) в течение нескольких дней в приполярных и полярных регионах [1]. В крайних случаях аномалии температуры ВСП могут достигать более 70 K относительно среднего многолетнего значения. Многие крупные ВСП сопровождаются реверсом регулярных западных ветров и/или смещением или даже расщеплением полярного вихря [2].

В спокойной зимней стратосфере господствует планетарный циркумполярный циклонический вихрь, окруженный субтропическими областями высокого давления. В периоды ВСП, которые могут осуществляться с равной вероятностью в течение всей зимы и продолжаться от нескольких дней до месяца, циклонический вихрь разбивается на отдельные две ячейки, которые отходят в более низкие широты, а в полярные районы выходят субтропические антициклоны или распространяются их гребни. В результате зональная западная циркуляция нарушается, и на полюсе существенно повышается температура. Именно поэтому такая перестройка поля давления и циркуляции была названа внезапным стратосферным потеплением [3].

Частота появления стратосферных потеплений не равномерна. Наиболее часто ВСП отмечается в районе Северной Атлантике и Тихом океане. Меньшее количество на европейских, азиатских и американских территориях.

Надо заметить, что действие планетарных волн в зимний период года более интенсивно выражено в Северном полушарии. Объясняется это контрастом в распределении суши и океана. В Северном полушарии ВСП

отмечается практически каждую зиму, в отличие от Южного в котором данное явление является единичным.

ВСП влияет на стратосферный полярный вихрь. При стандартных условиях он располагается над Северным полюсом, во время же ВСП стратосферный полярный вихрь ослабевает, смещается, растягивается и в итоге может разорваться на две части.

1.1 Механизм возникновения ВСП

Обычно считается, что ВСП вызываются тропосферными планетарными волнами, проникающими в стратосфере, Квазидвухлетним колебанием (КДК) и Южным колебанием (ЮК) в тропиках, которые влияют на стратосферный полярный вихрь, а также солнечной радиацией [4]. ВСП обычно возникают в полярных областях Северного полушария (за 60° с. ш.), тогда как в южной полярной области они возникают редко из-за менее тропосферной планетарной волновой активности [5].

Внезапное стратосферное потепление впервые наблюдал Ричард Шерхаг с помощью радиозондовых измерений в Берлине, январь/февраль 1952 г. Он обнаружил резкое повышение температуры в стратосфере. Примерно через десять лет Комиссия по атмосферным наукам (КАН) Всемирной метеорологической организации (ВМО) разработала международную программу мониторинга ВСП под названием STRATALERT, основанную на имеющихся радиозондовых и ракетных наблюдениях (WMO/IQSY 1964). КАН ВМО предложила выдавать предупреждение о ВСП при обнаружении внезапного и необычного повышения температуры на высоте 30 км и выше.

С течением времени и после того, как наблюдалось больше событий, было хорошо известно, что многие ВСП происходили вместе с изменением направления ветра и/или смещением или расщеплением полярного вихря [6]. Начиная с 1970-х годов во многих исследованиях повышение температуры и инверсия ветра сочетались для обнаружения ВСП, хотя детали реализации и

используемые пороговые значения сильно отличались [7]. Часто используемое на этом этапе определение было предложено ученым Макинтурфом, который предположил, что умеренная температурная аномалия менее 25 К считается незначительным событием, а более сильное повышение температуры, наблюдаемое совместно с изменением направления ветра, считается крупным событием. Поскольку инверсия ветра является одной из наиболее важных особенностей ВСП, многие исследования предлагают использовать обращение ветра для обнаружения крупных событий ВСП [8]. Одним из наиболее часто используемых определений является определение Чарльтона и Полвани: крупное ВСП происходит, когда среднезональные зональные ветры на 60° с. ш. на уровне 10 гПа становятся восточными в зимнее время. В дополнение к определениям инверсии ветра существуют также исследования, в которых используется вихревой момент, еще одна важная характеристика потепления, для обнаружения событий ВСП [9]. Кроме того, для обнаружения событий ВСП использовались полярные или среднезональные стратосферные аномалии с геопотенциальной высотой 10 гПа [10].

Первые свидетельства существования ВСП в атмосфере были получены в пятидесятые годы двадцатого века. Шаропилотные приборы, иначе радиозонды зафиксировали, что в Северном полушарии в зимнее время года температура в стратосфере периодически подвергается быстрому росту [11].

Принято считать, что зарождение ВСП происходит благодаря динамическому взаимодействию стратосферы и тропосферы, которое можно проследить до высоты около 30–45 км. В 1971 г. Т. Мацуно предположил, что образование ВСП можно проследить по взаимодействию планетарных волн (зональные волновые числа $m = 1, 2$) со средним потоком. Если амплитуда проникающей в стратосферу планетарной волны достаточно велика, это может привести к полному торможению западного переноса и перестройке направления на восточное. Работа Мацуно не утратило актуальности и по сей день [3].

Позднее теория Мацуно о взаимодействии волн со средним потоком развивалась. Со временем ее дополнили анализом синоптических данных, что в последствии позволило разделить развитие ВСП на несколько фаз.

Начальная фаза ВСП. К ней относится период, предшествующий образованию ВСП включающий в себя начало перестройки переноса воздушных масс в тропосфере. Происходит увеличение амплитуды планетарной волны, что является следствием сформировавшегося меридионального переноса воздушных масс из-за установившегося в тропосфере блокирующего циркуляционного процесса.

По прошествии пары дней с момента начала ВСП антициклогенез в тропосфере усиливается. Это является показателем динамической связи между стратосферной и тропосферной циркуляцией в данный период. Считается, что передача волн в стратосферу из тропосферы происходит относительно быстро от 3 до 10 суток, в то время как не характерные движения в самой стратосфере сохраняются гораздо дольше от 15 до 40 суток.

ВСП представляет собой выражение значительного двустороннего взаимодействия среднего стратосферного потока с восходящими планетарными волнами. Полярный вихрь в спокойной тропосфере располагающийся над полюсом, под влиянием волновых возмущений, может претерпевать изменения, то есть растягиваться, смещаться или разрываться.

Различают множество ВСП и в связи с этим считается, что и формируются они разными способами. Одни ВСП возникают благодаря активному выбросу планетарных волн из тропосферы в стратосферу. Другие как считается образует сама стратосфера путем регулирования восходящих волн. В одной теории единогласно сходятся, это то что устойчивое и равномерное нагревание циркумполярного вихря происходит благодаря нелинейному обрушению волн и конвергенции потоков Элиассена-Пальма.

Сразу после разрушения полярного вихря, начинается мощное радиационное охлаждение, которое помогает в восстановлении вихря. Но вихрь восстанавливается не всегда. Если до весенней перестройки стратосферы еще

много времени, то есть ВСП закончилось в начале февраля, то зимний вид циркуляции успевает восстановиться [13].

1.2 Влияние на погоду и климат

Существует ряд причин, по которым можно говорить о влиянии стратосферной изменчивости, в частности ВСП на приземную погоду. Основные категории механизмов:

1. Отдаленные эффекты движения волн в стратосфере. Нисходящий эффект посредством меридиональной циркуляции получил название «нисходящий контроль».
2. Поглощение и отражение планетных волн.
3. Прямое воздействие на бароклинность и бароклинные водовороты.
4. Отдаленные эффекты стратосферных аномалий полярного вихря [14].

В настоящее время доказано, что эффекты событий ВСП распространяются как вниз в тропосферу, так и значительно выше стратосферы и могут значительно изменить химию и динамику мезосферы, термосферы и ионосферы. В частности, некоторые события ВСП вызывают охлаждение мезосферы и приподнятую стратопаузу [15]. В ионосфере обнаружено изменение распределения плотности выбросов в ответ на ВСП [16]. Из-за меридиональной атмосферной циркуляции тропическая стратосфера охлаждается одновременно с полярным стратосферным потеплением [17]. По составу атмосфера тоже претерпевает изменения, например, распределение озона, водяного пара и осаднения энергетических частиц, также изменяется [18].

Изменения стратосферного ветра во время ВСП запускают цепочку событий, которые приводят к аномалиям в стратосфере и поднимаются в следующий слой, мезосферу, в обоих полушариях. Изменения стратосферной циркуляции во время ВСП модулируют спектр атмосферных волн, распространяющихся вверх в мезосферу, что приводит к изменению

среднесуточных скоростей ветра и температуры в верхней мезосфере и нижней термосфере (80–120 км над поверхностью). Изменения мезосферного ветра связаны с тем, как стратосферные ветры влияют на фильтрацию атмосферных гравитационных волн. Мезосферные аномалии часто, хотя и не всегда, первоначально появляются за неделю или более до пиковых стратосферных возмущений. Это время создает впечатление, что аномалии ВСП распространяются вниз на всем пути от мезосферы к тропосфере, хотя в настоящее время мы не знаем, имеет ли мезосфера какой-либо контроль над стратосферной изменчивостью. Потепление Южного полушария (летом) полярной мезосферы также происходит во время ВСП. Это потепление связано с волновыми изменениями циркуляции в Северном полушарии, которые приводят к потеплению тропической мезосферы. Измененный температурный градиент между тропиками и Южным полюсом изменяет летнюю циркуляцию в средних широтах, изменяя фильтрацию атмосферных гравитационных волн. При другом спектре гравитационных волн, достигающих мезосферы, температуры полярной летней мезосферы повышаются [19]. Это, в свою очередь, модулирует формирование полярных мезосферных или серебристых облаков [20]. Большая часть изменчивости на большой высоте обусловлена явлением, называемым атмосферными приливами. Как и океанские приливы, это периодические глобальные колебания атмосферы, основанные на 24-часовом дне и воздействии Солнца и Луны на атмосферу. Изменения стратосферно-мезосферных ветров во время ВСП приводят к изменению атмосферных приливов как в Северном, так и в Южном полушариях, демонстрируя глобальное влияние ВСП на мезосферу. Несмотря на то, что лунный прилив, как правило, относительно небольшой, во время ВСП лунный прилив соответствует или даже превышает амплитуду обычно гораздо более крупных термически обусловленных солнечных атмосферных приливов [21].

Эффекты ВСП не ограничиваются механизмами потепления и охлаждения. Изменчивость стратосферы и мезосферы также изменяет химический состав атмосферы в этих регионах. Эта изменчивость включает в

себя изменение распределения газовых примесей в атмосфере, включая стратосферный озон. В стратосфере нисходящее движение воздуха внутри полярного вихря приводит к резкому градиенту концентраций газовых примесей на краю вихря. Край вихря, по сути, представляет собой барьер между большими концентрациями газовых примесей внутри вихря и малыми концентрациями вне вихря или наоборот. Разрушение вихря при ВСП снимает этот барьер, усиливая перемешивание воздуха между средними широтами и полярной областью. Это приводит к более однородным концентрациям во всей стратосфере Северного полушария во время и после ВСП. Кроме того, изменения температуры, вызванные ВСП, могут модифицировать скорости химических реакций, что особенно важно для озона верхних слоев стратосферы. 70–80 км, что примерно на 20 км выше обычного положения. Взаимодействие между волновым воздействием и средним ветром приводит к тому, что стратопауза и сильное волновое воздействие опускаются по высоте. Эти изменения приводят к тому, что химические вещества, которые обычно находятся в верхней мезосфере, переносятся вниз в нижнюю мезосферу и верхнюю стратосферу в течение нескольких недель после ВСП. Этот нисходящий перенос приводит к аномально высоким концентрациям, например, оксидов азота (NO_x) и монооксида углерода (CO) в нижней мезосфере и верхней стратосфере. Перенос этих газов в нижние слои атмосферы влияет на химический состав полярной зимней стратосферы, в том числе на повышенный уровень NO_x , который усиливает разрушение озона.

Таким образом, ВСП являются важным компонентом изменчивости верхней атмосферы. Воздействие ВСП на термосферу изучается менее активно, чем на тропосферу, это связано с недостаточностью данных. Влияние изменения полярного вихря, происходящего под воздействием ВСП на погоду тропосферы является установленным фактом. В исследованиях доказано, что данные стратосферные события, могут влиять на погоду в высоких и средних широтах Северного полушария. В частности, ослабление стратосферного циркумполярного вихря приводит к резкому похолоданию в 50% случаях [22].

Событие ВСП приводит к изменениям в стратосфере, под влиянием нагрева к полюсу начинают заходить антициклоны или вытягиваться их гребни, что деформирует полярный вихрь. Вихрь начинает смещаться от полюса, если антициклоны подошли с двух сторон может произойти вытягивание вихря и даже его разрыв на две части.

Данное явление кратковременное и неустойчивое, со временем циркумполярный вихрь вернется на место и западные ветры снова восстановятся [23].

Аномалии, образующиеся во время события ВСП, часто перемещаются вниз из стратосферы в тропопаузу (граница между тропосферой и стратосферой) в течение примерно 10 дней, а затем может значительно изменить внетропические погодные условия в течение следующих 2 месяцев. Знание этого нисходящего движения может расширить диапазон прогнозов погоды. Помимо тропиков, ВСП может смещать траектории внетропических циклонических штормов к экватору, помимо других последствий. Это смещение увеличивает вероятность прохождения штормов над Великобританией и югом Европы, а также увеличивает вероятность рекордных холодов и снегопадов на востоке Северной Америки [24]. Хотя реанализ и моделирование климата ясно иллюстрируют нисходящее распространение аномалий, мы еще не полностью понимаем механизм, ответственный за стратосферный контроль над тропосферными погодными режимами. к поверхностным ветрам, которые модулируют крупномасштабную циркуляцию океана [25]. Однако в отличие от относительно краткосрочных атмосферных воздействий, ВСП вносят вклад в изменчивость океана во временных масштабах 5–10 лет. Такая изменчивость в более длительных временных масштабах возникает из-за группирования проявлений ВСП, что приводит к постоянному многолетнему воздействию на поверхность океана.

1.3 Возможности прогнозирования

Изучением ВСП занимаются с 50-х годов прошлого века, несмотря на это заблаговременность их прогнозирования не превышает несколько суток.

Для точных прогнозов ВСП требуются высококачественные данные, которые должны быть достаточно плотными в полярной стратосфере. Однако наблюдения в этих регионах, как известно, немногочисленны. В ранних исследованиях для наблюдения за ВСП использовались радиозонды или ракетные зонды. Однако оба набора данных, как правило, ограничены сушей и не могут обеспечить высокое вертикальное разрешение и высококачественные данные в нижней, средней и верхней стратосфере. С наступлением спутниковой эры в 1970-х годах появилась возможность размещать на спутниках такие инструменты, как микроволновые лимбовые эхолоты, инфракрасные спектрометры и радиометры, для глобального наблюдения за атмосферой [26].

Данные спутникового пассивного зондирования поступают в виде значений радиации, которые допускают только грубое разрешение по вертикали, что ограничивает точное преобразование в температуру с разрешением по высоте или профили ветра, которые являются ключевыми переменными для надежного мониторинга ВСП. С развитием систем усвоения атмосферных данных данные реанализа стали весьма надежным источником данных для долгосрочного анализа атмосферы благодаря их преимуществам регулярного отбора проб в пространстве и времени и способности предоставлять достаточно надежные данные вплоть до стратопauзы [27]. Однако данные реанализа могут иметь неоднородность и неравномерность в долгосрочной перспективе из-за эпизодических обновлений системы наблюдения и добавления разнообразных новых наборов данных наблюдений в течение нескольких десятилетий; они не являются прямым долговременным последовательным наблюдением за атмосферой. В дополнение к редкости надежных методов наблюдения, ВСП также не имеют согласованного сообществом стандартного определения для надежного обнаружения и

мониторинга. Ранее был представлен подробный обзор истории различных определений ВСП и рассчитали частоту ВСП для перекрестной оценки девяти различных определений на основе данных реанализа. Их результаты показывают, что частоты, полученные с использованием разных определений, сильно различаются, примерно от 0,46 до 0,81 событий в год, и даты начала (или максимальной аномалии) основных ВСП для каждого определения также могут существенно различаться. Причины этих расхождений включают в себя как данные, так и методические причины. Рассмотрим сначала методические причины.

Во-первых, хотя ВСП обычно происходят вместе с реверсом ветра или сменой полярного вихря, это не всегда так. В нескольких исследованиях было обнаружено значительное потепление в стратосфере, но не было одновременно обнаружено изменение направления ветра на обычно используемых широтах 60° или 65° северной широты. Во-вторых, определения на одной широте и/или на одной высоте, такие как изменение направления ветра, могут упустить некоторые важные ВСП, которые произошли в основном в других широтно-высотных областях [28]. В-третьих, определения могут быть весьма чувствительны к фоновой климатологии и конкретным используемым пороговым значениям, особенно если они основаны на широких аномалиях среднего значения полярной шапки. Наконец, текущие определения используют либо среднезональные результаты, либо средние значения полярных шапок, что не позволяет осуществлять динамическое трехмерное отслеживание таких событий. Однако информация о динамическом местоположении и силе весьма важна для изучения взаимодействия ВСП с другими явлениями как в отношении причин, так и последствий.

Что касается аспектов данных, данные реанализа, как указано выше, могут иметь неоднородность с течением времени. Определения, основанные на одной широте или регионе, более чувствительны к таким вариациям, чем определения, основанные на более крупных областях. Что касается аспектов метода, детальная реализация при выборе переменной обнаружения, широты,

высоты, пороговых значений и фоновой климатологической информации может сделать результаты совершенно разными. Эти расхождения в определениях ВСП делают статистические оценки ВСП довольно сложными. Кроме того, наряду с атмосферной физикой и динамикой анализ других погодных и климатических явлений, связанных с ВСП, также серьезно затруднен, если не может быть обеспечена точная диагностика и мониторинг ВСП.

Так, в настоящее время, американская система анализа GEOS5 с верхней границей на 0.01 гПа (~80 км) и разрешением по долготе– широте $0.3^\circ \times 0.25^\circ$ предсказала главное ВСП с разделением полярного вихря в январе 2013 г. за пять суток. Иногда, как в январе 2009 г., главное ВСП может произойти при неблагоприятных внешних факторах, к которым относятся фаза квазидвухлетнего колебания (КДК) зонального ветра на экваторе и фаза 11 летнего солнечного цикла (главные ВСП чаще возникают в годы минимума этого цикла и восточной фазы КДК, а в годы максимума – при западной фазе) [29].

Основным инструментом в прогнозировании событий ВСП являются глобальные климатические модели. Чем качественнее происходит описание динамических процессов в атмосфере, тем точнее будет прогноз не только отдельных процессов и явлений, но и климата в целом [30].

В исследованиях было отмечено, что модели с верхней границей расчетной области, расположенной выше 1 гПа, число прогнозируемых случаев ВСП в среднем примерно такое же, как число наблюдаемых ВСП. В то же время, если прогностическая модель имеет низкую границу расчетной области, количество прогнозируемых ВСП становится практически в два раза меньше реально происходивших. Также в моделях с низкой верхней границей влияние стратосферы на тропосферу, а именно уменьшение скорости зонального ветра в тропосфере прослеживается в течении месяца после события ВСП. В моделях с достаточно высокой верхней границей, данное влияние более

продолжительное, оно отмечается на протяжении трех месяцев после ВСП, и такое длительное влияние подтверждают наблюдения.

Анализ других параметров, определяющих динамику стратосферы, также демонстрирует, что модели с достаточным количеством расчетных уровней в верхней стратосфере в своем большинстве наиболее правильно воспроизводят динамику стратосферы и её влияние на циркуляцию тропосферы [31].

За последнее десятилетие, мы стали в несколько раз лучше прогнозировать явление ВСП. Стали более точными не только краткосрочные прогнозы, но и появилась возможность делать среднесрочные прогнозы с заблаговременностью до 10 суток. Это стало возможным благодаря увеличенному вертикальному разрешению прогностических моделей и более детальному описанию физических процессов, происходящих в стратосфере. Не точности в прогнозах все еще остаются, одной из таких проблем является прогноз влияния события ВСП на вихрь, будет ли происходить его расщепление или только смещение.

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Реанализ — это процесс, при котором неизменяемая система усвоения данных используется для обеспечения согласованной обработки метеорологических наблюдений, обычно охватывающих расширенный сегмент записи исторических данных. Реанализ был создан с целью предоставления набора климатических данных высокого качества. Он может создавать набор данных для многочисленных типов метеорологических переменных, в том числе для редких наблюдений, в физически последовательном пространственно-временном порядке. Реанализ в первую очередь предназначен для изучения предсказуемости, мониторинга климата и изучения механизмов климатической системы Земли.

В данной работе использовались данные реанализа MERRA-2: зональная составляющая ветра и температура на высотах стратосферы с ноября по март с 1984 по 2012 года. Периоды ВСП определялись двумя методами. В первом случае, ВСП определялось по аномалиям температуры и зональной компоненты ветра от климатических значений, климатическое значение вычиталось из месячных значений зональной составляющей ветра и температуры. Оно определялось как средние с 1984 по 2012 гг. (периодом ВСП считался временной интервал, когда наблюдалась аномалия). во втором случае строились среднезональные значения температуры на 30 км и зональной компоненты ветра на 45 км (началом ВСП считался день, когда наблюдался резкий рост температуры). Для анализа геопотенциальной высоты также использовался реанализ MERRA-2. Были построены его осредненные значения в слое 20-45км по недельным периодам, бралась неделя до и после ВСП период самого потепления также делился на части.

Для изучения изменений приземной температуры воздуха или использованы реанализы ERA INTERIM и JRA. С их помощью были построены

осредненные данные приземной температуры на 2 м, осреднение производилось по тем же периодам что и геопотенциальная высота.

Так же в работе использовались данные радиозондирования, по которым были построены графики приземного распределения температуры воздуха и атмосферного давления по 14 станциям.

2.1 Реанализ MERRA-2

MERRA-2 (Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications версии 2) — глобальный атмосферный реанализ, произведенный управлением глобального моделирования и ассимиляции NASA (GMAO). MERRA-2 охватывает диагностику поверхности суши за период с 1980 года по настоящее время с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,625^\circ$, 72 гибридных уровня от поверхности до 0,01 гПа и временным разрешением 1 час. MERRA-2 использует сетку кубической сферы, что позволяет относительно равномерно распределить расстояние между сетками на всех широтах. MERRA-2 является улучшенной версией MERRA. MERRA охватывала период 1979–2016 гг. и преследовала две основные цели: поместить спутниковые наблюдения Системы наблюдения за Землей (EOS) NASA в климатический контекст и улучшить представление атмосферной ветви гидрологического цикла по сравнению с предыдущими реанализами. MERRA удалось достичь этих целей в целом. Однако он также страдал от ряда известных недостатков. Основные недостатки:

- нефизические скачки и тренды осадков в ответ на изменения в системе наблюдений
- погрешности и дисбалансы в некоторых гидрологических величинах атмосферы и поверхности земли
- плохое представление верхних слоев стратосферы.

- долгосрочная жизнеспособность MERRA была ограничена системными ограничениями, препятствовавшими включению новых источников спутниковых данных помимо NOAA-18,

Вторая версия Ретроспективного анализа современной эпохи для исследований (MERRA-2), была проведена, чтобы обеспечить своевременную замену MERRA и поддержать приверженность GMAO постоянному анализу климата в режиме, близком к реальному времени. MERRA-2 задуман как промежуточный реанализ, который использует последние разработки GMAO в области моделирования и усвоения данных для устранения некоторых известных ограничений MERRA, но также обеспечивает следующую ступень к более долгосрочной цели GMAO по разработке комплексного анализа системы Земли (IESA), которая объединяет системы ассимиляции для атмосферы, океана, суши и химического состава. Для достижения последней цели MERRA-2 включает ассимиляцию данных об аэрозолях, тем самым обеспечивая многолетний реанализ, в котором аэрозольные и метеорологические наблюдения совместно ассимилируются в рамках глобальной системы ассимиляции данных. Другие новые разработки в MERRA-2, относящиеся к IESA, сосредоточены на аспектах криосферы и стратосферы, включая представление озона, и на использовании наблюдений за осадками для воздействия на поверхность земли. При этом основные аспекты системы MERRA-2, такие как алгоритм 24 вариационного анализа и наблюдение обработки, практически не изменились со времен MERRA. Неизменным также остается подготовка большинства традиционных источников данных, изначально использовавшихся в MERRA [32].

2.2 Реанализ JRA– 55

Японское метеорологическое агентство (JRA) провело второй глобальный реанализ атмосферы Японии, названный 55-летним Японским реанализом или JRA-55. Он охватывает период с 1958 г., когда в глобальном масштабе начались регулярные наблюдения с использованием радиозондов по 2012 год. Это первый в своем роде реанализ в котором применен четырехмерный вариационный анализ к этому временному промежутку. Основные цели JRA-55 заключались в решении проблем, обнаруженных в предыдущих реанализах, и в создании всеобъемлющего набора атмосферных данных, пригодного для изучения многолетней изменчивости и изменения климата.

В JRA-55 были решены следующие проблемы предшественника:

- холодное смещение в нижней стратосфере, одна из основных проблем JRA-25, уменьшилось благодаря, прежде всего, правильному представлению поглощений из-за доплеровского расширения в пересмотренной длинноволновой схеме излучения;
- сухое смещение в бассейне Амазонки было временно смягчено за счет исключения наблюдений поверхностного давления над бассейном Амазонки;
- временная составляющая температурного анализа значительно улучшилась по сравнению с предыдущими реанализами, благодаря улучшенной климатологии в модели, новым имеющимся оценкам смещения для гомогенизации температуры радиозонда и достижениям в обработке спутниковых излучений.

Первоначальная оценка качества выявила такие проблемы, как смещение в сторону тепла в верхних слоях тропосферы, смещение в сторону холода в нижних слоях тропосферы и большой дисбаланс в сторону увеличения в глобальных средних чистых потоках энергии в верхних слоях атмосферы и на поверхности, чрезмерное количество осадков над тропиками и нереалистичные

тенденции в анализируемых тропических циклонах. Теплое смещение в верхней тропосфере постепенно уменьшается по мере улучшения системы наблюдений. Влияние изменений в системах наблюдений особенно заметно в июле 2006 года [33].

Чтобы улучшить временную согласованность продукта, эти модельные смещения должны быть дополнительно уменьшены. Некоторые из диагностических полей из прогностической модели по-прежнему имеют большие отклонения, например, чрезмерные осадки над тропиками, чрезмерный (недостаточный) ТОА (Top of the atmosphere), отраженный солнечный поток над тропиками и субтропиками (Антарктический океан), чрезмерный исходящий тепловой поток в районах глубокой конвекции, и общий дисбаланс 10 Вт м⁻² вверх в глобальных средних чистых потоках энергии на ТОА и поверхности.

2.3 Реанализ ERA INTERIM

ERA-Interim — это часто используемый глобальный реанализ атмосферы, производимый Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

ERA-Interim охватывает период с 1979 по 2019 год. Количество атмосферных уровней составляет 60 с самым высоким 0,1 гПа. Пространственное разрешение 0,75° x 0,75°, и временное разрешение 6 часов.

Используя значительно улучшенную атмосферную модель и систему ассимиляции по сравнению с теми, что использовались в ERA-40, ERA-Interim представляет собой реанализ третьего поколения. Некоторые неточности, выявленные ERA-40, такие как слишком обильные осадки над океанами с начала 1990-х годов и далее и слишком сильная циркуляция Брюера-Добсона в стратосфере, были устранены или значительно уменьшены.

Прогресс (по сравнению с ERA-40) был достигнут в следующих областях:

- реанализ продолжается практически в режиме реального времени
- Низкочастотная изменчивость намного лучше
- Точность анализа повысилась
- Улучшился гидрологический цикл
- Качество стратосферной циркуляции улучшается

Список известных проблем с качеством ERA-Interim включает:

- Ложные сдвиги во временных рядах ERA-Interim, связанные с изменениями в системе наблюдений:
 - Изменения в количестве осадков (особенно над тропическими океанами) в период с января 1992 г. по декабрь 2009 г. из-за ассимиляции воздействующих на дождь излучений SSM/I.
 - Скачок температур в верхних слоях стратосферы (на уровнях 5 ГПа и выше), связанный с введением данных о радиации от AMSU-A в августе 1998 года [34].

2.4 Данные радиозондирования

Приземные данные температуры воздуха и атмосферного давления были получены с сайта Вайоминского университета (<https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). На данном сайте в открытом доступе находятся данные радиозондирования.

Атмосферное зондирование – измерение таких вертикальных параметров атмосферы, как давление, температура, температура точки росы, скорость и направление ветра, содержание жидкой воды, концентрация озона, загрязнение и другие свойства. Такие измерения выполняются различными способами, включая дистанционное зондирование и наблюдения на месте. Наиболее распространенным зондированием на месте является радиозонд, оснащенный радиопередатчиком, который излучает зондирующий сигнал. Он состоит из

датчиков, которые непосредственно измеряют атмосферные компоненты, такие как термометры, барометры и датчики влажности, и воздушного шара, с помощью которого датчики поднимаются в воздух на высоту 30-40 км. Его запускают два раза в сутки – в 00 UTC и в 12 UTC.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ полей данных реанализа производился при помощи программы Open GRADS.

В результате работы были отобраны и проанализированы 8 зим с событием ВСП. В данной работе будут подробно рассмотрены только 4 из них зимы: 1991 - 1992, 1998 - 1999, 2008 - 2009 и 2011 - 2012 годов.

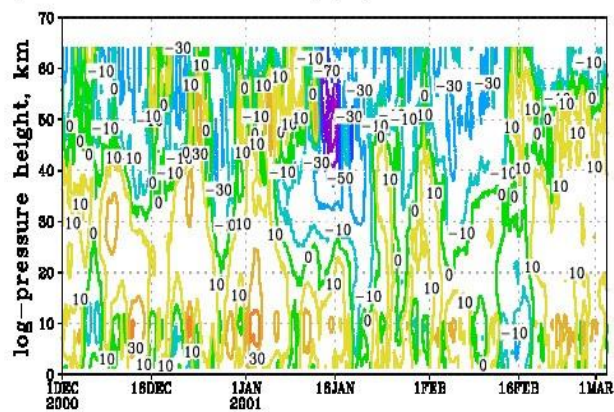
3.1 Определение периода ВСП

Определение периода ВСП проходило двумя способами. Сначала мы выбрали период ВСП исходя из аномалии температуры и зональной компоненты ветра от климатических значений с ноября по март. Значение температуры рассматривалось на широте $77.5 - 87.5^{\circ}\text{с.ш.}$, значение ветра бралось средние в диапазоне широт 62.5°с.ш. . Период ВСП считался от момента начала отклонения параметров от климатического значения до возвращения в норму.

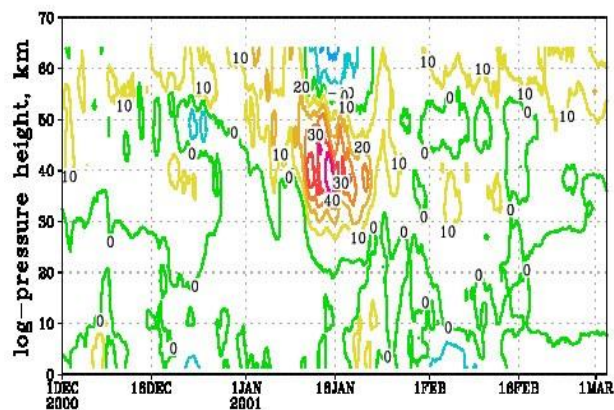
В 1992 году аномалия начинает проявляться с 9 января и проявляется относительно небольшой промежуток времени до 29 января (рисунок 1, правые панели). Максимальное отклонение аномалии температуры от климатических значений составляет 40К, а отклонение ветра 70 м/с в восточном направлении и приходится на 14 января.

Потепление 1998 года (рисунок 1, левые панели) с 15 декабря 1998 по 10 января 1999 года наиболее продолжительное. Максимум аномалий приходится на начало потепления 18 декабря и составляет 40 К для температуры и - 90 м/с для ветра. Еще надо заметить, что в данном случае аномалия распространяется вниз в тропосферу на высоту до 10 км и с большей вероятностью будет влиять на приземную погоду.

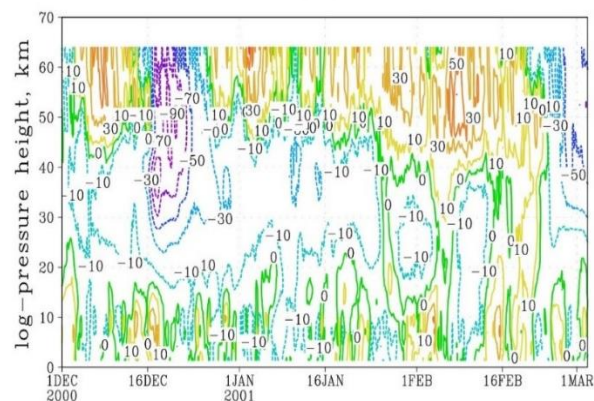
a) Zonal wind – Climate (m/s), 1991–92, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 1991–92, LAT=77.5–87.5N



a) Zonal wind – Climate (m/s), 1998–99, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 1998–99, LAT=77.5–87.5N

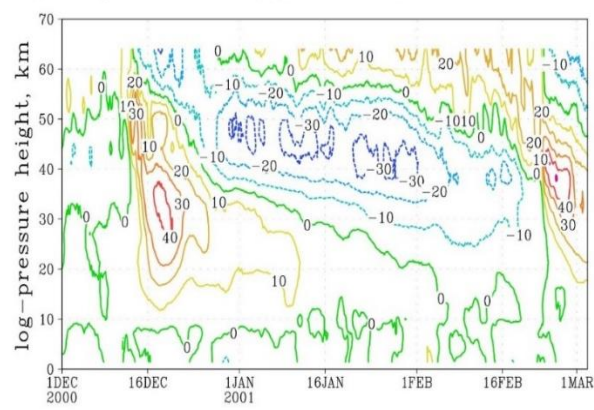
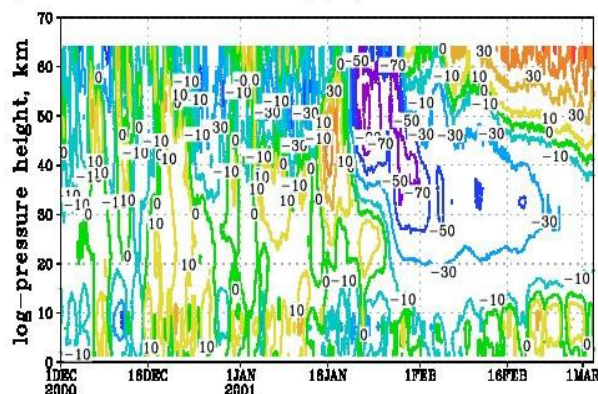


Рис.1. Осцилляция зональной компоненты ветра в м/с, частота изолиний 10 м/с (верхние панели) и аномалия температуры (K), частота изолиний 10K (нижние панели) для зимы 1991 -1992 гг. (левые панели) зимы 1998– 1999 гг. (правые панели)

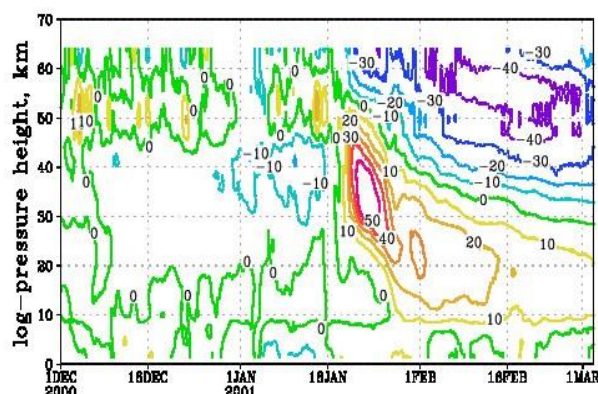
ВСП на рисунке 2 (левые панели) наблюдалось с 21.01.2009 по 03.03.2009 года, это самый продолжительный период ВСП из всех изученных 8 случаев. Максимум 20 января 50 K и -70 м/с. Аномалия прослеживается ниже 10 км.

Последнее рассмотренное событие ВСП рисунок 2 (левые панели) длилось с 7 января по 1 февраля 2012 года с максимумом 16 января, который составил для температурной аномалии 40 K, а для аномалии по ветру -70 м/с.

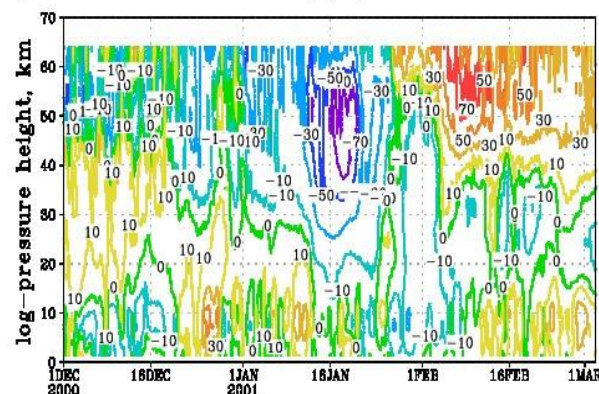
a) Zonal wind – Climate (m/s), 2008–09, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 2008–09, LAT=77.5–87.5N



a) Zonal wind – Climate (m/s), 2011–12, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 2011–12, LAT=77.5–87.5N

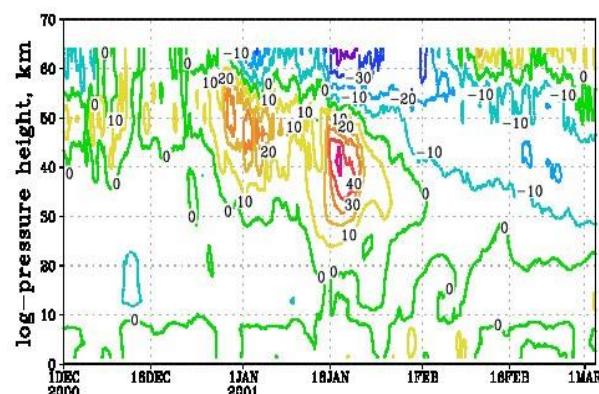


Рис.2. Оцилляция зональной компоненты ветра в м/с, частота изолиний 10 м/с (верхние панели) и аномалия температуры (K), частота изолиний 10K (нижние панели) для зимы 2008 - 2009 гг. (левые панели) зимы 2011 - 2012 гг. (правые панели)

Во втором методе выбираем период ВСП исходя из среднезонального значения температуры на 30 км и зональной компоненты ветра на 45 км осредненных по тем же широтам, что и в первом методе. Этот метод помогает нам более точно разделить ВСП на три периода: начало отклонений до максимума, возвращение в норму и самое главное - переломный момент, дата максимальных.

Рисунок 3 (левые панели) показывает нам изменения происходящие зимой 1992 года. Выделенный период 08.01.1992 – 24.01.1992 практически полностью совпадает с периодом выделенным первым методом. Можно обозначить два максимума 14 и 18 января.

ВСП представленное на рисунке 3 (левые панели) наблюдается в период с 14 декабря до 30 декабря 1998 года. Максимум один ярко выраженный

приходится на 17 декабря. Также можно видеть второй максимум в конце февраля говорящий нам о том, что в данную зиму было еще одно ВСП, но оно в этой работе рассмотрено не было.

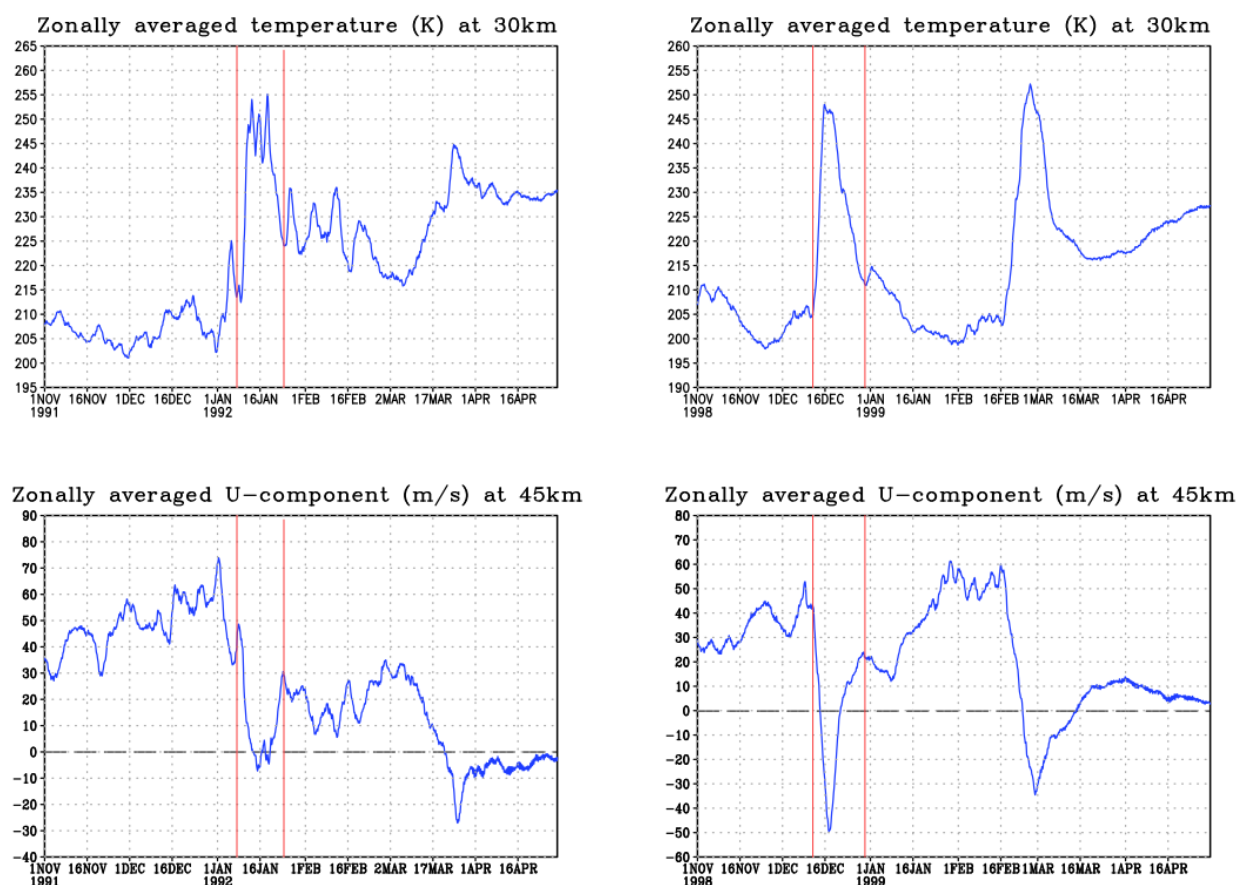


Рис.3. График зонально осредненной температуры, К (верхние панели) и компоненты ветра в м/с (нижние панели) для периода с декабря по январь 1991 - 1992 (левые панели) и для периода с декабря по январь 1998 – 1999 (правые панели)

Рисунок 4 (левые панели) иллюстрирует среднезональное значение температуры и зональной компоненты ветра для 2009 года. Выделенный период 16.01.2009 – 01.03.2009 года. Следует отметить, что конец периода выбран произвольно, так как четкого окончания отклонений нет. Зато есть четкая дата пиковых отклонений 24.01.2009 максимальное значение составляет 267 К, что является максимумом среди всех периодов.

В 2012 году повышение среднезонального значения температуры и ослабление зональной компоненты ветра было ступенчатым (рисунок 4, правые

панели). Период ВСП соответственно с 06.01.2012 по 22.02.2012. Максимум 20 января 2012 года.

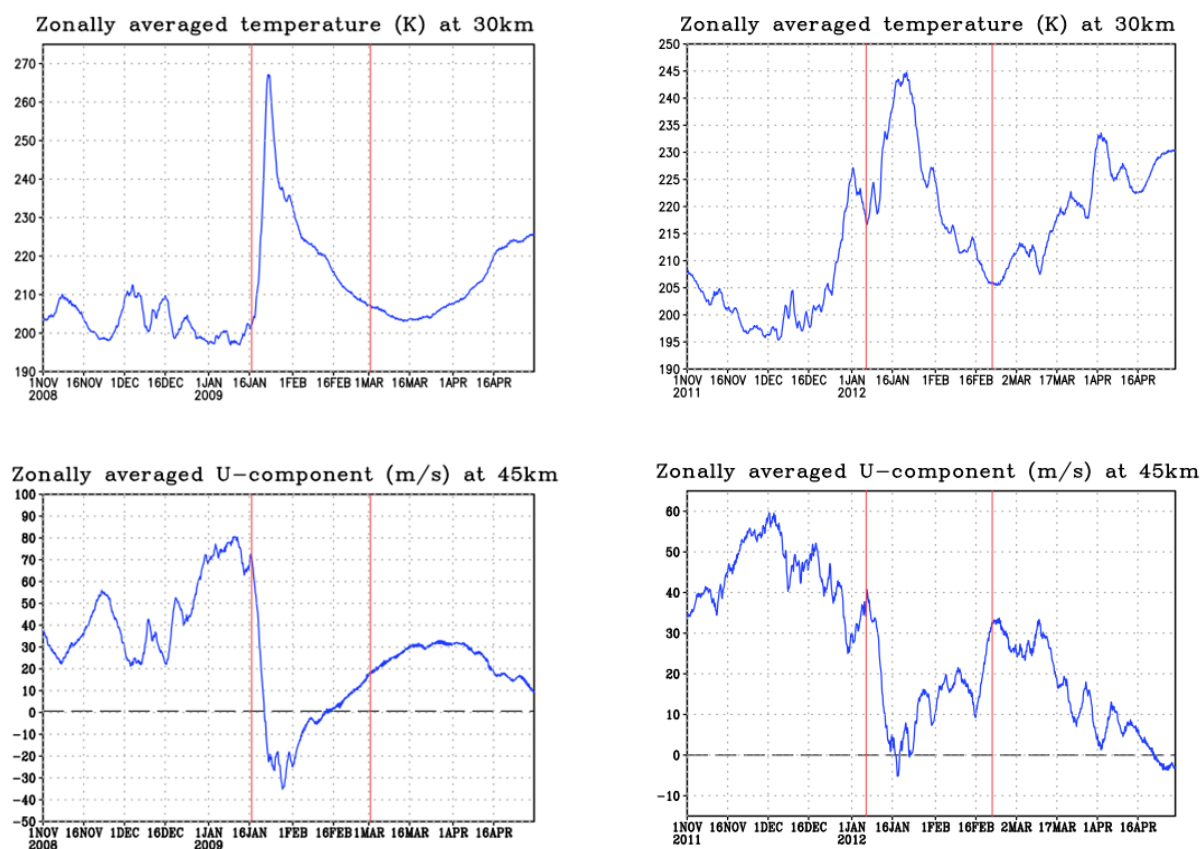


Рис.4. График зонально осредненной температуры, К (верхние панели) и компоненты ветра в м/с (нижние панели) для периода с декабря по январь 2008 - 2009 (левые панели) и для периода с декабря по январь 2011 - 2012 (правые панели)

Промежутки события ВСП определенные вторым методом в среднем на две недели короче, чем период, определенный первым методом.

3.2 Геопотенциальная высота

Как указано выше, во время ВСП, происходит деформация циркумполярного вихря. Для анализа деформации был выбран период ВСП, определенный вторым методом (метод аномалий от климатических значений), так как он в большинстве своем более продолжительный. Далее выбранный период ВСП делился примерно на равные промежутки около 7 суток, для

исследования также была взята неделя до и неделя после ВСП. Это было сделано, чтобы убедиться, что до ВСП вихрь был в устойчивом состоянии.

На рисунке 5 представлен 1992 год. Циркумполярный вихрь на протяжении всего события ВСП оставался достаточно устойчивым, немного смещаясь от Гренландии до Новой Земли. Пик аномалии среднезональной температуры приходится на первую неделю ВСП (рисунок б).

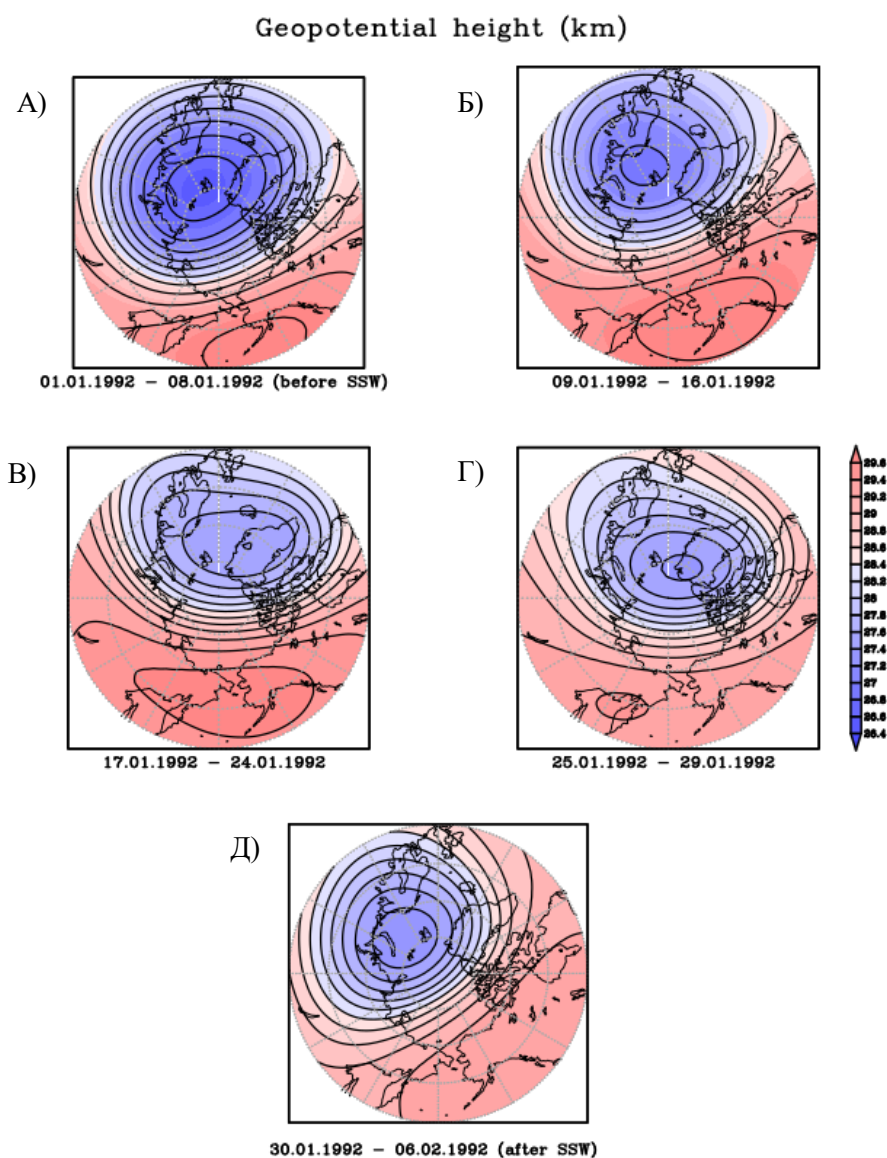


Рис.5. Осредненное значение геопотенциальной высоты в км а) неделя до ВСП б), в), г) последовательно три недели во время ВСП 1992 года д) неделя после ВСП

Во время ВСП 98 -99 гг. (рисунок 6) циркумполярный вихрь выражен на протяжении всего ВСП. Но смещение все равно происходит. Вихрь сначала вытесняется на материк, затем вытягивается от Новой Земли до Гренландии и в данном вытянутом состоянии слегка смещается на Скандинавию. После ВСП мы видим углубление циркумполярного вихря и возвращение его ядра на прежнее место. Пиковое значение, выделенное во время определения ВСП вторым способом, приходится на первую неделю ВСП.

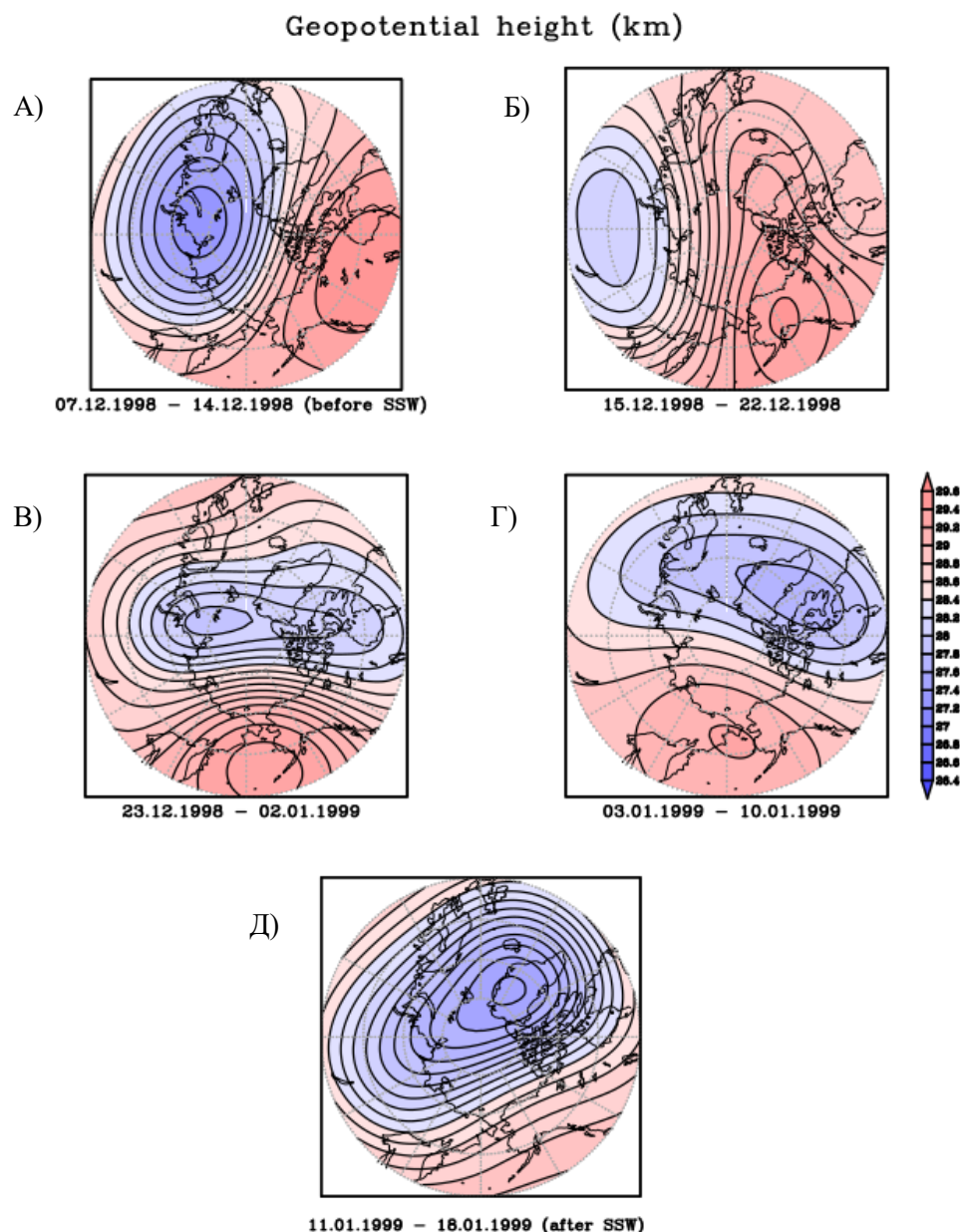


Рис.6. Осредненное значение геопотенциальной высоты в км а) неделя до ВСП б), в), г) последовательно три недели вовремя ВСП 1998 -1999 года д) неделя после ВСП

Рисунок 7 иллюстрирует изменение геопотенциальной высоты в 2009 году. В этот год произошел разрыв полярного вихря на две части, тоже самое происходило еще раз в 1984 году. На рисунке 7а вихрь уже вытянут, что говорит нам о том, что ВСП началось раньше, чем мы предполагали. Пиковое значение отклонений также приходится на первую неделю ВСП (рисунок 7б). После разрыва, ядра вихря начинают смещаться в противоположные друг от друга стороны, один в сторону Новой Земли, другой в сторону севера Канады. Затем мы видим антициклон заходящий в северные широты со стороны Беренгова пролива (рисунок 7б) и останавливающийся в районе Северного полюса (рисунок 7г). Потом антициклон ослабевает и мы наблюдаем размытое барическое поле (рисунок 7д), из которого после периода ВСП начинает образовываться новый центр в районе Новой Земли.

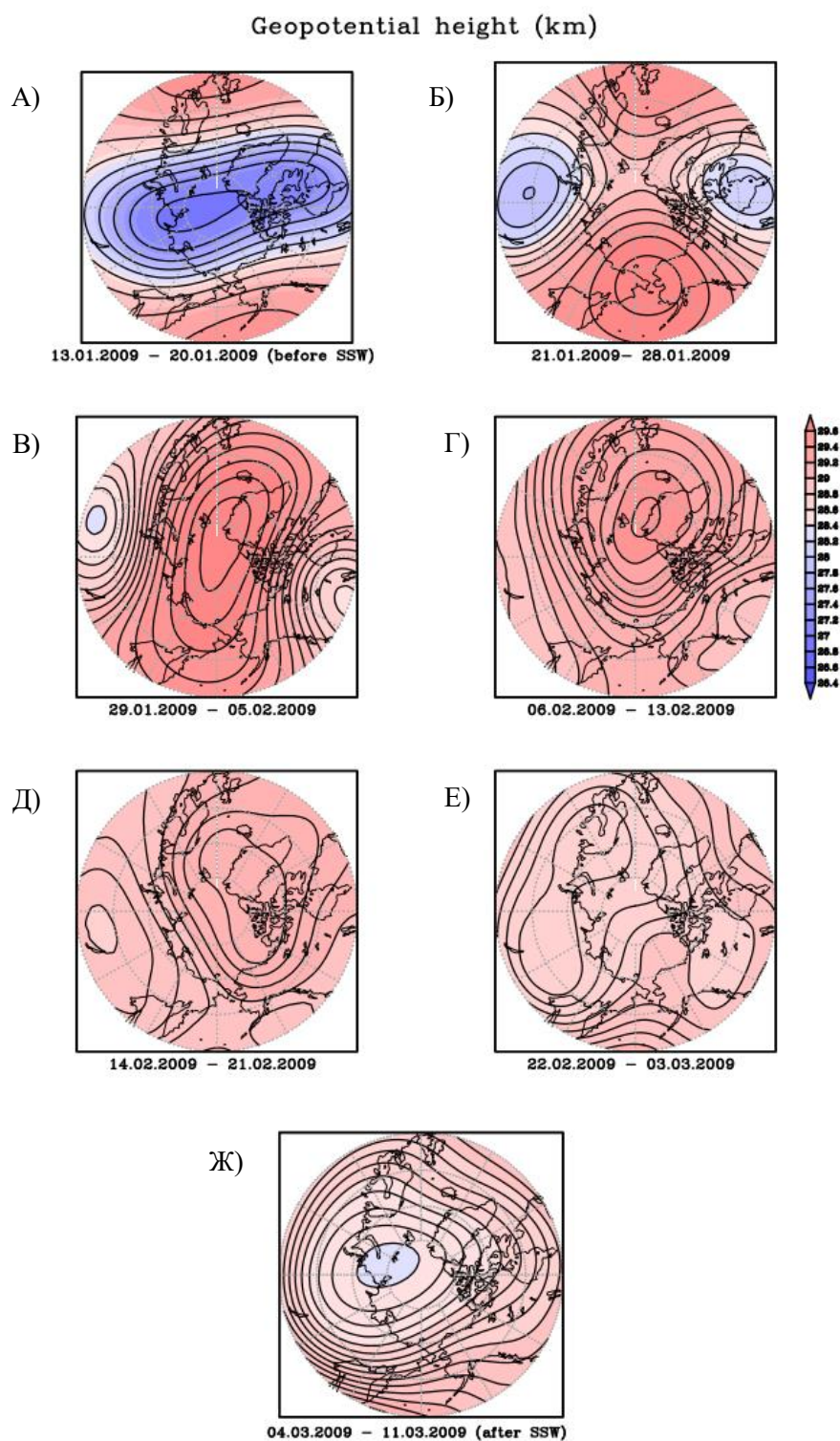


Рис.7. Осредненное значение геопотенциальной высоты в км а) неделя до ВСП
б), в), г), д), е) последовательно пять недель во время ВСП 2009 года ж) неделя после
ВСП

Последняя рассмотренная зима – зима 2011 – 2012 года (рисунок 8). За время ВСП вихрь значительно ослаб и уменьшился в диаметре. Максимум

аномалий приходится на вторую неделю ВСП. В 2003 году максимум также пришелся на третью неделю, в остальном пик всегда приходился на первую неделю.

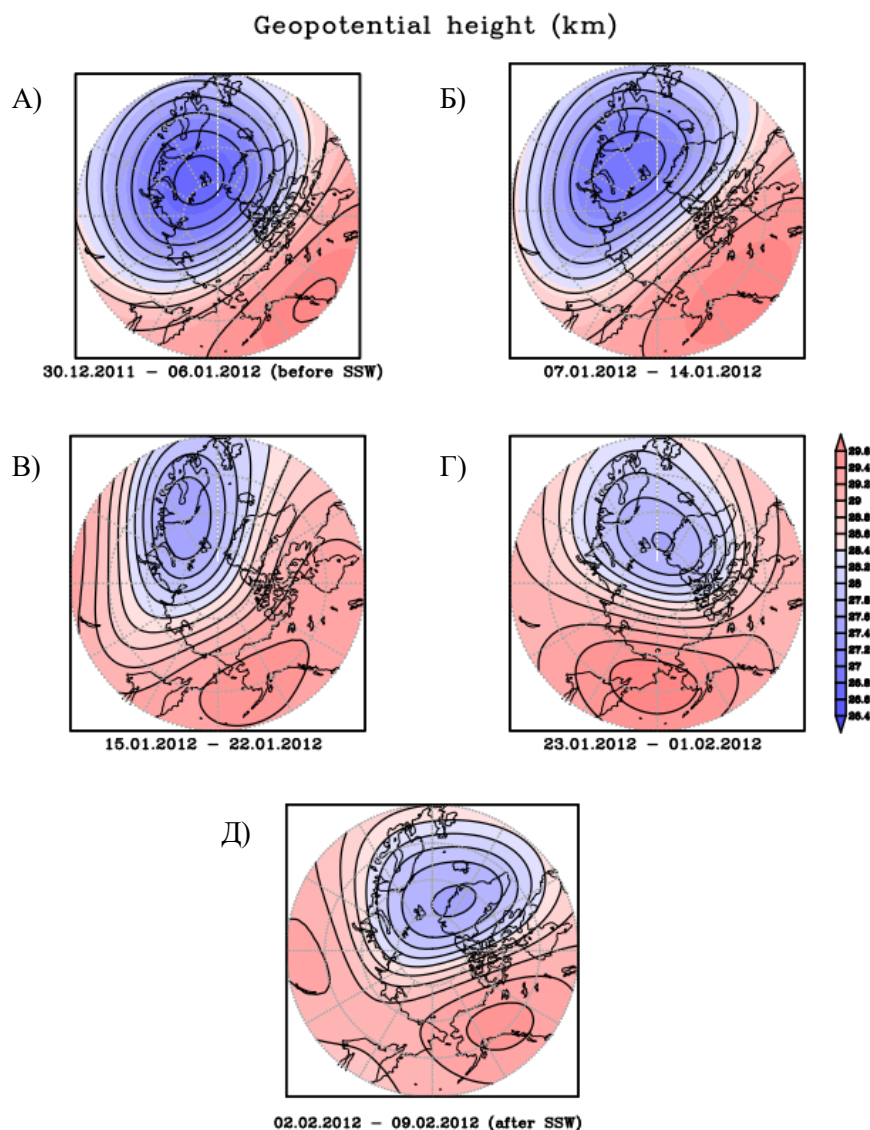


Рис.8. Осредненное значение геопотенциальной высоты в км а) неделя до ВСП б), в), г) последовательно три недели во время ВСП 2012 года д) неделя после ВСП

Значительное изменение геопотенциальной высоты происходит не каждый раз, сильная деформация вихря, такая как его расщепление, произошла всего два раза из восьми рассмотренных случаев.

3.3 Приземная температура воздуха и атмосферное давление

Приземная температура воздуха рассматривалась двумя способами. Были взяты данные двух реанализов ERA INTERIM и JRA. После чего в программе Open GRADS построено поле приземной температуры на высоте 2 м, осредненная по тем же периодам, что и геопотенциальная высота. Было использовано два реанализа для проведения сравнения результатов. Для проверки и подтверждения данных реанализов использовались данные прямых измерений, производимых радиозондами. Данные с зондирования брались за 00 UTC и только у поверхности земли по 14 станциям: Данмарксхавн 76°46' с.ш. 40°76' з.д., Алерт 82°29' с.ш. 62°21' з.д., Инувик 68°21' с.ш. 133°43' з.д., Берроу 71°23' с.ш. 156°28' з.д., Черский 68°45' с.ш. 161°19' в.д., Чокурдах 70°37' с.ш. 147°54' в.д., Диксон 73°30' с.ш. 80°31' в.д., Тикси 71°38' с.ш. 128°52' в.д., Нарьян-Мар 67°38' с.ш. 53°00' в.д., Кандалакша 67°09' с.ш. 32°24' в.д., Станция имени Е.К. Федорова 70°26' с.ш. 59°05' в.д., Юрика 79°58' с.ш. 85°49' з.д., Резольют 74°41' с.ш. 94°49' з.д., Нью-Олессун 78°55' с.ш. 11°55' в.д.. Расположение станций представлено на рисунке 9. Для температуры и атмосферного давления были построены графики в программе Excel.

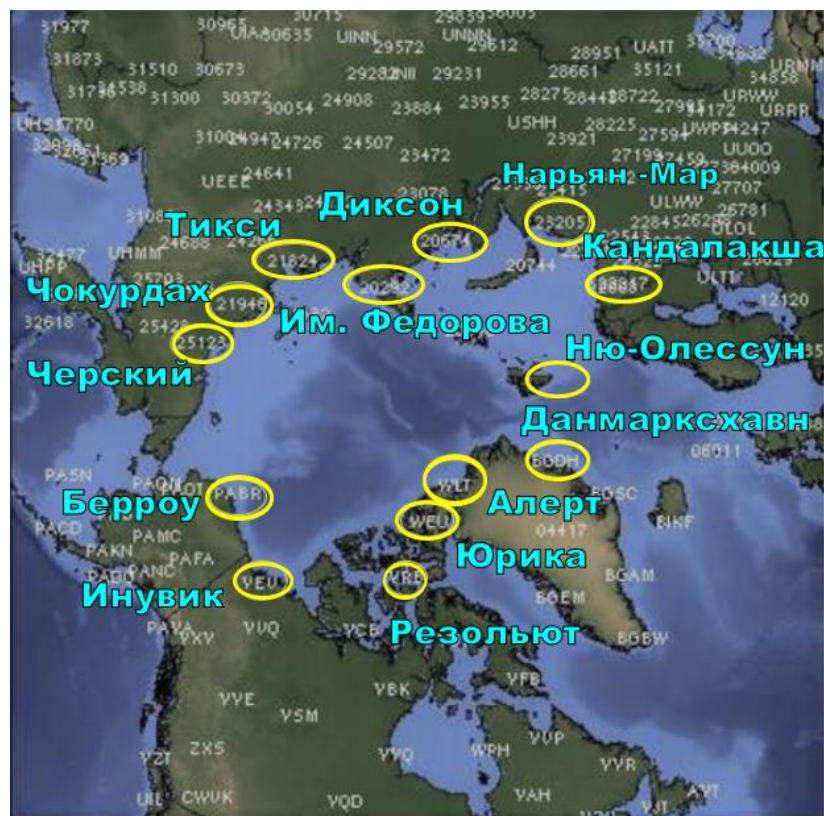


Рис.9. Расположение станций на карте

Рисунки 10 и 11 иллюстрируют изменение температуры в 1992 году. Волна холодного воздуха распространяется вдоль прибрежной зоны Евразии в направлении Кольского полуострова, так же прослеживается распространение в глубь материка Северная Америка. После первых двух недель ВСП область более холодного воздуха начинает отступать обратно.

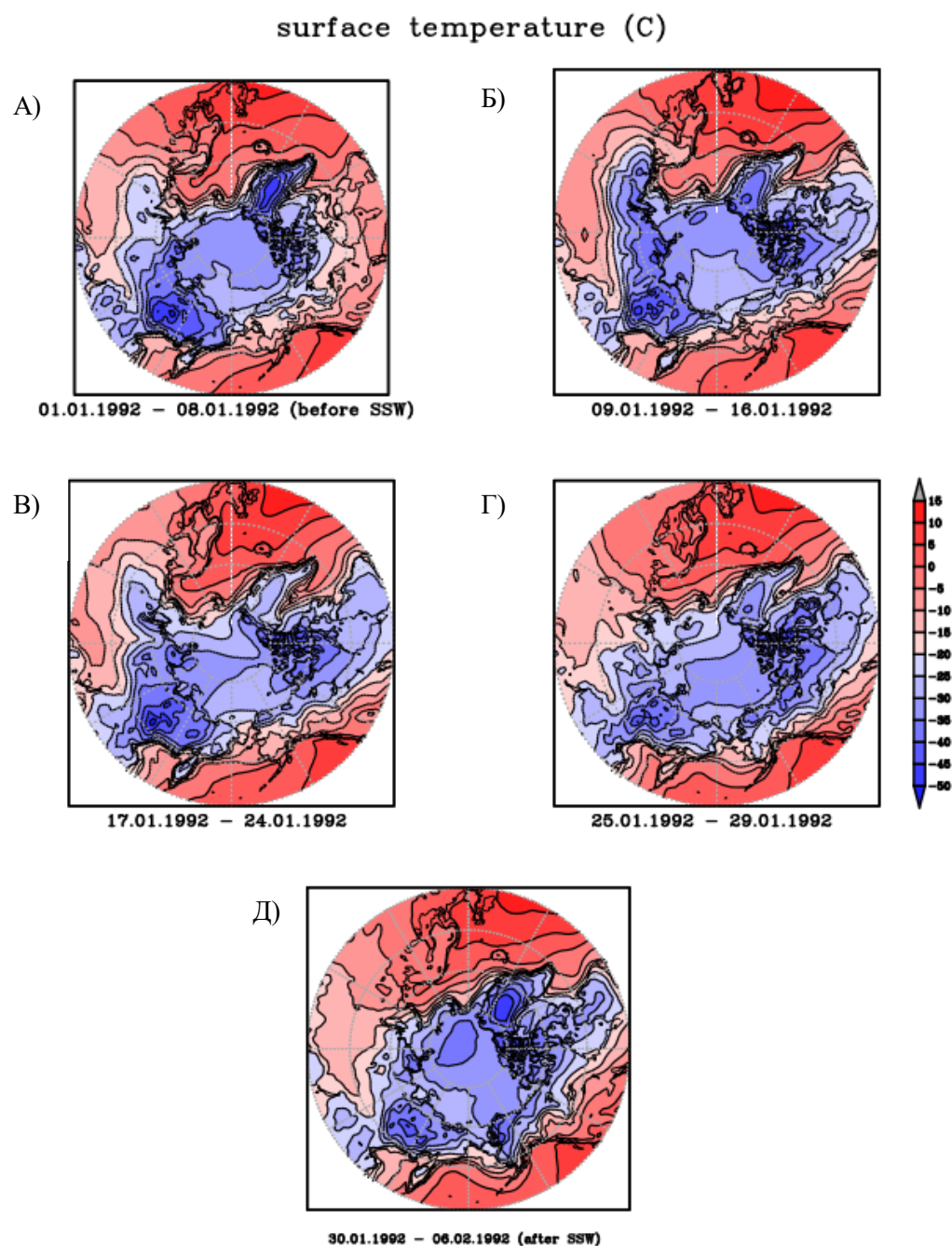


Рис. 10. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
а) неделя до ВСП 1992 года б), в), г) последовательно три недели во время ВСП
д) неделя после ВСП по данным реанализа ERA INTERIM

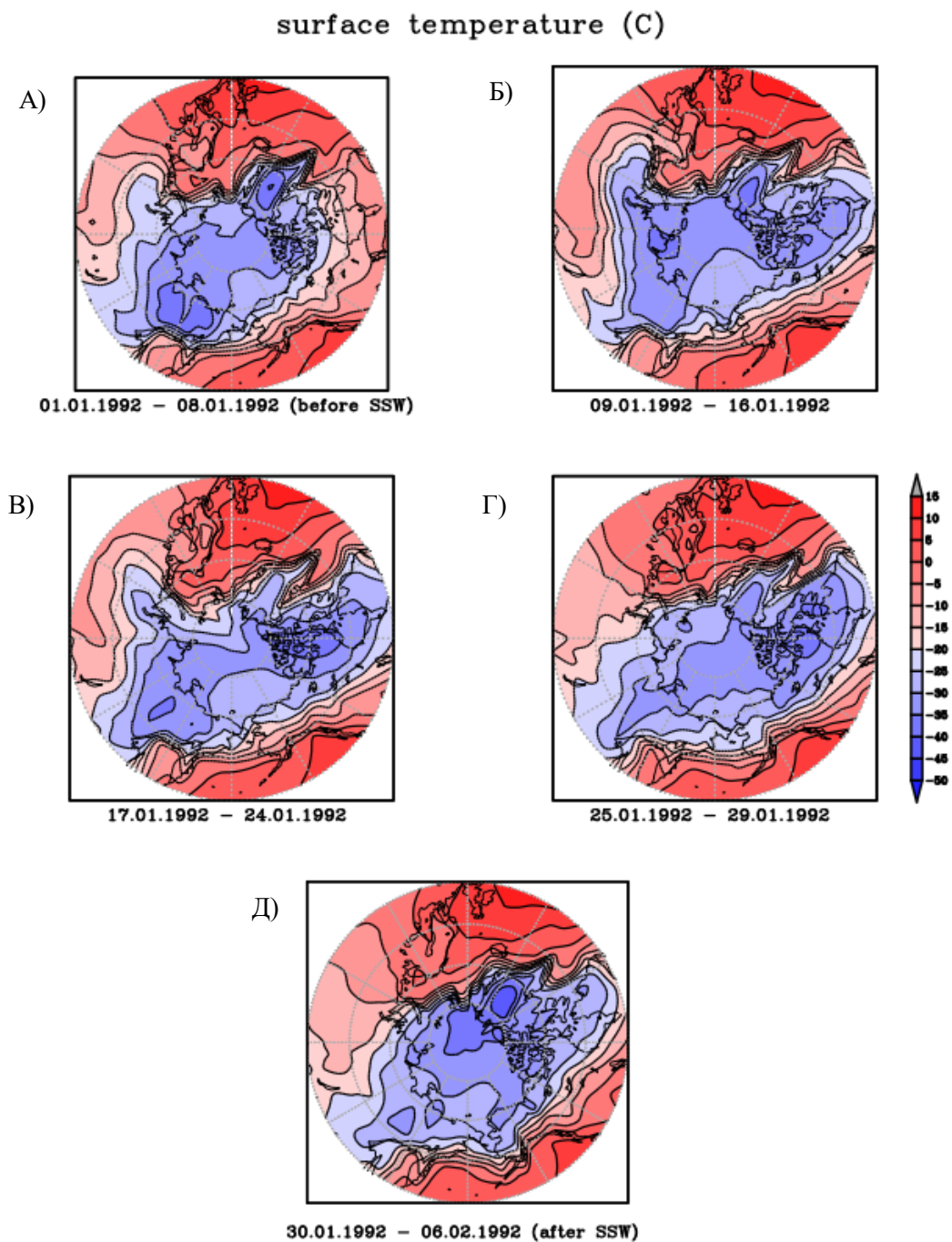


Рис. 11. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
 а) неделя до ВСП 1992 года б), в), г) последовательно три недели во время ВСП
 д) неделя после ВСП по данным реанализа JRA

Рассмотрим зиму 1998 – 1999 года, рисунки 12 и 13. Так как вытянутый циркумполярный вихрь смещался в сторону Гренландии/севера Канады и Скандинавии, мы предполагаем, что волна холода пойдет в том же направлении. Так

оно и происходит. На обоих реанализах видно распространение холода на Канаду и по северным областям России в сторону Скандинавии.

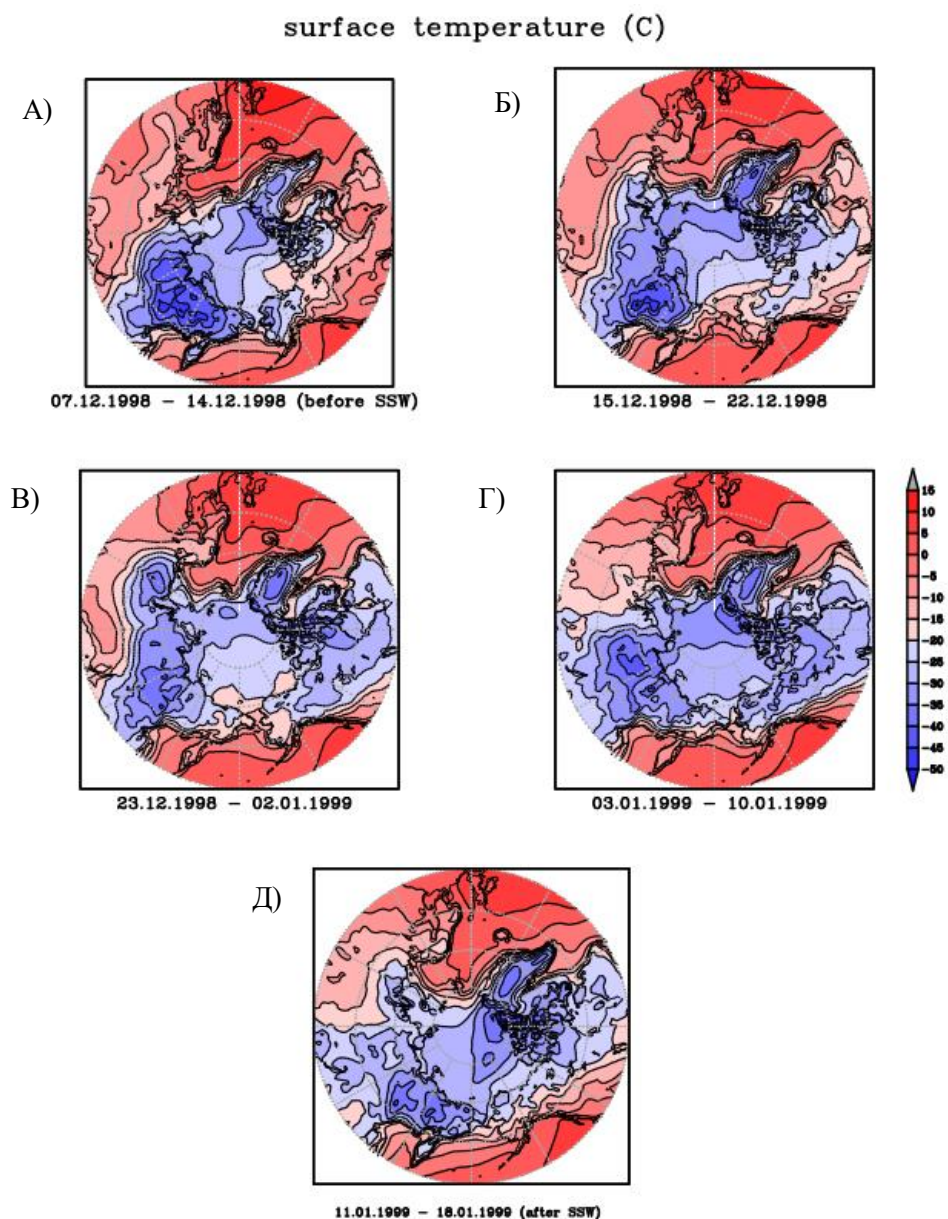


Рис. 12. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия а) неделя до ВСП 1999 года б), в), г) последовательно три недели во время ВСП д) неделя после ВСП по данным реанализа ERA INTERIM

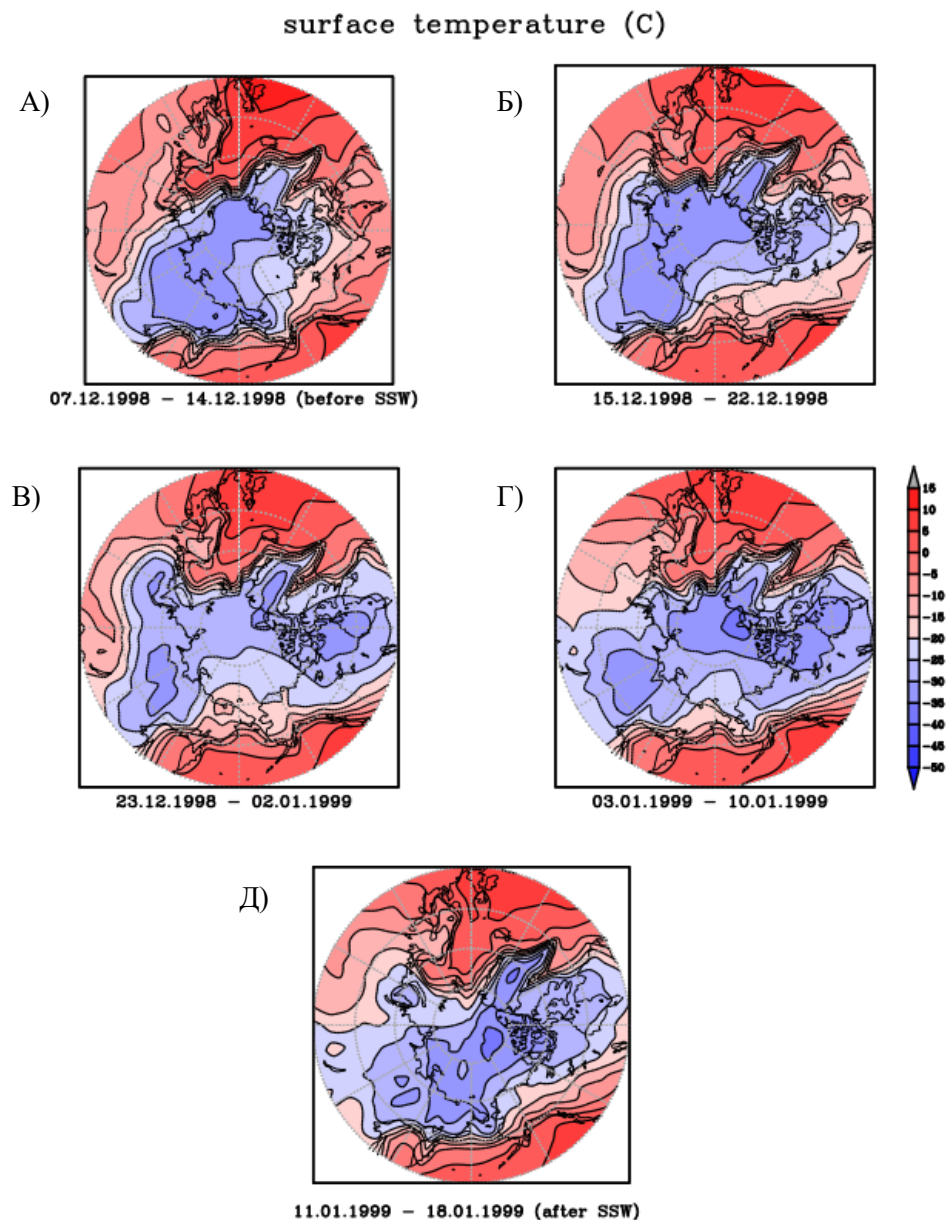


Рис. 13. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
 а) неделя до ВСП 1999 года б), в), г) последовательно три недели во время ВСП
 д) неделя после ВСП по данным реанализа JRA

Зима 2009 года представлена на рисунках 14 и 15. Как мы уже знаем это зима с наиболее сильной зональной аномалией температуры, и расщеплением циркумполярного вихря. Волна холода также, как и в предыдущих двух случаях распространяется вдоль северных регионов России и вглубь Канады. В момент захода гребня антициклона к полюсу, это первая неделя ВСП, вместе с ним к полюсу идет заток тепла со стороны Чукотского моря.

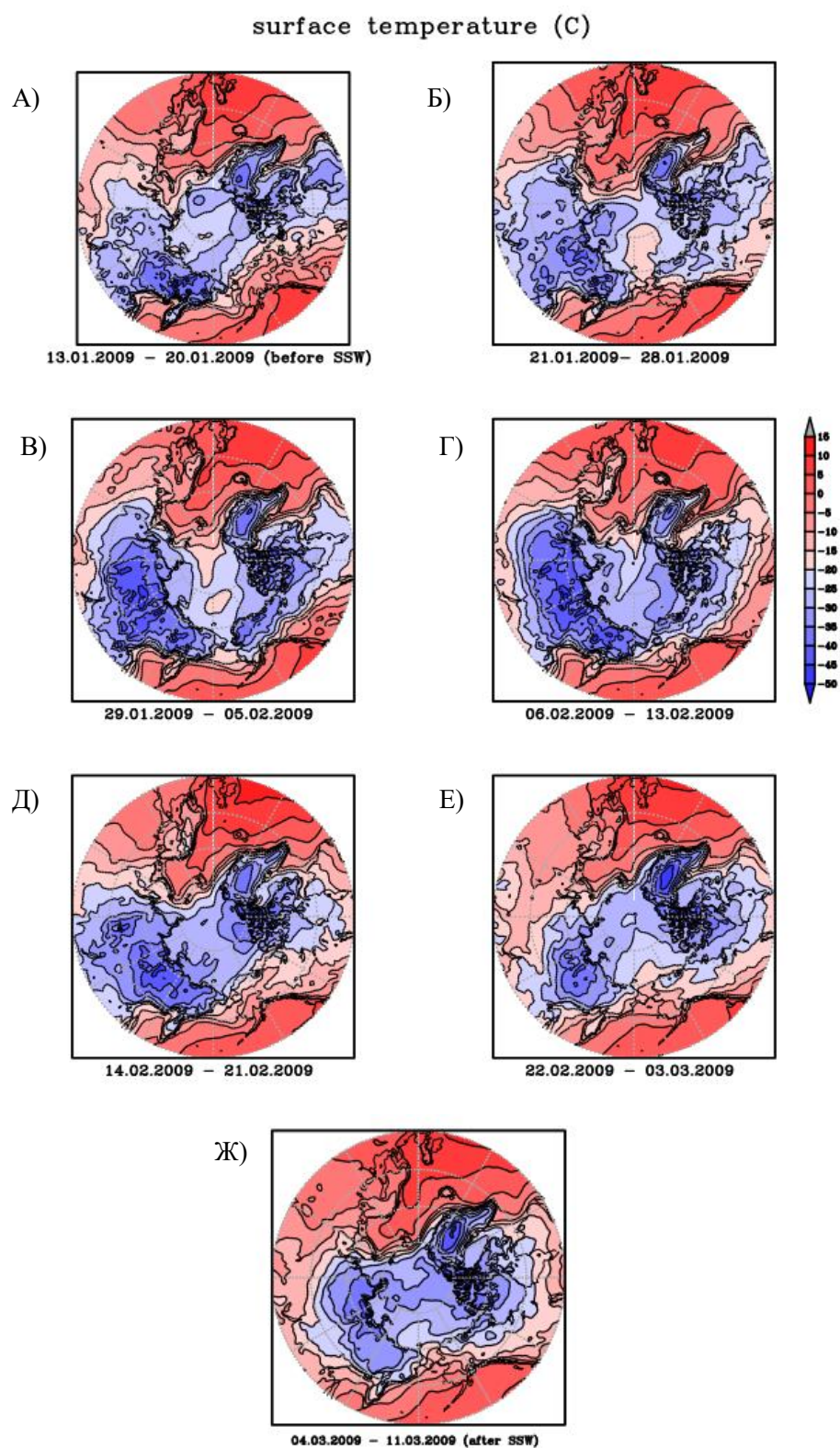


Рис. 14. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
 а) неделя до ВСП 2009 года б), в), г), д), е) последовательно пять недель во время ВСП
 ж) неделя после ВСП по данным реанализа ERA INTERIM

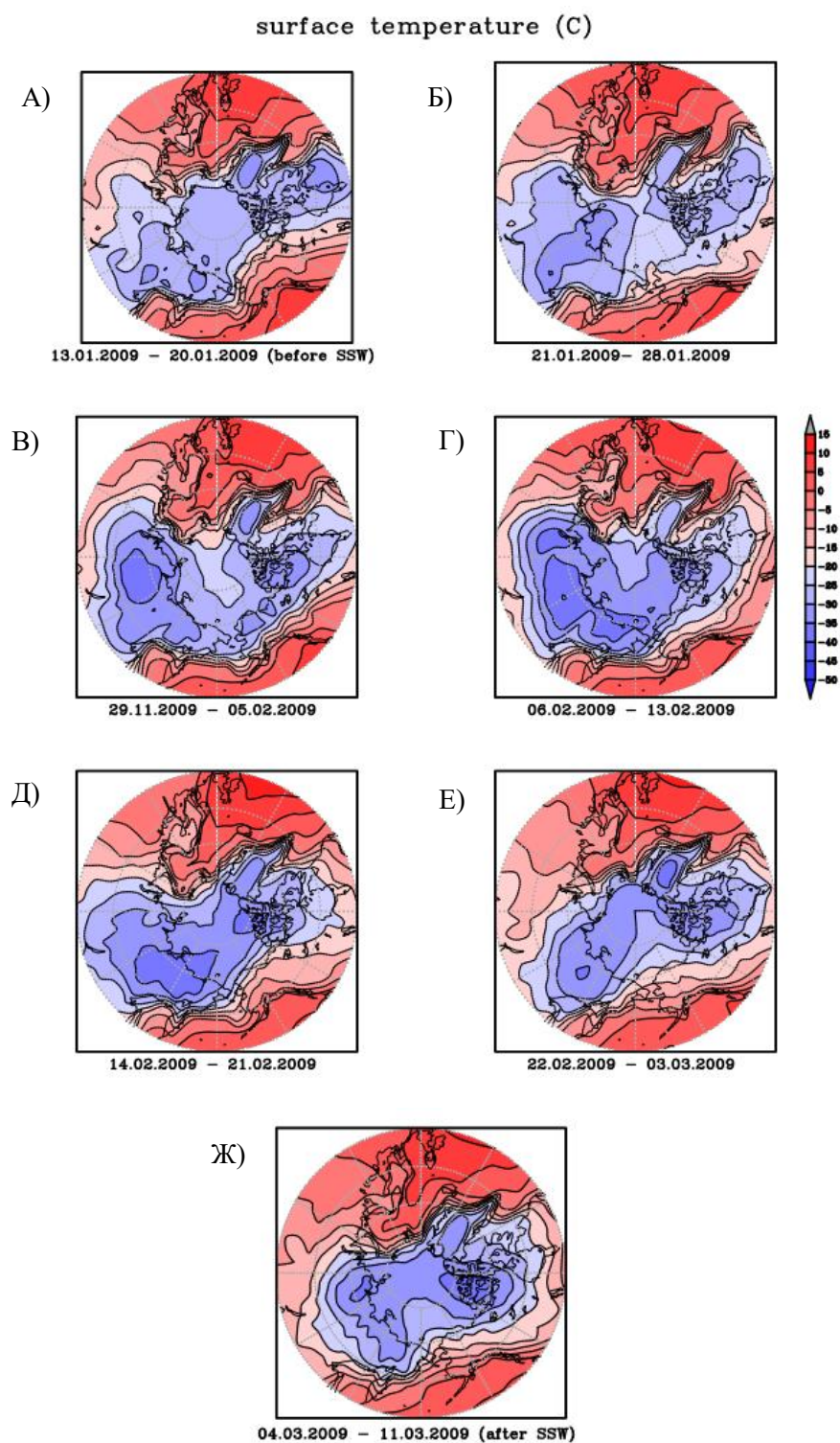


Рис. 15. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
 а) неделя до ВСП 2009 года б), в), г), д), е) последовательно пять недель во время ВСП
 ж) неделя после ВСП по данным реанализа JRA

Несмотря на относительно несильную деформацию вихря в 2012 году, холодные массы имели значительное распространение вглубь Евразии и не

такое значительное, но тем не менее заметное в Северную Америку. К концу ВСП волна холода достигает Скандинавии.

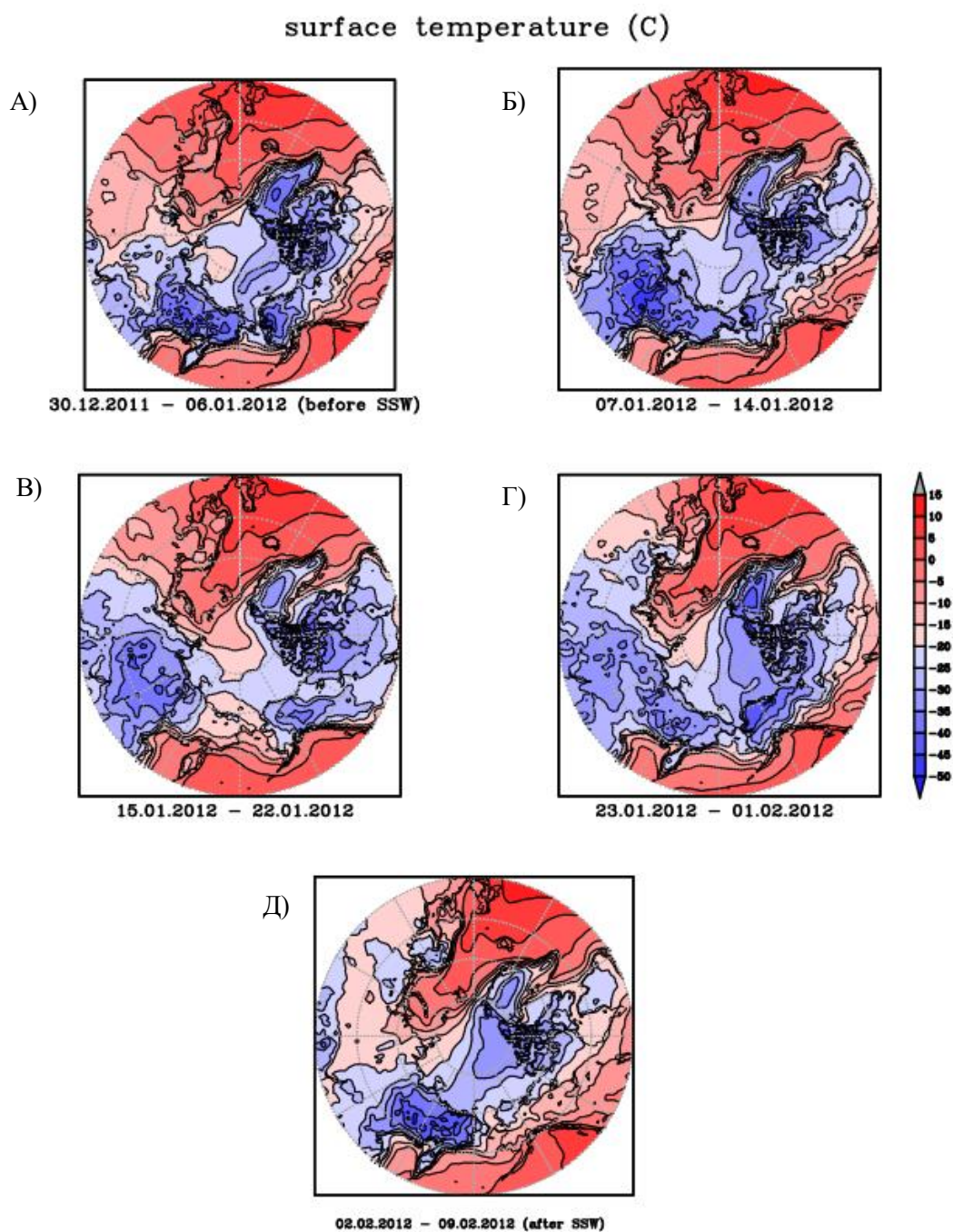


Рис. 16. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
а) неделя до ВСП 2012 года б), в), г) последовательно три недели во время ВСП
д) неделя после ВСП по данным реанализа ERA INTERIM

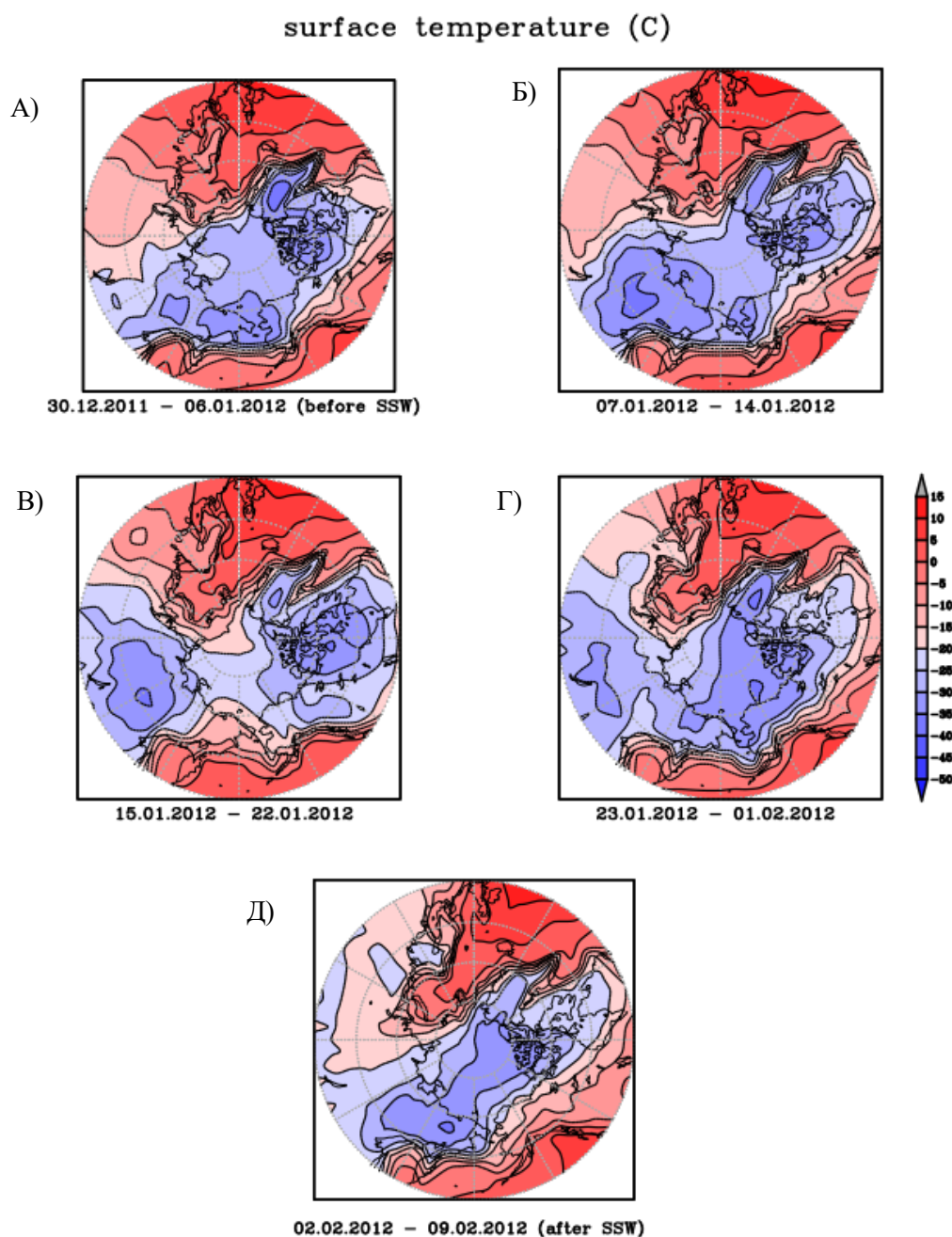


Рис. 17. Осредненное значение температуры воздуха на высоте 2 м в градусах Цельсия
а) неделя до ВСП 2012 года б), в), г) последовательно три недели во время ВСП
д) неделя после ВСП по данным реанализа JRA

Если обобщить полученные результаты получается, что заток холодных масс чаще всего происходит вдоль северных районов материка Евразия в сторону Скандинавии и Северную Америку, а точнее Канаду. Оба реанализа, ERA INTERIM и JRA, демонстрируют распространение холодных воздушных масс в одни и те же области. Отличие заключается в минимальных значениях.

Если локальные минимумы у ERA INTERIM составляют -50°C , то у JRA в той же точке будет в среднем на 10° меньше, -40°C .

Графики приземного хода температуры воздуха и атмосферного давления представлены только по наиболее отличительным станциям ниже.

Зима 1991 -1992 года представлена на рисунке 18. Полярный вихрь в тот год располагался над Атлантикой, между Скандинавией и Гренландией. При его ослаблении мы видим повышение температуры в Тикси. А вот над станциями Юрика, Резольют и Алерт вихрь, хоть и ослабевший оставался все время, и температура как была низкая, так и осталась.

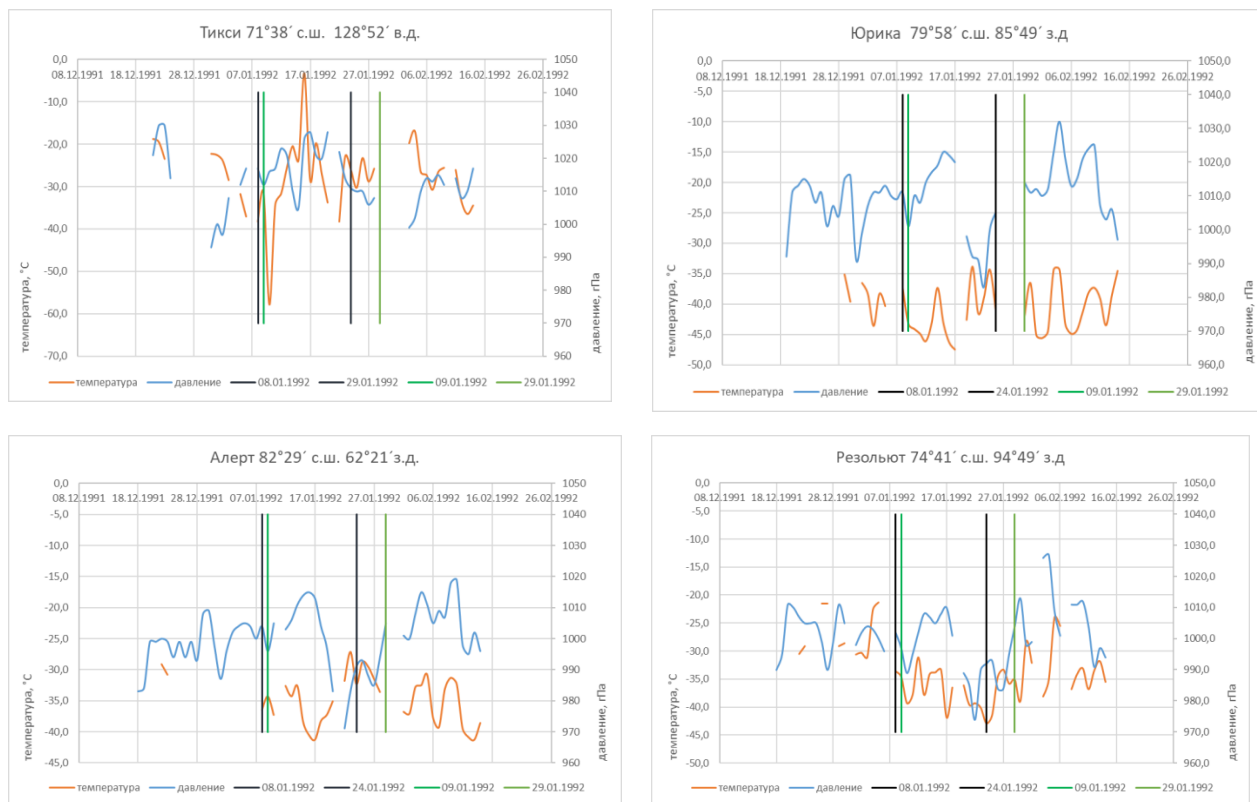


Рис.18. Приземный ход температуры воздуха в $^{\circ}\text{C}$ и давления в гПа в период с 18.12.1991 по 14.02.1992

Резкое повышение температуры на станциях Инувик и Берроу в зиму 1998 – 1999 годов, рисунок 19 происходит в момент достижения максимальных значений аномалии. И как раз в районе этих станций в это время произошло вытягивание гребня высокого давления к полюсу. Давление на этих станциях

повышено весь период ВСП. На станциях Алерт и Данмарксхавн ход температуры и давления ровный, хотя, судя по изменению геопотенциальной высоты, гребень дошел и до них и должно было произойти повышение температуры. Давление в свою очередь показывает нам появление данного гребня в этой области. Возможно повышение было кратковременным и не повлияло на температуру, так как уже на второй недели ВСП вихрь вновь вытягивается в область Гренландии.

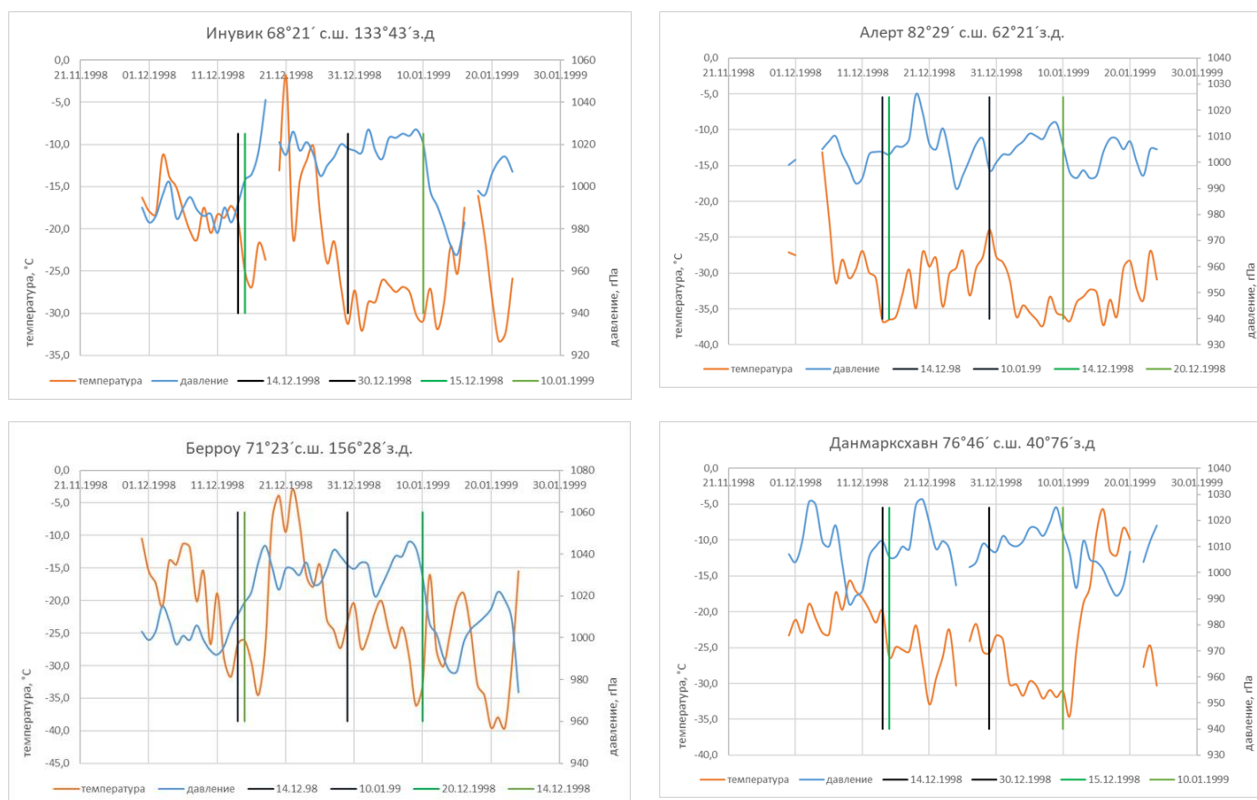


Рис.19. Приземный ход температуры воздуха в °С и давления в гПа в период с 30.11.1998 по 24.01.1999

Рисунок 20 иллюстрирует изменение приземного хода давления и температуры зимой 2009 года. Как уже было отмечено ранее вихрь расщепился и два его ядра сместились, один на материк за Новую Землю, второй через Гренландию, вглубь Северной Америки. Станции Тикси и Диксон находясь под влиянием первого ядра полярного вихря показывают понижение температуры. Станции Алерт и Юрика имеющие заведомо низкие температуры не реагируют

на смещение в их сторону второго ядра циклона. Резкий скачек температуры в двадцатых числах февраля на станции Диксон, может быть «запоздавшей» реакцией на антициклон.



Рис.20. Приземный ход температуры воздуха в °С и давления в гПа в период с 06.01.2009 по 17.03.2009

Рисунок 21, соответствует зиме 2011 – 2012 года. Резкий скачек температуры на станциях Черский и Берроу происходит в момент приближения высокого давления со стороны Аляски, давление на станции Берроу заметно растет в тот же период.

Волна холода на станциях Кандалакша и Инувик ожидаема, так как смещение циклона было именно в ту область. Рост давления совпадает с моментом падения температуры. Очевидно, в большинстве случаев происходит запаздывание реакции температуры на изменение давления.

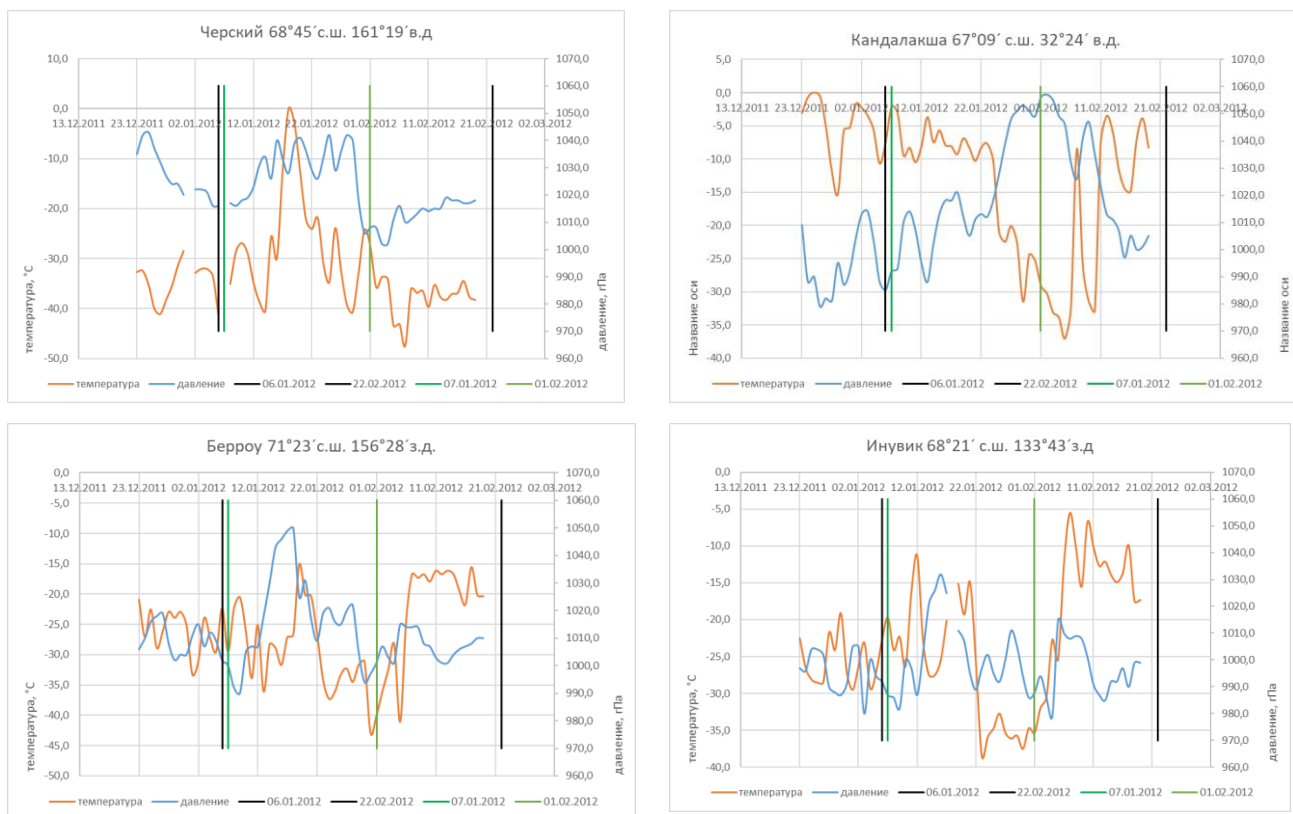


Рис.21. Приземный ход температуры воздуха в °С и давления в гПа в период с 23.12.2011 по 19.02.2012

Однозначно можно сказать, что не все станции реагируют на изменение происходящие в стратосфере. В данной работе были взяты прибрежные станции, на которые кроме всего прочего идет сильное воздействие океана. Но несмотря на это можно проследить закономерность: холодная масса воздуха смещается вместе со смещением циркумполярного вихря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа аномалий, происходящих на высотах стратосферы, изменения геопотенциальной высоты и изменений в приземной термической обстановке были сделаны следующие выводы:

1. Приземная волна холода связана с изменением циркуляции циркумполярного вихря. Район, в который идет его вытягивание или смещение, наиболее вероятно будет подвержен понижению температуры. Анализ 8 случаев внезапных стратосферных потеплений привел к следующим результатам:

2. Зимой 1983 - 1984 и 2008 - 2009 года ВСП приводит к расщеплению вихря. Оба раза ядра вихря смещались в сторону Новой Земли и Севера Канады. В остальные зимы происходило вытягивание с последующим смещением вихря.

3. В половине случаев смещение полярного вихря происходит в сторону Скандинавии, а в половине в сторону Гренландии.

4. Приземная волна холода начинает проявляться с первой недели ВСП. Она распространяется на Кольский полуостров, в глубь материков Евразия и Северная Америка.

5. На станциях Гренландии таких как Алерт, Юрика и Данмарксхавн понижение приземной температуры или не происходит, или не существенно, так как вихрь над ними находится еще до ВСП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomas Birner, et al. Sudden Stratospheric Warmings P. Baldwin, Blanca Ayarzagüena // Neal Butchart, Amy H. Butler, Andrew J. Charlton-Perez, Daniela I. V. Domeisen, Chaim I. Garfinkel, Hella Garny, Edwin P. Gerber, Michaela I. Hegglin, Ulrike Langematz, Nicholas M. Pedatella, 2020.
2. Butler and Gerber, Optimizing the Definition of a Sudden Stratospheric Warming, 2018.
3. Реакция тропосферной циркуляции на внезапное стратосферное потепление, наблюдаемое в январе 2013 г. А.И. Погорельцев, О.Г. Анискина, А.Ю. Канухина, Т.С. Ермакова, А.И. Угрюмов, Ю.В. Ефимова
4. David W. J. Thompson, et al. Stratospheric Connection to Northern Hemisphere Wintertime Weather: Implications for Prediction // Mark P. Baldwin, and John M. Wallace Van Loon et al., 1973.
5. Andrew J. Charlton A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks, 2007.
6. Labitzke Stratospheric-mesospheric midwinter disturbances: A summary of observed characteristics, 1981.
7. Amy H. Butler A sudden stratospheric warming compendium 2017;
8. Logan Mitchell, et al. Supplementary Materials for Constraints on the Late Holocene Anthropogenic Contribution to the Atmospheric Methane // Budget, Ed Brook, James E. Lee, Christo Buizert, Todd Sowers, 2013.
9. Балдуин и Томпсон, 2009; Гербер и др., 2010.
10. Scherhag, R. (1952), Die explosionsartige Stratosphärener warmung des Spätwinters 1951/52, Ber. Dtsch. Wetterdienstes, 66, 51–63
11. И.В. Латышева, К.А. Лощенко, Е.В. Шахаева, Циркуляционные условия внезапных стратосферных потеплений в Северном полушарии в 21 веке, Наука о Земле, 2013г, Т.6, №1 с.106-121

12. В.В. Зуев, Н.Е. Зуева, В.Ю. Агеева, Е.С. Савельева, Особенности перестройки циркуляции стратосферы вследствие внезапного стратосферного потепления в январе 2009г, «Оптика атмосферы и океана», 2017г, том 30
13. Charlton Perez A., et al. On the lack of stratospheric dynamical variability in lowtop versions of the CMIP5 models // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 2494–2505.
14. Ravindra P. Singh, Duggirala Pallamraju On the latitudinal distribution of mesospheric temperatures during sudden stratospheric warming events, 2015.
15. Kakoti, G., Kalita, B. R., Bhuyan, P. K., Baruah, S., and Wang, K.: Longitudinal and interhemispheric ionospheric response to 2009 and 2013 SSW events in the African-European and Indian-East Asian sectors, J.Geophys. Res.-Space, 2020.
16. Dhaka, S. K., Kumar, V., Choudhary, R. K., Ho, S. P., Takahashi, M., and Yoden, S.: Indications of a strong dynamical coupling between the polar and tropical regions during the sudden stratospheric warming event January 2009, based on COSMIC/FORMASAT3 satellite temperature data, Atmos. Res., 166, 2015
17. Holt, L. A., Randall, C. E., Peck, E. D., Marsh, D. R., Smith, A. K., and Harvey, V. L.: The influence of major sudden stratospheric warming and elevated stratopause events on the effects of energetic particle precipitation in WACCM, J. Geophys. Res.-Atmos., 118, 2013.
18. Körnich, H., and E. Becker A simple model for the interhemispheric coupling of the middle atmosphere. *Adv. Space Res.*, 45, 661–668, 2010
19. Karlsson, B., C. McLandress, and T. G. Shepherd Inter-hemispheric mesospheric coupling in a comprehensive middle atmosphere model. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 71, 2009
20. Pedatella, N. M., Chau, J. L., Schmidt, H., Goncharenko, L. P., Stolle, C., Hocke, K., Harvey, V. L., Funke, B., Siddiqui, T. How sudden

- stratospheric warming affects the whole atmosphere. - Eos, Earth and Space Science News, 99, 2018
21. Kolstad E., Breiteig T., Scaife A. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2010. V. 136. P. 886–893.
 22. Ropelewski C.F., Jones P.D. An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index // Mon. Wea. Rev. –1987. – Vol. 115. – P. 2161–2165.
 23. Kidston et al., Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather // Adam A. Scaife, Daniel M Mitchell, Steven C. Hardiman, 2015.
 24. Reichler, T., J. Kim, E. Manzini, and J. Kroger, A stratospheric connection to Atlantic climate variability, Nat. Geosci.,5, 783–787, 2012
 25. Hu, J., Ren, R., and Xu, H.: Occurrence of winter stratospheric sudden warming events and the seasonal timing of spring stratospheric final warming, J. Atmos. Sci.,71, 2015
 26. Noguchi, S., Kuroda, Y., Mukougawa, H., Mizuta, R., and Kobayashi, C.: Impact of satellite observations on forecasting sudden stratospheric warmings, Geophys. Res. Lett., 47, 2020
 27. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi¹, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara¹, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan¹,R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Radnoti, G., De Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut. J.-N.: The ERA5 global reanalysis, Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 146, 1999–2049, 2020.
 28. Singh, R. P. and Pallamraju, D.: On the latitudinal distribution of mesospheric temperatures during sudden stratospheric warming events, J.Geophys. Res.-Space, 120, 2926–2939, 2015

29. П.Н. Варгин, Е.М. Володин, А.Ю. Карпечко, А.И. Погорельцев, О стратосферно тропосферных взаимодействиях, Вестник Российской Академии наук, 2015, том 85, № 1, с. 39–46
30. Сидоренков Н.С. Методика подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата
31. Thompson, D. W. J., & Wallace, J. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, 13(5), 1000–1016.
32. Ronald Gelaro, Will McCarty, Max J. Suárez , Ricardo Todling, Andrea Molod, Lawrence Takacs , Cynthia A. Randles , Anton Darmenov, Michael G. Bosilovich, Rolf Reichle, Krzysztof Wargan, Lawrence Coy , Richard Cullather , Clara Draper , Santha Akella , Virginie Buchard , Austin Conaty , Arlindo M. da Silva, Wei Gu , Gi-Kong Kim, Randal Koster, Robert Lucchesi , Dagmar Merkova , Jon Eric Nielsen , Gary Partyka , Steven Pawson, William Putman, Michele Rienecker, Siegfried D. Schubert , Meta Sienkiewicz, Bin Zhao, The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *Journal of Climate*, 70, 2017, с. 5419–5454
33. Kazutoshi Onogi, Junichi Tsutsui, Hiroshi Koide, Masami Sakamoto, The JRA-25 reanalysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 85, 2007, с. 369-432.
34. <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>