



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

Кафедра метеорологических прогнозов

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему: «Особенности синоптической ситуации в полярном регионе РФ во  
время продолжительного ВСП»

Исполнитель Дутка Алена Александровна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук  
(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)

«14» июня 2021 г.

Санкт-Петербург  
2021

Оглавление	
Обозначения и сокращения.....	3
Введение.....	4
1. Внезапные стратосферные потепления. ....	6
1.1 Классификация ВСП. ....	7
1.2 Механизм возникновения ВСП.....	8
1.3 Внешние воздействия на ВСП. ....	10
1.4 Развитие динамических теорий.....	11
1.5 Динамические теории влияния нисходящих потоков .....	13
1.6 Влияние на погоду и климат .....	14
1.7 Возможности прогнозирования .....	16
2. Использованные данные. ....	19
2.1 Реанализ MERRA-2. ....	20
2.2 Программа «Синоптик-Долгосрочник». ....	23
3. Результаты. ....	29
3.1 Давление .....	41
3.2 Температура. ....	56
3.3 Осадки.....	64
Заключение. ....	72
Список используемой литературы. ....	74

Обозначения и сокращения.

ВСП	Внезапные стратосферные потепления
КДК	Квазидвухлетние колебание
ОМД	Осцилляция Мэддена-Джулиана
САК	Североатлантическое колебание
СКМ	Северная кольцевая мода
ФГБУ	Федеральное государственное бюджетное учреждение
«АНИИ»	«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»
ЭНЮК	Эль-Ниньо Южное колебание
ЮКМ	Южная кольцевая мода
ECMWF	Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды
EOS	программа системы наблюдения Земли
GEOS-1	Годдардовской системы наблюдения за Землёй версия 1
GMAO	бюро глобального моделирования и ассимиляции
GPS	Спутниковые навигационные системы
IESA	Система интегрированного анализа Земли
JMA	Метеорологическое агентство Японии
MERRA	Ретроспективный анализ для исследований и приложений версии
MERRA-2	Ретроспективный анализ для исследований и приложений версии 2
NCAR	Национальный центр атмосферных исследований
NCEP	Национальный Центр экологического прогнозирования
NOAA	Национальное управление океанических и атмосферных исследований
SOI	индекс Южного колебания

Введение.

В последние десятилетия, в связи с интенсивным развитием наземных и аэрокосмических систем наблюдения, было накоплено огромное количество данных измерений, касающихся состава газа, термических и динамических характеристик стратосферы.

Одним из наиболее заметных процессов, в котором проявляется динамическое взаимодействие верхних слоев атмосферы, стратосферы и тропосферы являются события внезапных стратосферных потеплений (ВСП). ВСП описывается как внезапное и сильное повышение температуры в полярной и субполярной стратосфере зимой, иногда на  $50^{\circ}$  и более, которое продолжается в течение нескольких дней или недель. Наблюдения показывают, что потепления начинаются на больших высотах, а затем спускаются в нижнюю стратосферу и тропосферу.

Актуальность данной работы заключается в изучении ВСП с целью более точного прогнозирования погоды в тропосфере. Длительное ВСП наблюдается больше 2-х недель, следовательно, возможно воздействие на тропосферу, так как продолжительные ВСП часто «спускаются» до высоты 10 км, на границу между тропосферой и стратосферой, следовательно, полученные данные могут уточнить краткосрочные и долгосрочные прогнозы погоды.

Целью данной работы является изучение особенностей синоптической ситуации в полярном регионе РФ во время продолжительного ВСП.

Были поставлены следующие задачи для достижения и решения этой цели:

- Анализ синоптических данных для средних и высоких широт РФ во время продолжительных ВСП;

-Сравнительный анализ карт давления, температуру и осадков за периоды наблюдений с продолжительными ВСП, не продолжительными ВСП и в месяцы без ВСП;

-Изучения синоптических изменений, вызванных продолжительными ВСП.

Дипломная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Первая глава содержит основные теоретические сведения о явлении ВСП, о механизмах и причинах его возникновения. Во второй главе приведены основные методы и программы, которые были использованы для получения архивных карт синоптической ситуации в полярных регионах РФ. В третьей главе представлены результаты исследования и анализ полученных результатов. В заключении представлены основные выводы, основанные на полученных результатах и их анализе. Список использованных источников включает 23 наименования.

## 1. Внезапные стратосферные потепления.

Самым ярким примером динамической взаимосвязи тропосферы и стратосферы являются внезапные стратосферные потепления (ВСП), сопровождающиеся стремительным повышением температуры полярной стратосферы (в некоторых случаях до 50 градусов за несколько дней). Возникновение ВСП связано с распространением планетарных волн из тропосферы в стратосферу и дальнейшим их взаимодействием с зональной циркуляцией. Однако нерегулярные колебания температуры, волновой активности и зонального ветра в верхней стратосфере так же могут способствовать появлению ВСП. Наиболее сильные ВСП, возникающие в среднем каждую вторую зиму, приводят к изменению направления зонального ветра и увеличению температуры в средней стратосфере (на уровне давления 10 гПа или ~32 км) с широтой к северу от 60° с.ш., то есть к формированию аномального меридионального градиента температуры. Именно от возникновения ВСП зависит, насколько активным и изолированным будет стратосферный полярный вихрь в целом за зимний сезон, а это, в свою очередь, определяет, насколько сильным будет разрушение озона в полярной стратосфере [1].

Следует отметить, что из-за больших контрастов в распределении суши и океана, планетная волновая активность зимой более выражена в Северном полушарии. Это объясняет тот факт, что ВСП отмечают в Южном полушарии в единичном количестве случаев, а в Северном полушарии это явление наблюдается почти каждую зиму.

В года с хорошо выраженными ВСП стратосферный полярный вихрь ослабляется, смещается от полюса или в некоторых случаях разделяется на две части. При этом повышенная температура полярной стратосферы, а иногда и изменившийся своё направление с западного на восточный зональный

ветер могут сохраняться до наступления весенней перестройки циркуляции стратосферы.

## 1.1 Классификация ВСП.

В первые десятилетия после открытия ВСП ВМО разработала международную программу мониторинга под названием STRATALERT, возглавляемую Карин Лабицке из Свободного университета Берлина, для обнаружения ВСП. Ранние показатели для измерения этих событий основывались на изменениях температуры, поскольку внезапное и быстрое потепление стратосферы было ключевыми характеристиками, которые можно было измерить с помощью радиозондов и ракетных зондов.

В 1964 году было установлено, что для отделения «основных» ВСП от второстепенных событий, требуется измерение изменения направления (с запада на восток) зональных ветров и увеличение средней зональной температуры.

Явление ВСП непосредственно сопряжено с разрушением полярного вихря. В основном сильные ВСП возникают, когда зимние полярные западные стратосферные ветра переходят в восточные. При небольших потеплениях полярный градиент температуры меняется на обратный, а циркуляция нет.

Согласно классификации ВМО потепления делятся на:

Мажорные (сильные)

Определяющим признаком мажорного ВСП считается изменение направления среднезонального ветра на 60°с.ш. и на высоте 10 гПа с западного на восточный в зимний период (с ноября по март).

Наблюдается полное разрушение полярного вихря, либо его расщепление, или его смещение от своего нормального положения над полюсом.

#### Минорные (слабые)

Событие ВСП считается слабым, если в любой области стратосферы произошло повышение температуры на  $25^{\circ}\text{K}$  и более на период времени до семи дней. В таком случае, разрушение полярного вихря никогда не наблюдается.

#### Финальные

Финальный цикл ВСП в стратосфере характеризуется окончательным разрушением зимнего полярного стратосферного вихря с обращением зональной циркуляции с восточной на западную.

#### Канадские

Канадские потепления происходят в начале зимы в стратосфере Северного полушария, обычно, с середины ноября до начала декабря, не имеют аналогов в Южном полушарии. При проведении исследовательской деятельности данный вид ВСП не использовался, так исследования проводились в период с декабря по март [3].

Условно, можно выделить еще один вид потепления–продолжительные. Они характеризуются изменением направления среднезонального ветра с западного на восточный в зимний период (с ноября по март). Повышение температуры на  $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$  и продолжительностью около месяца. Именно с продолжительными ВСП и связано данное исследование.

## 1.2 Механизм возникновения ВСП

Первое доказательство наличия ВСП в атмосфере приходится на пятидесятые годы двадцатого века, во время использования шаропилотных приборов, называемых радиозондами, которые показали, что в Северном полушарии в зимнее время года температура в стратосфере периодически подвергается быстрому росту [4]. Такие периоды могли продолжаться несколько дней, а затем следовало снижение до обычных климатических значений в течение следующих 1-3 недель.

После проведения исследований было выяснено что, несмотря на свое название, ВСП на самом деле начинаются в тропосфере.

Предполагается, что формирование ВСП происходит из-за динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы, которое можно проследить до высоты около 30–45 км. В 1971 г. Т. Мацумо предположил, что образование ВСП можно проследить до взаимодействия планетарных волн (зональные волновые числа  $m = 1, 2$ ) со средним потоком[5]. Если амплитуда проникающей в стратосферу планетарной волны достаточно велика, это может привести к полному торможению западного переноса и перестройке направления на восточное. Работа Мацумо не утратило актуальности и по сей день.

В дальнейшем механизм взаимодействия волн со средним потоком, предложенный Мацумо, был дополнен анализом синоптических данных, который позволил в общих чертах определить фазы развития ВСП.

В начальной фазе, предшествующей ВСП, в тропосфере устанавливается блокирующий циркуляционный процесс, который приводит к формированию меридионального переноса воздушных масс, и, как следствие, увеличению амплитуды планетарной волны. Распространение волны вверх приводит к образованию в стратосфере антициклонального вихря с нисходящими движениями в центре, что является источником адиабатического нагрева и непосредственной причиной стратосферного потепления.

Через несколько дней после начала ВСП в тропосфере усиливается антициклогенез, что указывает на наличие динамической связи между страто-сферной и тропосферной циркуляцией в этот период. Предполагают, что распространение «сигнала» из тропосферы в стратосферу происходит довольно быстро (~3–10 суток), тогда как в стратосфере аномальный «сигнал» сохраняется намного дольше (~15–40 суток) [6].

### 1.3 Внешние воздействия на ВСП.

Поскольку в период с 1958 по 2019 год было зарегистрировано всего около 40 ВСП, сложно количественно оценить и установить статистически устойчивые изменения частоты ВСП от внешних воздействий, особенно если наблюдения показывают незначительный эффект. Несмотря на эту трудность, с ВСП связан ряд внешних воздействий, включая Квазидвухлетнее колебание (КДК), ЭНЮК, 11-летний солнечный цикл, осциляция Мэддена-Джулиана (ОМД) и снежный покров. Уверенность в надежности таких отношений повышается, если существует хорошо описанный физический механизм, который, как ожидается, вызовет наблюдаемый эффект, например, через изменения в распространении и разрушении волн Россби в стратосфере или генерации планетарных волн Россби в тропосфере. Точно так же подтверждение наблюдаемых взаимосвязей в исследованиях моделирования также повышает уверенность в их надежности. Еще более сложной задачей является установление взаимосвязей в наблюдениях, при которой два или более внешних воздействия действуют согласованно.

В течение 40 лет было признано, что стратосферный полярный вихрь слабее в зиму во время восточной фазы КДК, чем во время западной фазы КДК. Возникновение ВСП более вероятно во время восточной фазы КДК,

чем во время западной фазы КДК. Следовательно, события ВСП происходят реже во время западной фазы КДК.

Было предложено по крайней мере четыре различных механизма, связывающих КДК с изменчивостью вихрей, и относительная важность этих механизмов до сих пор не ясна [7].

Вероятность ВСП увеличивается как в годы с Эль-Ниньо, так и в Ла-Ниньо по сравнению с нейтральной фазой ЭНЮК.

Солнечный цикл может влиять на стратосферный полярный вихрь, ВСП в середине зимы имеют тенденцию происходить во время восточной фазы солнечного минимума КДК (то есть классического эффекта Холтона-Тана) и во время солнечного максимума и западной фазы КДК. Одних наблюдений недостаточно, чтобы убедиться, что связь является устойчивой.

Также было доказано, что ОМД влияет на время событий ВСП: из 23 событий, рассмотренных в 2017 году, и двух событий, произошедших с тех пор, более чем половине (13 из 25) предшествовали фазы ОМД с усиленной конвекцией в тропиках западной части Тихого океана [7].

#### 1.4 Развитие динамических теорий

ВСП являются проявлением сильного двустороннего взаимодействия между восходящими планетарными волнами и средним стратосферным потоком. Полярный вихрь может быть разрушен крупными волновыми возмущениями, в первую очередь квазистационарными волнами с зональными волновыми числами 1 и 2 планетарного масштаба. Сильное волновое воздействие на средний поток этими волнами может привести к ВСП с разрушением полярного вихря и восточными ветрами, заменяющими западные ветры около 10 гПа, 60° с.ш. Когда ветры в полярном вихре замедляются, воздух вынужден двигаться к полюсу, чтобы сохранить

угловой момент, со снижением над полярной шапкой. Адиабатический нагрев, связанный с этим спуском, приводит к наблюдаемому быстрому увеличению температуры полярной шапки на временных масштабах всего в несколько дней.

Сильные западные ветры в полярном течение препятствуют распространению в стратосферу всех волн планетарного масштаба, кроме самых больших. Хотя волны планетарного масштаба могут спонтанно генерировать бароклийную нестабильностью или каскад масштабных волн синоптического масштаба, они в основном вызваны особенностями планетарного масштаба на поверхности: топографией и контрастом между сушей и морем.

Разнообразие наблюдаемых ВСП демонстрирует, что некоторые ВСП, по-видимому, вызваны аномальными всплесками активности планетарных волн из тропосферы, в то время как в других ВСП сама стратосфера регулирует распространение восходящих волн. Однако все теории согласны с тем, что именно устойчивое рассеяние волновой активности в стратосфере, главным образом за счет нелинейного обрушения волн и необратимого перемешивания (конвергенция потоков Элиассена-Пальма), вызывают глубокое и устойчивое нагревание полярного вихря. Как только вихрь разрушен, сильное радиационное охлаждение помогает восстановить вихрь, если есть время до конца зимы, но этот процесс, управляемый радиацией, может занять несколько недель. Вращение и стратификация связывают перенос тепла волнами к полюсу с переносом западного импульса вниз. Таким образом, потепление полярной стратосферы происходит одновременно с искоренением климатологического вихря при крупном потеплении.

## 1. 5 Динамические теории влияния нисходящих потоков

Есть несколько теоретических причин ожидать, что ВСП (и стратосферная изменчивость в целом) оказывают влияние на приземную погоду. Основные категории механизмов:

1. Непрямые 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. Опосредованные эффекты стратосферных аномалий полярного вихря [7].

Все эти события могут тем или иным образом влиять на тропосферные изменения во время ВСП. Если мы пытаемся объяснить аномалии приземного давления после ВСП, то очевидно, что основная наблюдаемая особенность состоит в том, что поверхностные эффекты примерно пропорциональны силе полярного вихря в нижней стратосфере (измеренная по температуре, ветру или индексу СКМ). В модельном исследовании [9,8] обнаружили устойчивую линейную связь между силой потепления в нижних слоях стратосферы и тропосферным откликом, причем линейность также распространяется на внезапные похолодания в стратосфере. Второе наблюдение заключается в том, что аномалии приземного давления наиболее велики вблизи Северного полюса [10]. Механизм, основанный на дивергенции потока, не может объяснить время отклика тропосферы, поскольку аномальная дивергенция потока меняет знак по мере развития ВСП. Поглощение и отражение планетных волн в первую очередь влияет на волновые поля тропосферы и, как правило, не пропорциональны аномальной силе стратосферного полярного вихря. Прямое воздействие на бароклинные вихри будет пропорционально аномальной силе стратосферного полярного вихря, но эффекты должны ощущаться в основном в средних широтах [11].

Отдаленные эффекты стратосферных аномалий полярного вихря в сочетании с механизмом усиления сигнала приземного давления могут объяснить основные наблюдаемые эффекты ВСП. Из исследований ясно, что вслед за ВСП тропосферные процессы перемещают массу в полярную шапку, повышая давление у поверхности Арктики. Нарращивание массы на низком уровне над полярной шапкой не может происходить из стратосферы, потому что аномалии приземного давления больше, чем наблюдаемые на любом стратосферном уровне.

Механизмы этого движения полностью не объяснены. Было обнаружено, что волны синоптического и планетарного масштаба вносят вклад в тропосферный отклик после событий ВСП. В недавних исследованиях было выдвинуто предположение о том, что низкоуровневые температурные аномалии полярной шапки ответственны за движение массы через механизм антициклогенеза, вызванного радиационным охлаждением. Если нижняя тропосфера Арктики охлаждается, воздушная масса сжимается и притягивает дополнительную массу из более низких широт, что, как и наблюдается, увеличивает среднее приземное давление над Арктикой.

## 1.6 Влияние на погоду и климат

В настоящее время признано, что эффекты ВСП-событий распространяются значительно выше стратосферы и могут значительно изменить химию и динамику мезосферы, термосферы и ионосферы. Таким образом, они являются важным компонентом краткосрочной изменчивости верхней атмосферы.

Воздействию ВСП на термосферу уделялось значительно меньше внимания по сравнению с ионосферой. Это в первую очередь связано с ограниченным количеством прямых наблюдений, а также с меньшим

воздействием ВСП на термосферу. Тем не менее, установлено, что изменения стратосферного полярного вихря, в том числе обусловленные ВСП, затрагивают тропосферу, где они могут на протяжении последующих двух месяцев оказывать влияние на погодные условия в средних и высоких широтах Северного полушария. Например, анализ метеорологических данных с 1958 по 2009 г. и расчётов климатических моделей показал, что при ослаблении стратосферного полярного вихря в ряде регионов (в том числе в Восточной Сибири) вероятность резких похолоданий увеличивается на 50% [2].

Часто в ходе ВСП в стратосфере происходит усиление одного антициклона. В результате деформируется форма полярного вихря, а его центр смещается от полюса. Другой основной тип ВСП характеризуется усилением двух антициклонов, из-за чего полярный вихрь вытягивается и в некоторых случаях может разделиться на две части.

Антициклон в зимней тропосфере – это явление кратковременное и неустойчивое. Циркумполярный вихрь и западные ветры, вследствие астрономических факторов, особенностей солнечного потока и вращения Земли, постепенно восстановятся [12]. А восточные волны, постепенно затухая, спускаются вниз в тропосферу, оказывая влияние на синоптическую ситуацию у поверхности земли – отсюда все циклоны, которые в своем движении имеют тенденцию смещаться на юг, юго-запад и запад блокируют теплые воздушные потоки, которые могли бы придти со стороны Атлантики, однако приносят холодный воздух из Арктики или из остывших континентальных районов.

После внезапного стратосферного потепления западные ветры меняются на противоположные и сменяются восточными. Восточные ветры распространяются вниз по атмосфере, часто приводя к ослаблению тропосферных западных ветров, что приводит к резкому снижению

температуры в Северной Европе. ВСП часто, но не всегда, сопровождается такими явлениями. Во время таких событий просто возрастает повторяемость холодной погоды.

Во время ВСП увеличивается вероятность наступления рекордно холодных температур и снегопадов в восточной части Северной Америки. Вне тропиков ВСП, помимо других последствий, могут сместить пути перемещения внетропических циклонов к экватору. Это смещение увеличивает вероятность того, что штормы пройдут через Соединенное Королевство и южную Европу, а так же повышает вероятность рекордно холодных температур и снегопада в восточной части Северной Америки. Хотя атмосферные реанализы и моделирование с использованием климатических моделей ясно иллюстрируют нисходящее распространение аномалий Северной кольцевой моды, механизм, ответственный за стратосферный контроль тропосферных погодных условий еще не полностью понятен.

### 1.7 Возможности прогнозирования

Невзирая на растущий интерес учёных к ВСП их прогнозирование ограничивается несколькими сутками. Так, американская система анализа GEOS5 с верхней границей на 0.01 гПа (~80 км) и разрешением по долготе–широте  $0.3^\circ \times 0.25^\circ$  спрогнозировала ВСП с разделением полярного вихря в январе 2013 г. за пять суток. Иногда, как в январе 2009 г., сильное ВСП может произойти при неблагоприятных внешних факторах, к которым относятся западная фаза квазидвухлетнего колебания (КДК) 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) [1].

Глобальные климатические модели являются основным инструментом исследования наблюдаемых и предполагаемых климатических изменений, и их последствий. От качества воспроизведения естественной изменчивости динамических процессов атмосферы зависит воспроизведение параметров как современного климата, так и климата в ближайшие десятилетия. Передовые научные группы, занимающиеся моделированием климата, к числу которых относится Институт вычислительной математики РАН, участвуют в проектах по валидации воспроизведения естественной изменчивости, включая динамические процессы в стратосфере и тропосфере. В настоящее время эта работа осуществляется в рамках международного проекта CMIP5 [13]. Показано, что в моделях, где верхняя граница расчётной области расположена достаточно высоко (выше 1 гПа или 56 км), количество ВСП в среднем примерно равно наблюдаемому, в то время как в моделях с низкой верхней границей количество ВСП в среднем занижено почти в 2 раза. В моделях с высокой верхней границей уменьшение скорости зонального ветра в тропосфере и связанный с этим отрицательный индекс арктического колебания имеет место в течение трёх месяцев после ВСП, что соответствует наблюдениям. В моделях с недостаточно высокой верхней границей такое влияние стратосферы на тропосферу прослеживается лишь в течение месяца уже после ВСП.

Исследование других параметров, определяющих динамику стратосферы, также демонстрирует, что модели с достаточным количеством уровней в верхней стратосфере в среднем наиболее правильно воспроизводят динамику стратосферы и её влияние на циркуляцию тропосферы.

Реалистичное воспроизведение стратосферы в моделях циркуляции атмосферы позволяет показывать, например, влияние основной моды изменчивости тропической тропосферы – Эль-Ниньо (Южное колебание, связанное с колебаниями температуры поверхности экваториальной части

Тихого океана) – на динамические процессы в тропосфере средних и высоких широт [14].

Тем не менее, наша способность прогнозировать события ВСП в среднесрочных временных масштабах и фиксировать изменения сезонной вероятности событий ВСП за последнее десятилетие существенно возрасла, поскольку системы прогнозирования увеличили вертикальное разрешение модели, а именно верхнюю часть и усложнили ключевые физические процессы в стратосфере, такие как сопротивление гравитационных волн. Остающиеся проблемы включают устранение разницы в навыках прогнозирования между смещением вихрей и ВСП с разделением вихрей.

## 2. Использованные данные.

Зимняя полярная стратосфера очень динамична. В северном полушарии, рассеянные волны планетарного масштаба, распространяющиеся вверх от тропосферы или возбужденные резонансными явлениями, могут привести к нарушению и замедлению климатической западной циркуляции полярного вихря [15]. С этим замедлением ветра связано резкое потепление, иногда повышая температуру полярной стратосферы до 30-40°C за несколько дней. В самых крайних случаях стратосферный полярный вихрь может полностью изменить направление, это так называемое мажорное внезапное стратосферное потепление.

Большие возмущения в стратосферной циркуляции могут приводить к изменениям приземного климата на несколько дней или несколько недель. В частности, за внезапными стратосферными потеплениями часто следует смещение экватора Североатлантической тропосферной бури, проецируемой на пространственную структуру негативной фазы Североатлантического колебания. В среднем, эта картина приводит к теплым аномалиям над Гренландией, восточной Канадой и субтропической Африкой, Азией и холодным аномалиям над северной Евразией и восточной частью США. Однако влияние отдельных стратосферных потеплений широко варьируются, в зависимости от развития разрушения вихря, силы стратосферно-тропосферного взаимодействия и состояния тропосферного климата.

Из-за влияния внезапных стратосферных потеплений на зимний приземный климат и вспышки холодного воздуха в средних широтах, а также их потенциал влияния на перенос озона и химических веществ, тропическую конвекцию и динамику, мезосферные процессы, было бы полезно иметь готовую исследовательскую базу данных этих событий. Ежедневные трехмерные сеточные переменные необходимы для изучения полного развития и влияния внезапных стратосферных потеплений. Поэтому часто

используются данные реанализа, которые ассимилируют наблюдения, чтобы ограничить модель глобального климата. Однако расчет суточных аномалий или дополнительных производных продуктов с использованием данных повторного анализа может быть дорогостоящим в вычислительном отношении и требующим значительных объемов памяти. Кроме того, различные реанализы также различаются по временным интервалам, ассимилированным наблюдениям, схеме ассимиляции, параметризации и физической модели. Это делает взаимное сравнение нескольких продуктов повторного анализа полезным для оценки того, какие характеристики внезапного стратосферного потепления и связанные с ним изменчивости климата являются устойчивыми.

## 2.1 Реанализ MERRA-2.

Реанализ – это процесс, при котором используется неизменная система ассимиляции данных для обеспечения совместной повторной обработки метеорологических наблюдений, обычно охватывающих длительный отрезок записи исторических данных. Процесс опирается на базовую модель прогноза для объединения разнородных наблюдений физически согласованным образом, что позволяет создавать наборы данных с привязкой к сетке для широкого диапазона переменных, в том числе редких или не наблюдаемых напрямую. Результат реанализа не только стал одним из основных продуктов в сообществе исследователей атмосферы, но и все чаще используется для мониторинга климата, а также для бизнес-приложений, например, в энергетике и сельском хозяйстве. Недавние реанализы Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA), Национального Центра экологического прогнозирования (NCEP), Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Бюро глобального моделирования и ассимиляции (GMAO), Национального

агентства по авиации и исследованию космического пространства (NASA) и Метеорологического агентства Японии (JMA) предоставляют богатый ансамбль продуктов климатических данных, начинающихся с периода регулярных обычных и спутниковых наблюдений в середине-конце двадцатого века [16]. Однако также были предприняты успешные попытки продлить атмосферный реанализ до конца девятнадцатого и начала двадцатого веков, используя только наблюдения за приземным давлением [17] или наблюдения поверхностного и среднего давления на уровне моря плюс приземные морские ветры. Как отмечалось ранее [16], эти вековые данные реанализа также вызвали значительные усилия по восстановлению и оцифровке данных различными группами по всему миру. Усилия GMAO's по развитию реанализа начались (в рамках его предшествующей организации, Бюро по ассимиляции данных) с производства Годдардовской системы наблюдения за землёй версия 1 (GEOS-1), реанализа [18], но значительно продвинулся с более поздним выпуском ретроспективного анализа Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA [19]). MERRA охватывал период 1979–2016 гг. И преследовал две основные цели: поместить спутниковые наблюдения NASA's Earth Observing System (EOS) в климатический контекст и улучшить представление атмосферной ветви гидрологического цикла по сравнению с предыдущими реанализами. MERRA в целом удалось достичь этих целей, так же было установлено, что они сопоставимы по качеству с современными реанализами, производимыми NCEP и ECMWF [20]. Тем не менее, он также пострадал от ряда известных, но неизбежных недостатков. К ним относятся нефизические скачки и тенденции в количестве осадков в ответ на изменения в системе наблюдений, отклонения и дисбалансы в определенных гидрологических количествах атмосферы и поверхности земли, а также плохое представление верхней стратосферы [21,22]. Кроме того, длительность ряда наблюдений MERRA была ограничена системой, которая препятствовала включению новых

источников спутниковых данных помимо NOAA-18, запущенного в 2005 году. Во время прекращения его работы в марте 2016 года MERRA подверглась риску значительного ухудшения качества данных из-за отказа некоторых платформ наблюдений, в том числе, например, EOS Aqua, срок службы которого уже значительно превысил проектный и предоставлял MERRA единственные источники гиперспектральных инфракрасных и радиочастотных излучений во второй половине дня.

Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications версии 2 (MERRA-2) была создана чтобы обеспечить своевременную замену MERRA и поддержать непрерывную передачу имеющихся данных в близком к реальному времени в GMAO's. MERRA-2 предназначен для промежуточного реанализа, который использует последние разработки GMAO в области моделирования и ассимиляции данных для устранения некоторых известных ограничений MERRA, но также является ступенькой к долгосрочной цели GMAO по разработке интегрированного анализа системы Земли (IESA) способного объединить ассимиляционные системы для атмосферы, океана, суши и химии. Для достижения последней цели MERRA-2 включает в себя ассимиляцию аэрозольных данных, обеспечивая тем самым многоэтапный реанализ, при котором аэрозольные и метеорологические наблюдения совместно ассимилируются в глобальной системе ассимиляции данных. Другие новые разработки в MERRA-2, имеющие отношение к IESA[23], сосредоточены на аспектах криосферы и стратосферы, включая представление озона, и на использовании наблюдений за осадками для воздействия на поверхность земли. В то же время основные аспекты системы MERRA-2, такие как алгоритм вариационного анализа и обработка наблюдений, практически не изменились по сравнению с MERRA. Также неизменным является подготовка большинства традиционных источников данных, которые первоначально использовались в MERRA.

## 2.2 Программа «Синоптик-Долгосрочник».

Программа долгосрочного прогноза погоды «Синоптик-Долгосрочник» разработана и функционирует в программной среде IDL 8.1. Система непрерывно совершенствуется и на сегодняшний момент практически все ведущие центры долгосрочного прогноза в России так или иначе используют ее в своей практике. Данная система установлена в Гидрометцентре России, Институте Арктики и Антарктики, в Санкт-Петербургском гидрометцентре.

Программа «Синоптик-Долгосрочник» использует данные, полученные из 10 различных прогностических центров и научных проектов, которые поддерживаются оперативно:

- 1) Проект «Twentieth Century Reanalysis Project», поддерживаемый в U.S. Department of Energy, Office of Science Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment (DOE INCITE) program, and Office of Biological and Environmental Research (BER), and by the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Program Office.";
- 2) Проект «NCEP/NCAR Reanalysis 1», поддерживаемый в NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA;
- 3) Проект «GPCP Version 2.1.», поддерживаемый в NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA;
- 4) Проект «HADCRUT3», поддерживаемый в Hadley Centre, UK Met Office;
- 5) Проект «CAMS\_OPI», поддерживаемый в Climate Prediction Center/NCEP/NWS/NOAA;
- 6) Отдел долгосрочных прогнозов ФГБУ «ААНИИ»;
- 7) «SILSO» Royal Observatory of Belgium Av. Circulaire, 3 - B-1180 Brussels, Belgium;

8) Отдел численного долгосрочного прогнозирования ФГБУ «Гидрометцентр России»;

9) Environmental Modeling Center, NCEP/NWS/NOAA;

10) UNISYS CORPORATION ("UNISYS"), US.

Все базы данных гидрометеорологических параметров, использующиеся программой, представлены в бинарном виде, в формате REAL, в узлах регулярной сетки, покрывающей весь Земной шар. Размерность баз данных следующая:

1) Данные высот геопотенциальных поверхностей, температуры на геопотенциальных поверхностях и давление на уровне моря находятся в узлах регулярной широтно-долготной сетки размерностью 180x91 узла. Пространственный шаг сетки составляет  $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$  по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами  $90^{\circ}$  ю.ш. и  $0.0^{\circ}$  в.д., конечная точка имеет координаты  $90^{\circ}$  с.ш. и  $358.0^{\circ}$  в.д. Данные последовательно записаны по одному среднемесячному (среднесуточному) полю начиная с 1 января 1880 года по настоящий момент.

2) Данные температуры воздуха на высоте 2 метра и данные составляющих U и V скорости ветра на высоте 10 метров находятся в узлах регулярной Гауссовой сетке размерностью 192x94 узла. Пространственный шаг сетки составляет  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$  по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами  $88.54^{\circ}$  ю.ш. и  $0.0^{\circ}$  в.д., конечная точка имеет координаты  $88.54^{\circ}$  с.ш. и  $358.125^{\circ}$  в.д. Данные последовательно записаны по одному среднемесячному (среднесуточному) полю начиная с 1 января 1880 года по настоящий момент.

3) Данные осадков, полученные из данных реанализа, данные о снежном и ледовом покрове, данные температуры поверхности океана находятся в узлах регулярной широтно-долготной сетки размерностью 360x180 узла. Пространственный шаг сетки составляет  $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$  по широте и долготе.

Начало отсчета находится в точке с координатами  $89.5^\circ$  ю.ш. и  $0.0^\circ$  в.д., конечная точка имеет координаты  $89.5^\circ$  с.ш. и  $359.0^\circ$  в.д. Данные последовательно записаны по одному среднемесячному (среднесуточному) полю начиная с 1 января 1880 года по настоящий момент.

4) Данные осадков, полученных по спутниковым наблюдениям, прогностические данные модели ПЛАВ, прогностические данные прогностического центра Украины находятся в узлах регулярной широтно-долготной сетки размерностью  $144 \times 73$  узла. Пространственный шаг сетки составляет  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами  $90^\circ$  ю.ш. и  $0.0^\circ$  в.д., конечная точка имеет координаты  $90^\circ$  с.ш. и  $357.5^\circ$  в.д. Данные последовательно записаны по одному среднемесячному (среднесуточному) полю начиная с 1 января 1979 года по настоящий момент.

5) Данные прогностической модели CFC находятся в узлах регулярной широтно-долготной сетки размерностью  $360 \times 181$  узел. Пространственный шаг сетки составляет  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  по широте и долготе. Начало отсчета находится в точке с координатами  $90^\circ$  ю.ш. и  $0.0^\circ$  в.д., конечная точка имеет координаты  $90^\circ$  с.ш. и  $359.0^\circ$  в.д. Данные последовательно записаны по одному среднемесячному (среднесуточному) полю начиная с 1 января 1880 года по настоящий момент.

Естественный синоптический период (ЕСП)-промежуток времени, в течение которого развивается определенным образом ориентированный процесс при сохранении знака барического поля на пространстве естественного синоптического района (Термин введен в 1915г. Мультановским)

а) Начало синоптического периода характеризуется преобразованием высотного деформационного поля. Деформационное поле состоит из мощных барических образований, каждому из которых соответствует самостоятельный очаг тепла или холода на карте OT500/1000.

б) В течение синоптического периода сохраняются основные термобарические поля в тропосфере, которые определяют:

- 1) направление перемещений барических образований у земной поверхности;
- 2) географическое распределение барического поля на пространстве естественного синоптического района;
- 3) непрерывные мелкие изменения высотного деформационного поля.

с) Продолжительность естественных синоптических периодов составляет 5-7 суток.

В работе использовались данные зональной составляющей ветра и температуры реанализа MERRA-2 для декабря, января и февраля с 1984 по 2016 гг.. Используя данные реанализа мы получили базу данных для 33 лет, которая поможет исключить влияние солнечной активности на явление ВСП или подтвердить его. Проведено исследование возмущений в атмосфере земли до 65 км, связанных с событиями ВСП, которые наблюдались в декабре–марте с 1984 по 2016 г. Для каждого месяца на протяжении всего исследуемого периода были получены значения температуры и зонального ветра. Для построения более точных картин, определено среднезональное климатическое значение зональной составляющей ветра и температуры, посчитанное за период с 1984 по 2016 для месяцев декабрь, январь, февраль. Климатическое значение было вычтено из месячных значений зональной составляющей ветра и температуры, так как отклонение от нормы более явно демонстрирует явление ВСП и помогает точнее определить дату наступления этого события.

Из базы данных за 33 года, были отобраны зимы с продолжительным ВСП для построения средних карт метеопараметров за выбранный промежуток времени с использованием программы кандидата географических наук Цепелева Валерия Юрьевича.

Для построения архивных карт метеопараметров были заданы следующие условия:

- Ограниченный участок местности с координатами широты от 55° до 80° с.ш. и долготы от 15° до 180° в.д., что соответствует полярному региону РФ;
- Рассматриваемые метеопараметры: давление на уровне моря, температура воздуха на высоте 2-х метров (Т2м) и осадки;
- Период отображаемый на картах равен пяти суткам;
- Значения данных-абсолютные величины;
- Период осреднения данных- ежедневное.

Архивные синоптические карты для температуры, давления и осадков были получены с использование данных реанализа NCEP/NEAR 20 century следующего вида:

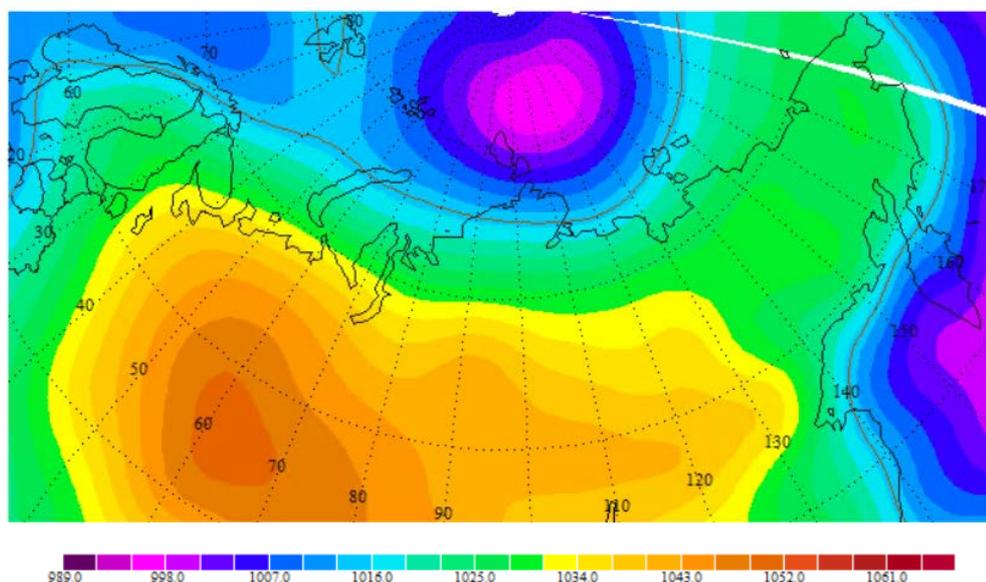


Рис 1. Архивные данные за 21-25 ноября 1987 года по распределению давления

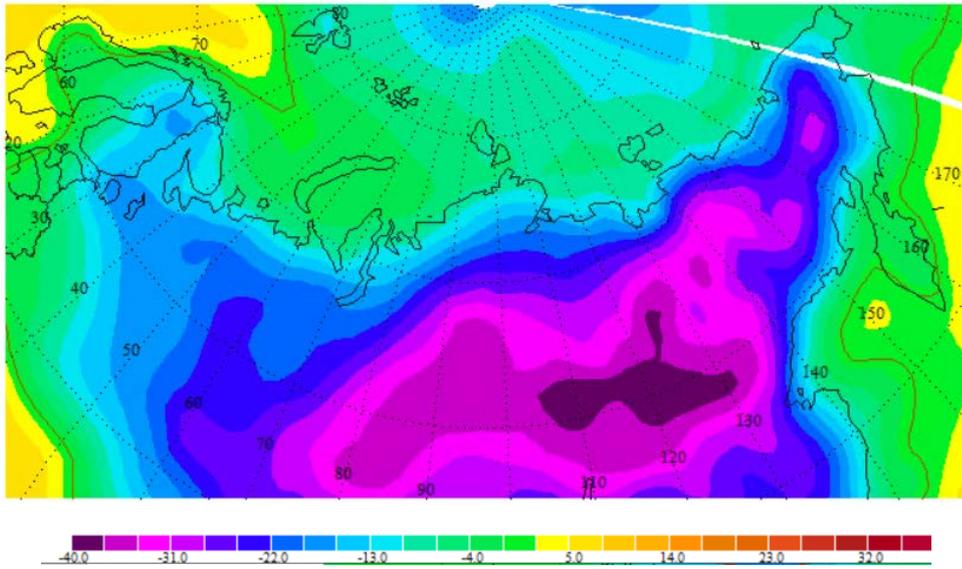


Рис 2. Архивные данные за 21-25 ноября 1987 года по распределению температуры на высоте 2 м

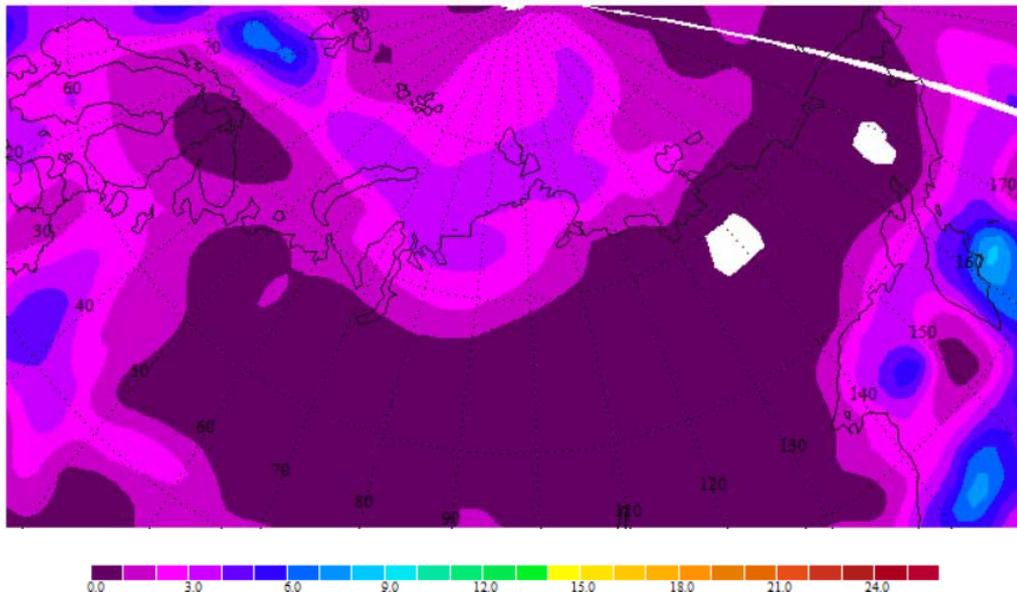


Рис 3. Архивные данные за 21-25 ноября 1987 года по распределению осадков

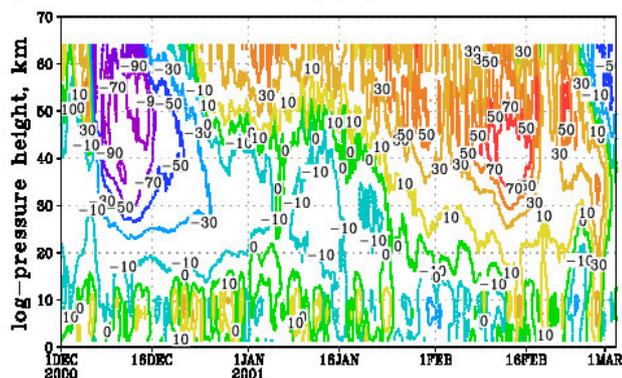
### 3. Результаты.

В результате работы были отобраны зимы с разными событиями ВСП: продолжительные, мощные, но не продолжительного характера и зимы, когда явление ВСП отсутствовало. Это было сделано для того, чтобы проанализировать как ведет себя атмосфера в разных условиях.

Для анализа зависимости синоптической ситуации в полярных регионах РФ от ВСП были рассмотрены архивные карты погоды полученные с помощью программы «Синоптик-Долгосрочник» для атмосферного давления, температуры на высоте двух метров и осадков. Для зим с продолжительным ВСП карты были рассмотрены по всем трем параметрам (давление, температура, осадки), для остальных зим только по давлению, так как именно эти карты демонстрируют большую взаимосвязь между явлением ВСП и изменением синоптической ситуации.

Рассмотрим каждое явление ВСП по отдельности.

a) Zonal wind - Climate (m/s), 1987-88, LAT=62.5N



b) Temp - Climate (K), 1987-88, LAT=77.5-87.5N

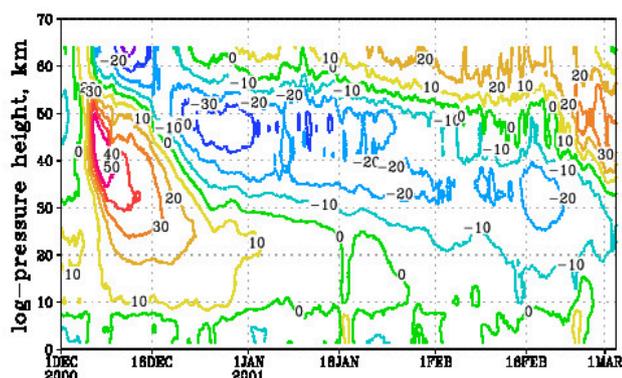
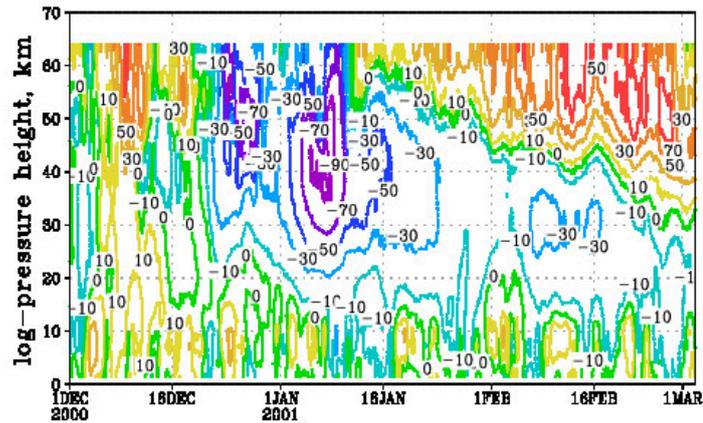


Рис 4. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 1987-88: продолжительное ВСП.

Продолжительное потепление на рисунке 4 наблюдалось с 8.12.1987 по 5.01.1988 год. Максимальная аномалия по температуре расположена в районе 40 км, тем не менее аномалия в  $10^{\circ}\text{K}$  фиксируется и ниже, около 10 км, но с явным запозданием по времени. Это уже граница тропосферы и стратосферы, следовательно, возможно оказывалось влияние на приземную погоду. Аномалии по ветру так же опускаются ниже 10 км. Данное ВСП проходит через всю толщу нижней атмосферы.

a) Zonal wind – Climate (m/s), 2003–04, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 2003–04, LAT=77.5–87.5N

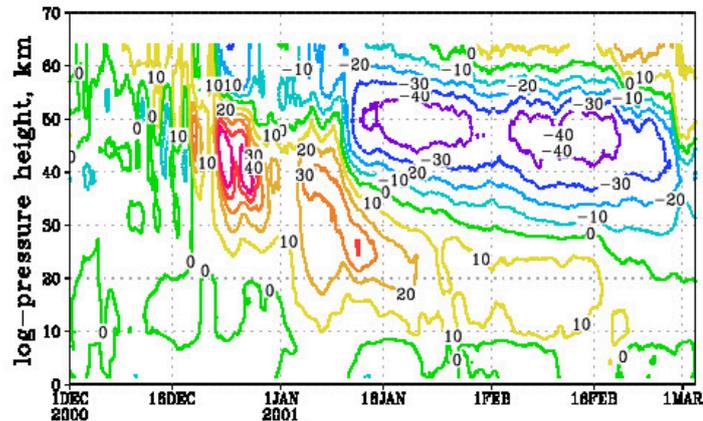
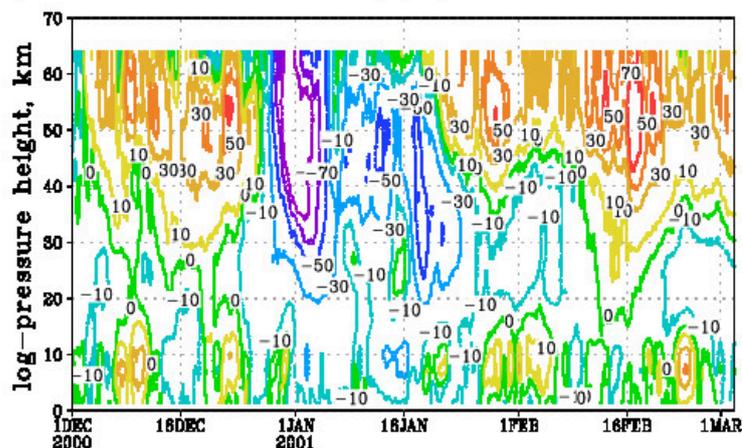


Рис 5. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 2003-04: продолжительное ВСП

ВСП на рисунке 5 наблюдалось с 20.12.2003 по 20.02.2003. Центр потепления находился на высоте 40 км и достигал значения температурной аномалии  $40^{\circ}\text{K}$ , в начале января видна тенденция на смещении потепления в нижние слои атмосферы на высоту 10 км. Аномалии по направлению ветра так же изначально имели высотный характер, однако со временем опустились ниже 10 км.

a) Zonal wind – Climate (m/s), 1984–85, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 1984–85, LAT=77.5–87.5N

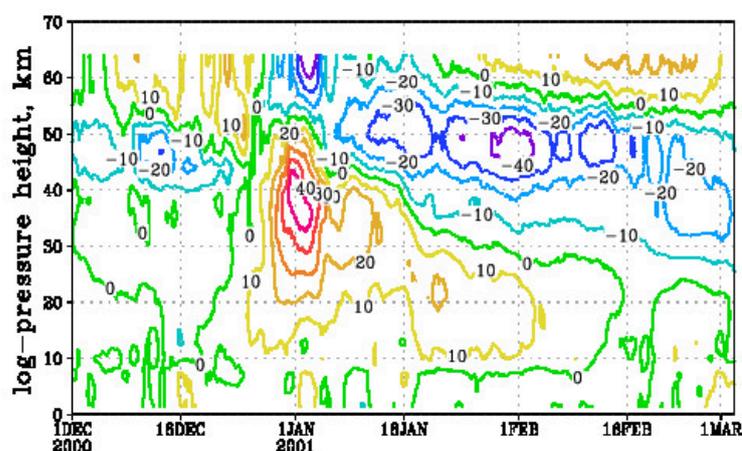
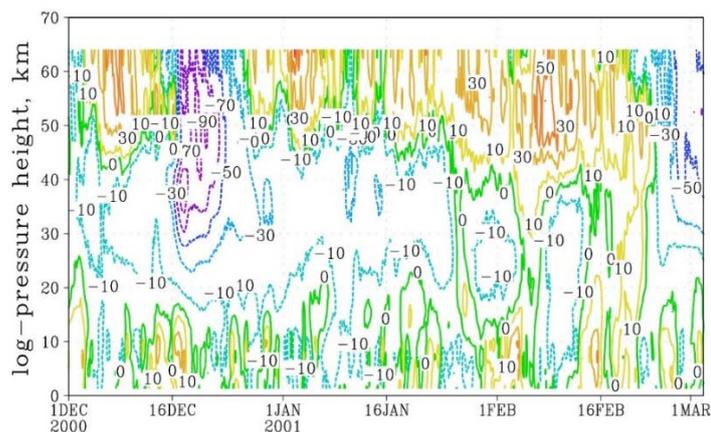


Рис 6. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 1984-85: продолжительное ВСП

На рисунке 6 ВСП длилось с 25.12.1984 по 4.02.1985. Имеет аналогичное развитие, что и в предыдущие годы. Аномалия по температуре достигает значения  $40^{\circ}\text{K}$ , опускается до высоты 10 км. ВСП проходит через всю толщу атмосферы.

Рисунок 7 иллюстрирует продолжительное ВСП, которое длилось с 14.12.1998 по 10.01.1999. Центр температурной аномалии на высоте 30 км, с течением времени спускается на высоту около 10 км, как и аномалия по ветру.

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



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

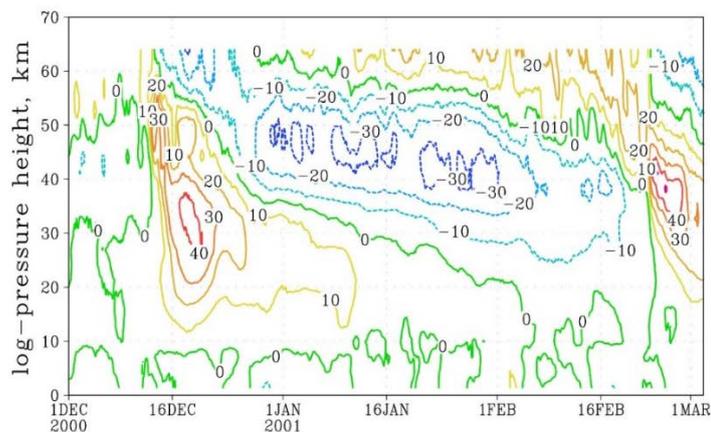
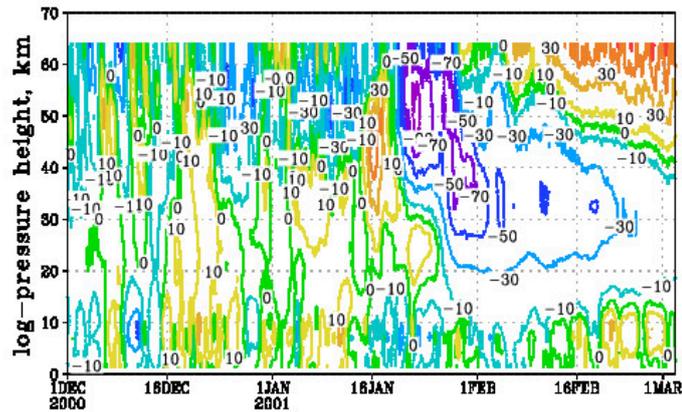


Рис 7. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний: 10°K и 10 м/с соответственно, зима 1998-99: продолжительное ВСП

Рисунок 8 иллюстрирует продолжительное ВСП для зимы с 20.01.2009 по начало марта 2009. Это самое позднее ВСП, однако оно имеет тот же характер развития, что и остальные, а именно- центр температурной аномалии на высоте 40 км, постепенно опускается в слои ниже 10 км, такой же процесс развития характерен для аномалий по направлению ветра.

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



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

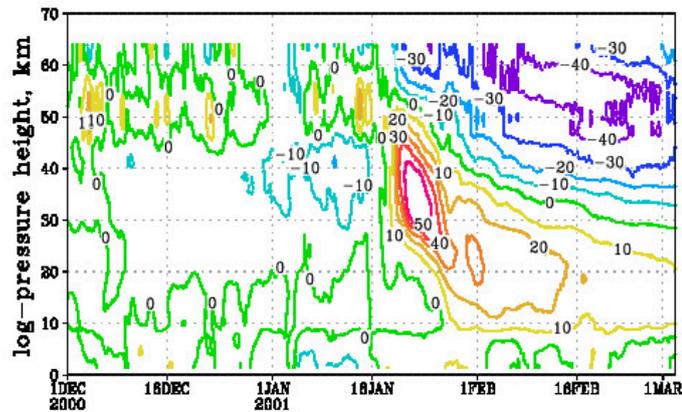


Рис 8. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 2008-09: продолжительное ВСП

Зимы без «низких» ВСП.

Выберем из базы данных такие зимние месяцы, в которые изменение зонального ветра и температуры на высоте 10 км было минимальным, для того чтобы отследить динамику атмосферы без влияния изменения направления ветра и температуры вызванным ВСП.

На рисунке 9 за 2006-07 год для изучения взят промежуток времени с 26.12.2006 по 15.01.2007, так как в этот отрезок времени отсутствуют какие-либо температурные аномалии в области 10 км, а также нет аномалий по ветру. Аналогичным образом на рисунке 10 был выбран интервал изучения зимы 2014-15 года с 11.12 по 31.12.

Точно таким же образом на рисунке 11 был выбран промежуток с 11.12.1992 по 31.12.1992 для исследования месяцев без влияния «низих» ВСП.

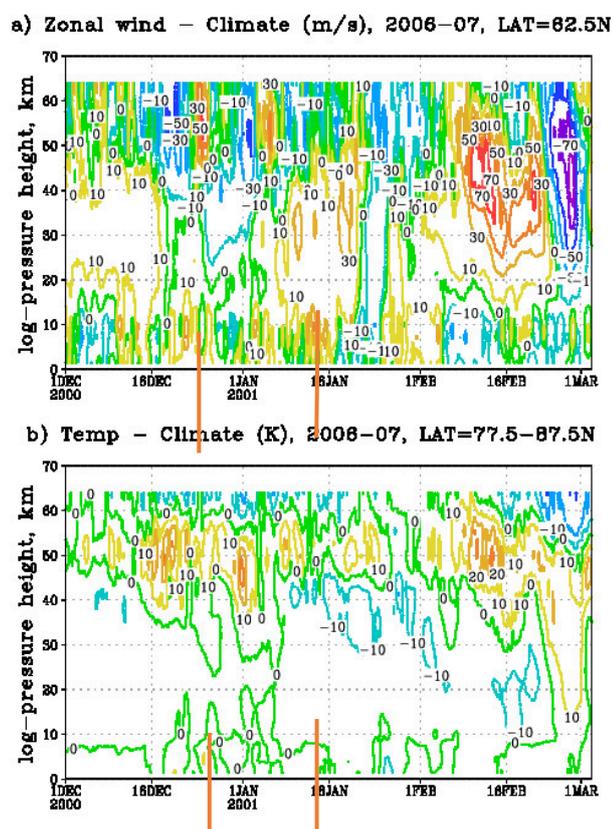
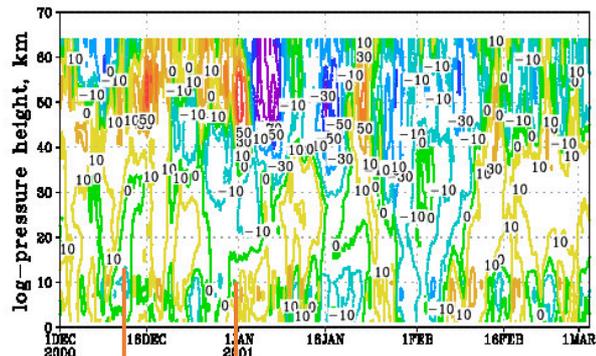


Рис 9. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 2006-07.

a) Zonal wind - Climate (m/s), 2014-15, LAT=82.5N



b) Temp - Climate (K), 2014-15, LAT=77.5-87.5N

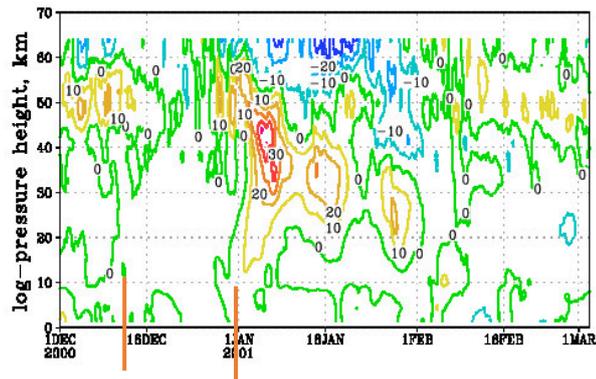
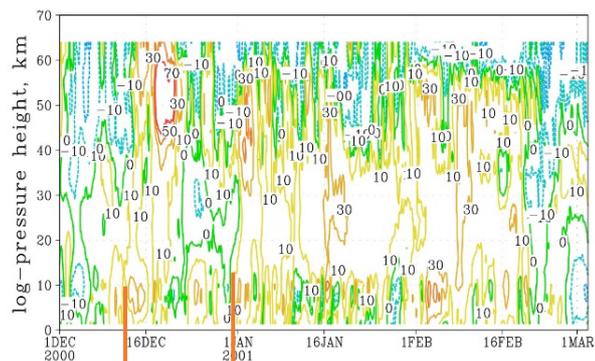


Рис 10. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 2014-15.

a) Zonal wind – Climate (m/s), 1992–93, LAT=62.5N



b) Temp – Climate (K), 1992–93, LAT=77.5–87.5N

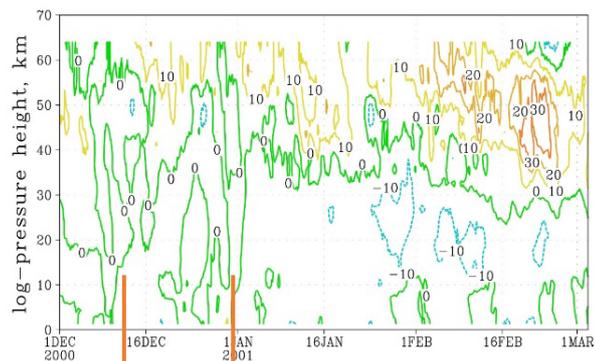


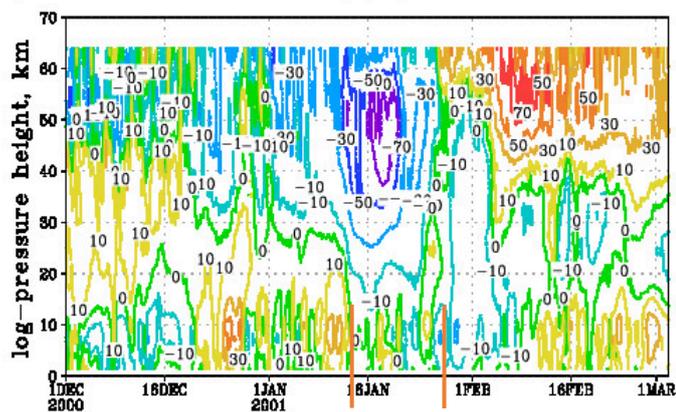
Рис 11. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний: 10°K и 10 м/с соответственно, зима 1992-93.

Зимы с продолжительными ВСП, но не опускающимися в тропосферу.

Отберем несколько случаев наличия сильного явления ВСП, но имеющего не продолжительный характер, для того, что сравнить похожи ли они по оказываемому воздействию на синоптическую ситуацию в выбранном регионе.

На рисунке 12 был выбран промежуток времени с 14.01.2021 по 24.01.2012. Выбор такого срока наблюдения связан с тем, что в этом промежутке наблюдается сильное ВСП на высоте 40 км, но в отличие от ВСП продолжительных оно не опускается ниже 10 км, а остается, примерно, на той же высоте.

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



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

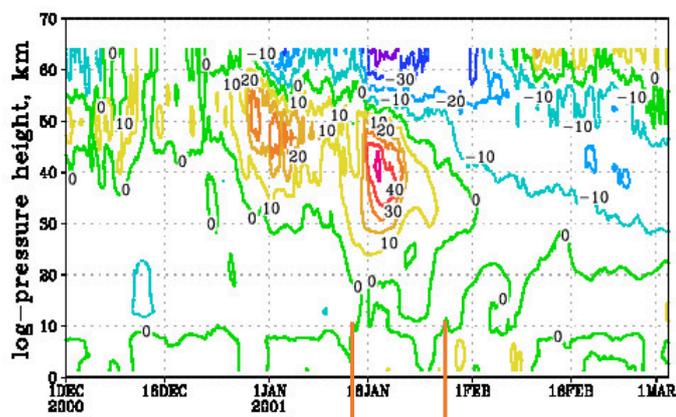
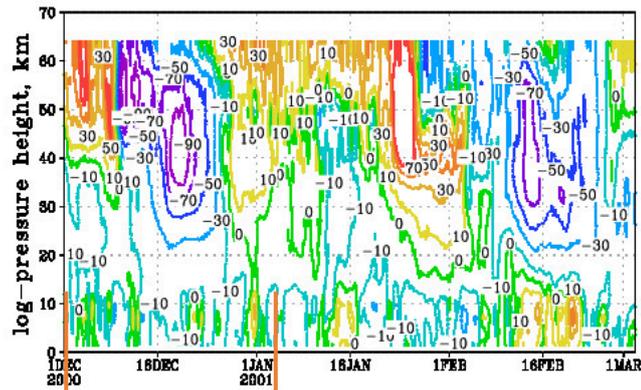


Рис 12. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 2011-12.

На рисунке 13 представленное ВСП имеет не продолжительных характер, оно длится с 10 декабря по 26 декабря, значит характеризовать его как продолжительное мы не сможем. Этой зимой аномалия в  $10^{\circ}\text{K}$  опускается на границу тропосферы очень непродолжительное время 3-4 дня, примерно с 14 декабря по 17 декабря.

a) Zonal wind - Climate (m/s), 2000-01, LAT=62.5N



b) Temp - Climate (K), 2000-01, LAT=77.5-87.5N

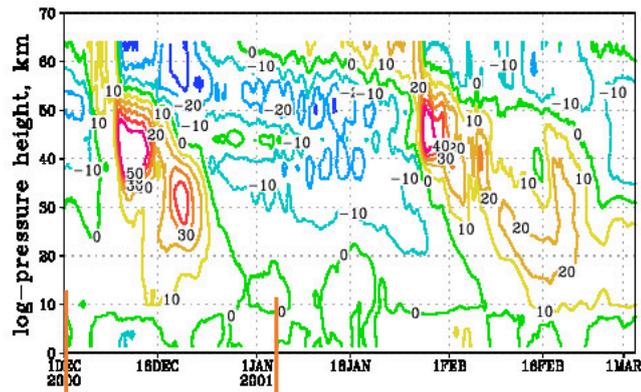
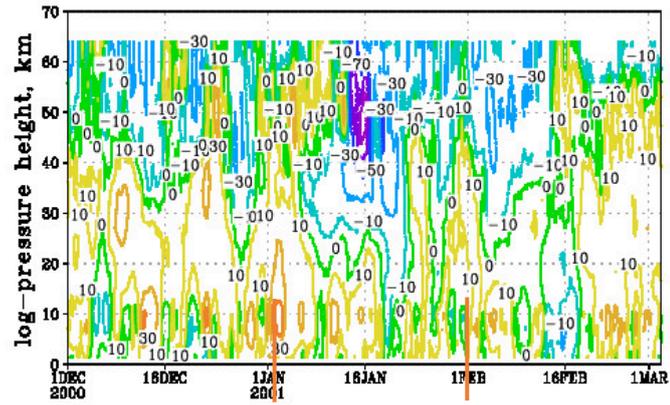


Рис 13. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 2000-01.

Рисунок 14 иллюстрирует пример мощного и высокого ВСП, которое наблюдалось с 5.01.1992 по 28.01.1992. Центр аномалии по температуре на высоте 40 км. Аномалии температуры на границе тропосферы и стратосферы в случае этого ВСП не наблюдалось совсем.

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



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

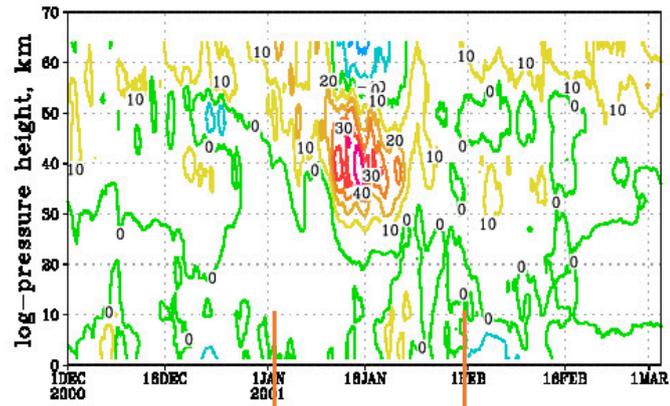
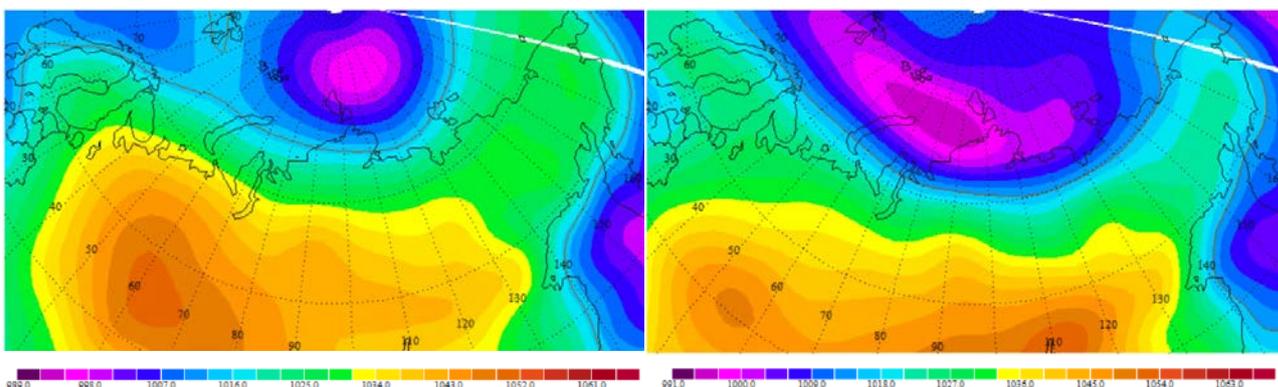


Рис 14. Распределение аномалий температуры и среднезональной составляющей ветра по высоте с учетом климатической составляющей; частота изолиний:  $10^{\circ}\text{K}$  и  $10\text{ м/с}$  соответственно, зима 1991-92.

### 3.1 Давление

В первую очередь рассмотрим архивные карты погоды для зим с продолжительным ВСП. Условно временной интервал, в течение которого наблюдалось ВСП был разделена на три составные части: до, во время и после ВСП для наглядности происходящих изменений. Каждая карта имеет осреднение за 5 дней, данные выбраны абсолютные, шкала для каждой карты используется разная.

Проанализируем карты давления за зиму 1987-88 (рисунок 15) года во время продолжительного ВСП. За 10 дней до предполагаемого начала ВСП над большей частью РФ мы наблюдаем повышенное давление, что свидетельствует о наличии антициклона с давлением в центре около 1045-1052 гПа. Так же над Северным Ледовитым океаном наблюдается циклон, который набирается силу и перемещается к побережью с давлением в центре 995-998 гПа.



Давление для периода однородной циркуляции 21-25 ноября 1987 год (до ВСП)

Давление для периода однородной циркуляции 26-30 ноября 1987 год (до ВСП)

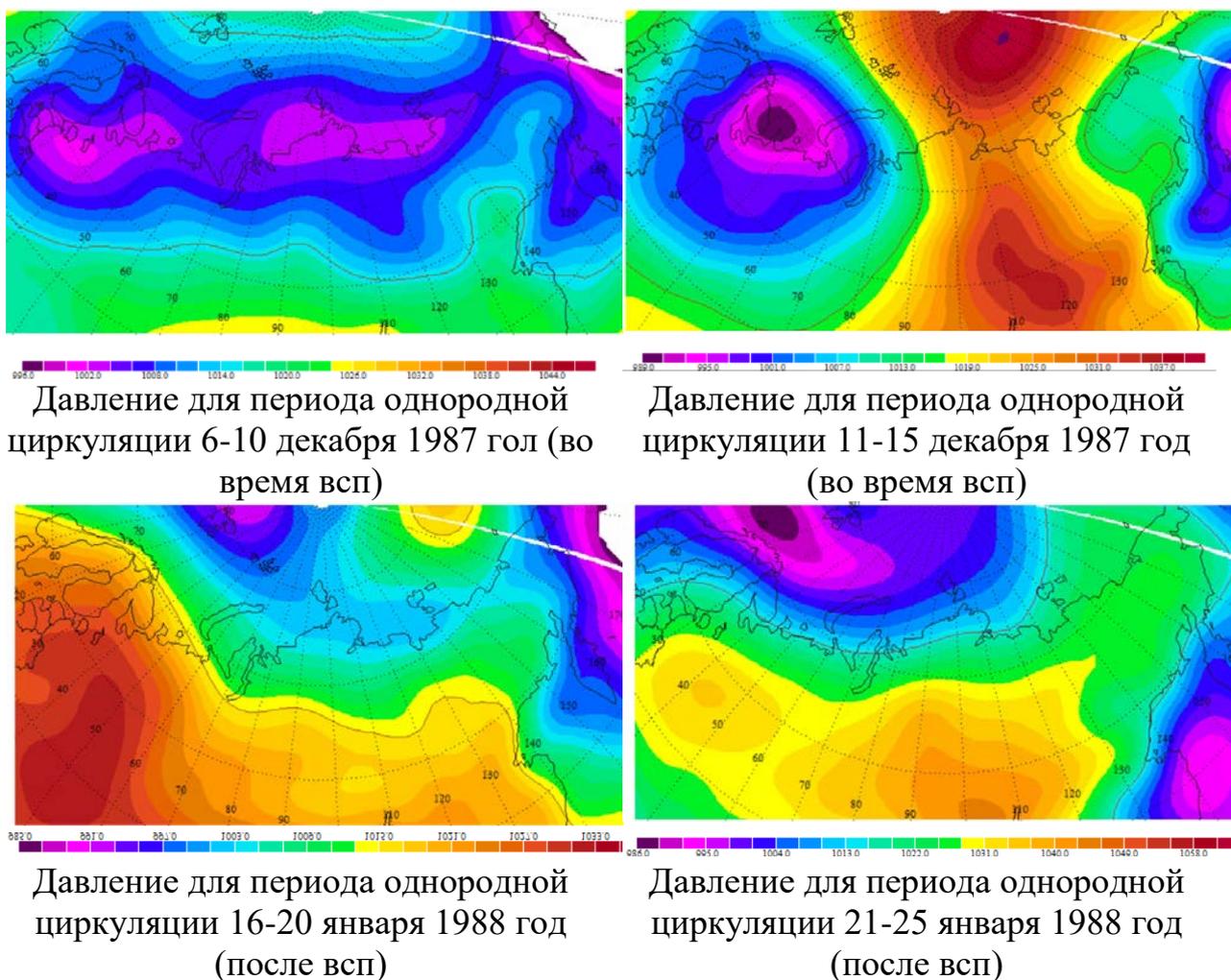
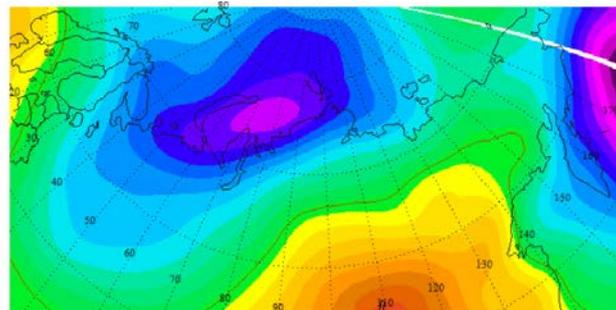
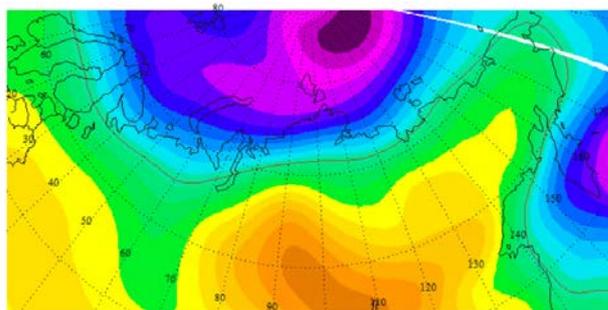


Рис 15. Синоптические карты по распределения приземного давления для зимы 1987-88 года.

Во время ВСП можно заметить, как области низкого давления занимает большую часть полярных регионов РФ, но уже на следующей карте мощный циклон «разрушен» антициклоном на две небольшие области. На рисунках, которые относятся к промежутку времени после ВСП мы наблюдаем, как циклон уходит с территории РФ и перемещается на океан. Основную часть полярных регионов РФ занимает теперь антициклон с давлением в центре 1030-1040 гПа.

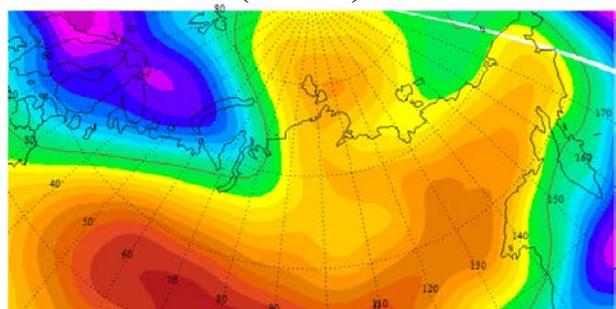
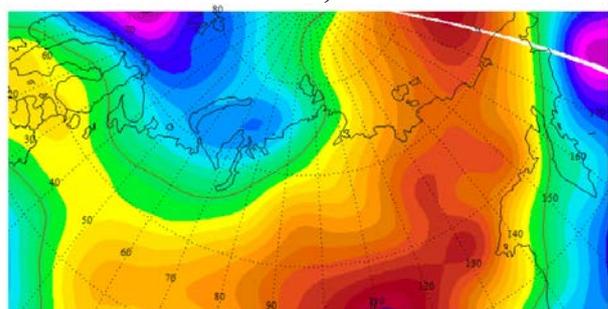
Проанализируем архивные карты давления за 2003-2004 год наблюдения на рисунке 16. До наступления явления ВСП наблюдается перемещение достаточно мощного циклона с Северного Ледовитого океана за 60° с.ш.

преимущественно в северо-западную сторону. Во время ВСП мощный антициклон «вымещает» циклон с полярных регионов РФ, вытягиваясь в сторону полярного круга, занимая полностью всю территорию. После 16 февраля основную область занимает антициклон с давлением в центре около 1036 гПа, затем в полярные регионы возвращается циклон.



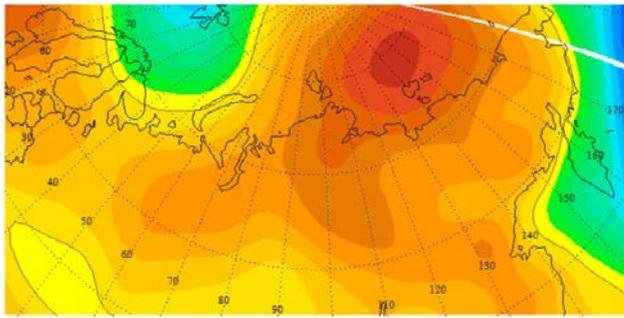
Давление для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 2003 года (до ВСП)

Давление для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 2003 года (до ВСП)

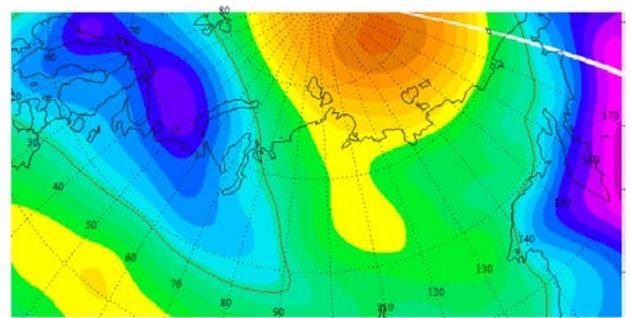


Давление для периода однородной циркуляции 21-25 января 2004 года (во время ВСП)

Давление для периода однородной циркуляции 1-5 февраля 2004 года (во время ВСП)



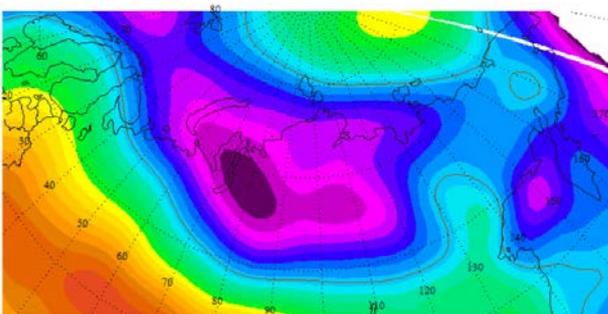
Давление для периода однородной циркуляции 16-20 февраля 2004 года (после всп)



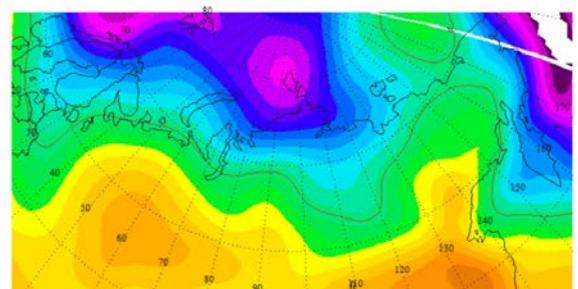
Давление для периода однородной циркуляции 21-25 февраля 2004 года (после всп)

Рис 16. Синоптические карты по распределения приземного давления для зимы 2003-04 года.

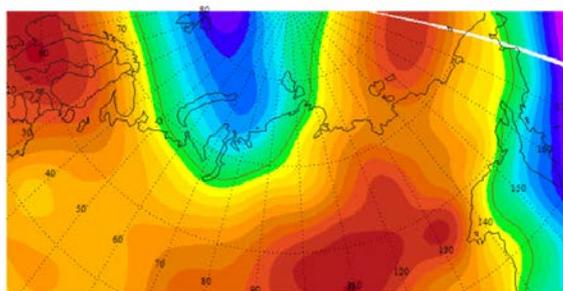
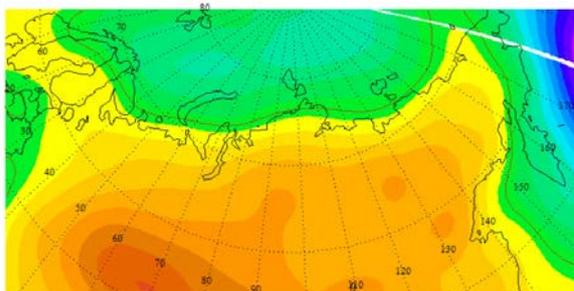
Рассмотрим карты давления для зимы 1984-85 годов. К моменту наступления ВСП мощный циклон ослабевает и вымещается антициклоном с давление в центре около 1032 гПа к побережью, в сторону Северного Ледовитого океана.



Давление для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 1984 года (до всп)

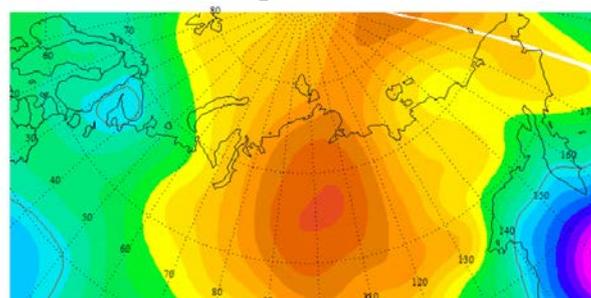
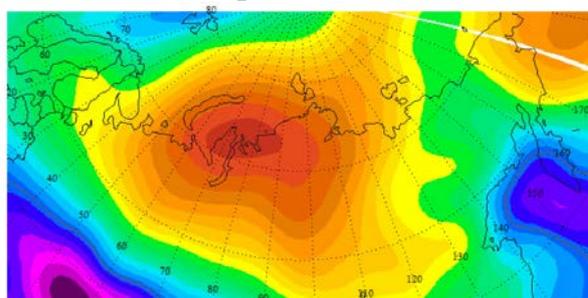


Давление для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1984 года (до всп)



Давление для периода однородной циркуляции 6-10 января 1985 года (во время всп)

Давление для периода однородной циркуляции 11-15 января 1985 года (во время всп)



Давление для периода однородной циркуляции 6-10 февраля 1985 года (после всп)

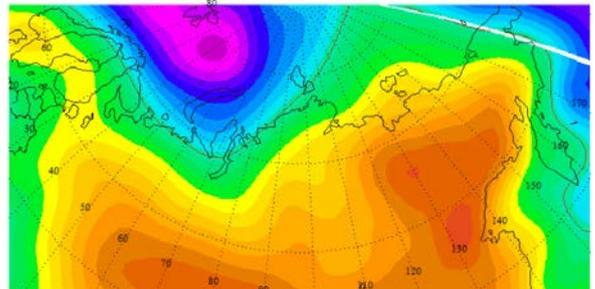
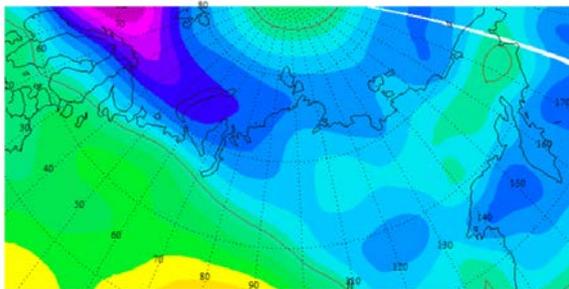
Давление для периода однородной циркуляции 11-15 февраля 1985 года (после всп)

Рис 17. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 1984-85 года.

Во время ВСП картина повторяется, мощный антициклон занимает всю территорию полярного региона РФ давление в центре антициклона достигает значения 1045 гПа, после он немного ослабевает до 1040 гПа и уменьшает площадь воздействия, возвращается циклон.

Изучим карты давления для зимы 1998-99 годов рисунок 18. Ситуация аналогична тем, что были описаны ранее. К моменту наступления так и во время ВСП наблюдается обширный антициклон с давлением в центре около

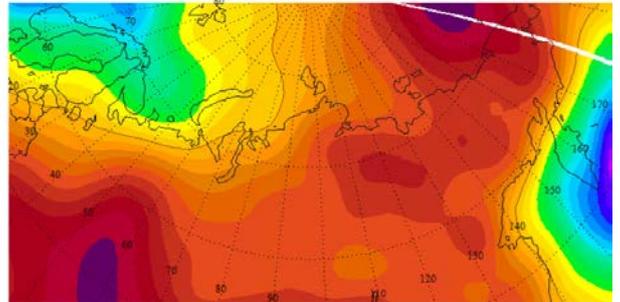
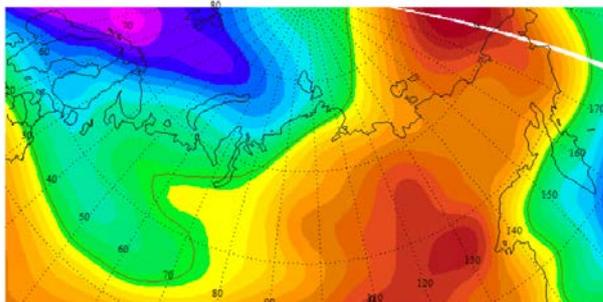
1036 гПа, затем он немного ослабевает, давление в центре опускается до 1032 гПа и значительное влияние на приземную погоду уже оказывает циклоническая деятельность.



Давление для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1998 года (до всп)



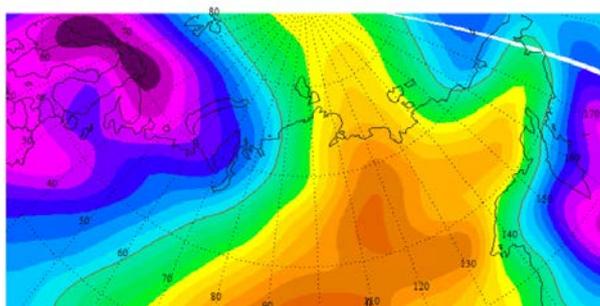
Давление для периода однородной циркуляции 11-15 декабря 1998 года (до всп)



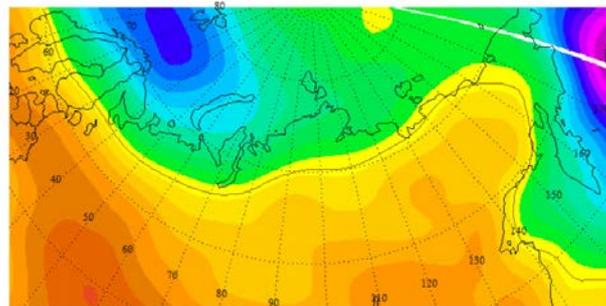
Давление для периода однородной циркуляции 26-31 декабря 1998 года (во время всп)



Давление для периода однородной циркуляции 1-5 января 1999 года (во время всп)



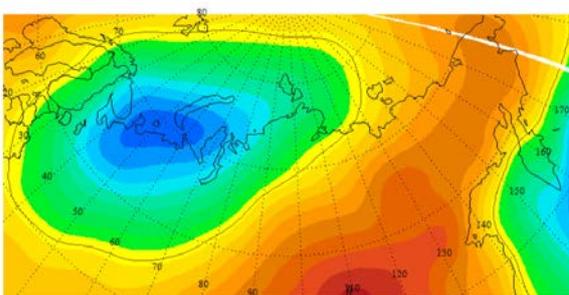
Давление для периода однородной циркуляции 6-10 февраля 1999 года (после всп)



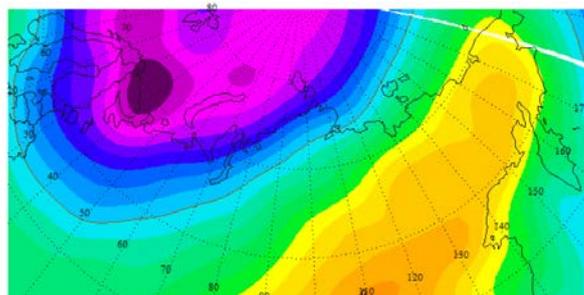
Давление для периода однородной циркуляции 11-15 февраля 1999 года (после всп)

Рис 18. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 1998-99 года.

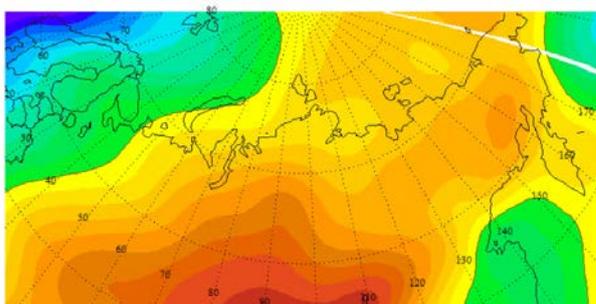
Рассмотрим пятый случай продолжительного ВСП на рисунке 19 за 2008-09 года. Общая ситуация повторяется снова. Во время и после ВСП над территорией полярных регионов РФ мощная антициклоническая деятельность с давлением в центре антициклона 1041 гПа и 1034 гПа соответственно.



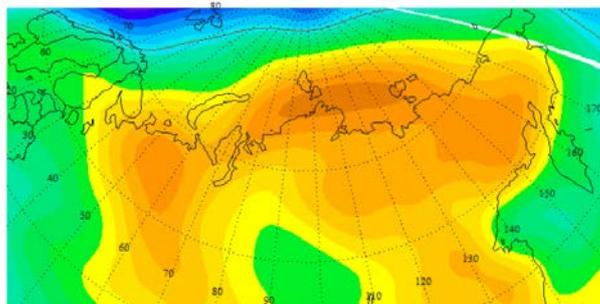
Давление для периода однородной циркуляции 1-5 января 2009 года (до всп)



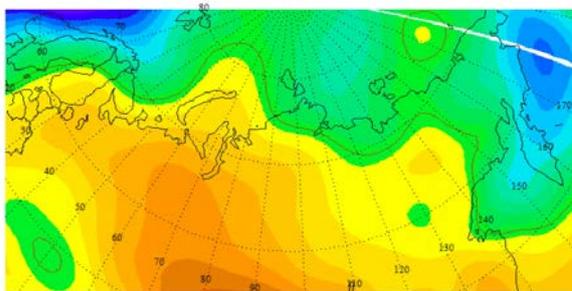
Давление для периода однородной циркуляции 6-10 января 2009 года (до всп)



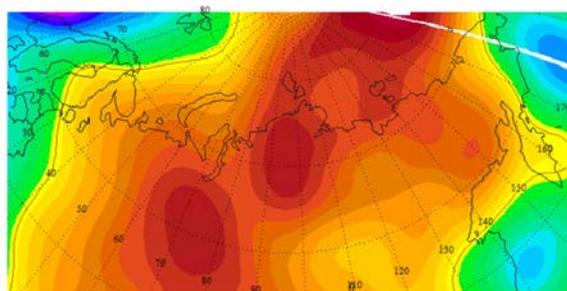
Давление для периода однородной циркуляции 21-25 января 2009 года (во время ВСП)



Давление для периода однородной циркуляции 26-31 января 2009 года (во время ВСП)



Давление для периода однородной циркуляции 1-5 марта 2009 года (после ВСП)

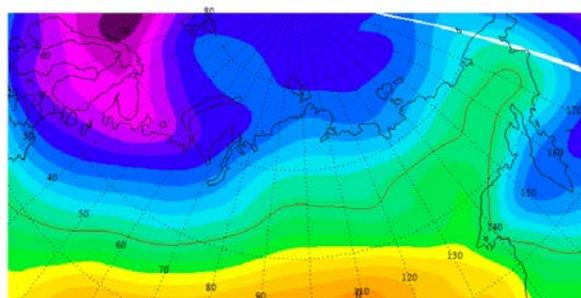
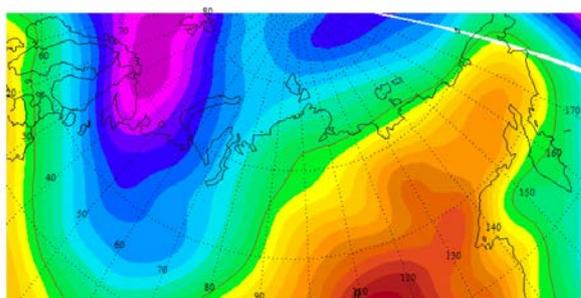


Давление для периода однородной циркуляции 6-10 марта 2009 года (после ВСП)

Рис 19. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 2008-09 года.

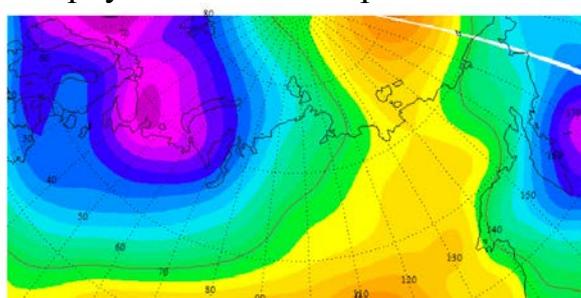
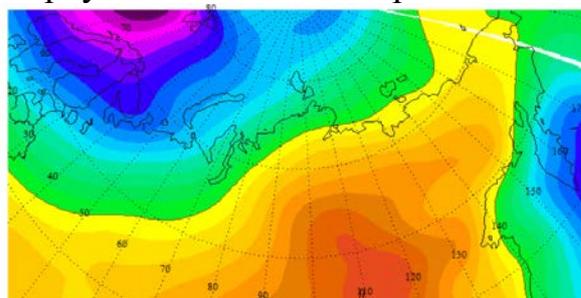
Исходя из данных по давлению для зим с продолжительным ВСП можно сделать вывод о том, что во время и после ВСП на территории полярных регионов РФ в основном привалирует мощная антициклоническая деятельность.

Для сравнительного анализа исследуем зимы со слабыми изменениями в области 10 км и ниже как по аномалиям температуры, так и по изменению направления зонального ветра.



Давление для периода однородной циркуляции 26-31 декабря 2006 года

Давление для периода однородной циркуляции 1-5 января 2007 года



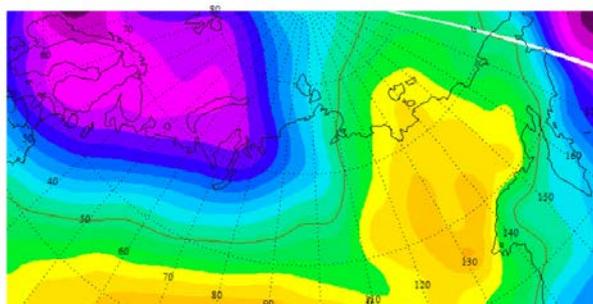
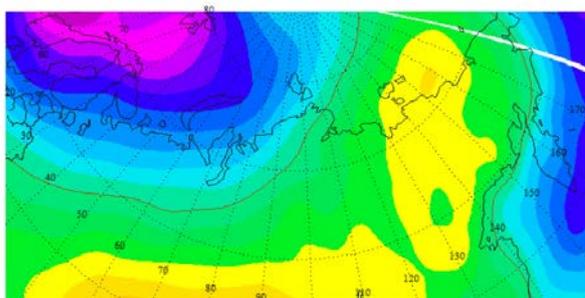
Давление для периода однородной циркуляции 6-10 января 2007 года

Давление для периода однородной циркуляции 11-15 января 2007 года

Рис 20. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 2006-07 года.

На рисунке 20 для декабря-января 2006-07 годов, мы видим частую смену занимаемых позиций, как для антициклона, так и циклона. Нет четких закономерностей относительно перемещения воздушных масс. Однако присутствие на картах в значительной степени циклона отличает эти карты, от карт с продолжительными ВСП.

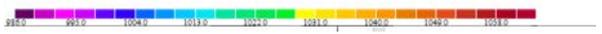
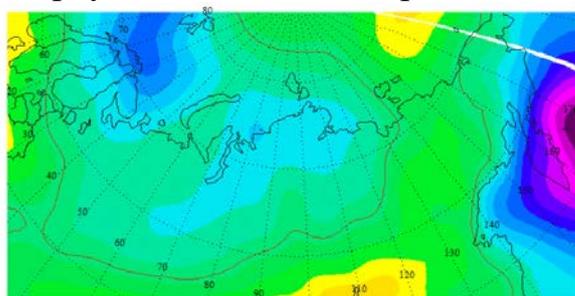
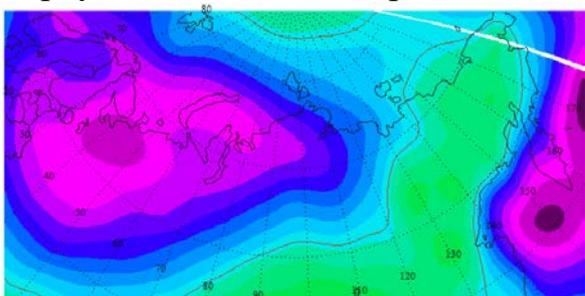
В течение декабря 2014 года на картах видно, как в течение 10 дней развивается и растет циклон. Антициклон в то время полностью покидает полярные широты РФ о чем свидетельствует рисунок 21.



Давление для периода однородной циркуляции 11-15 декабря 2014 года



Давление для периода однородной циркуляции 16-20 декабря 2014 года



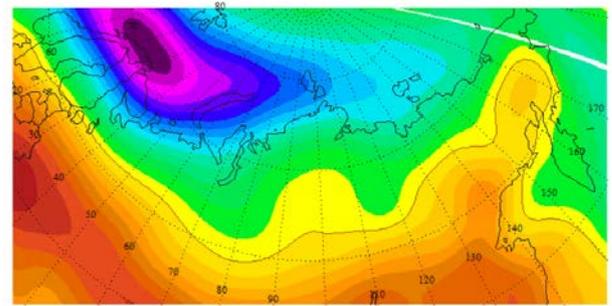
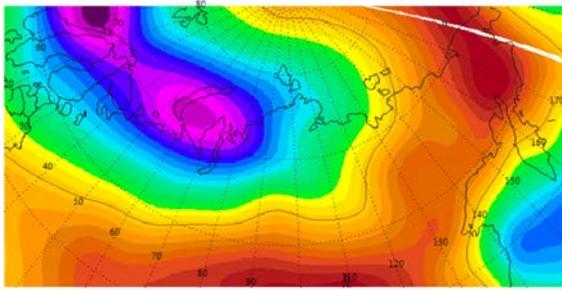
Давление для периода однородной циркуляции 21-25 декабря 2014 года



Давление для периода однородной циркуляции 26-31 декабря 2014 года

Рис 21. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 2014 года.

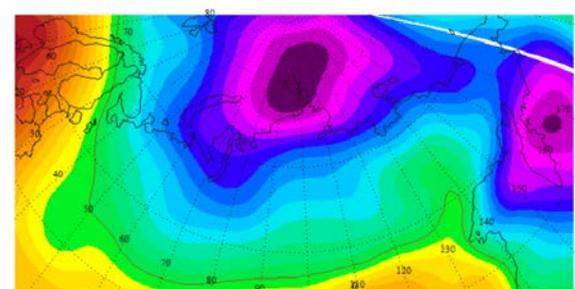
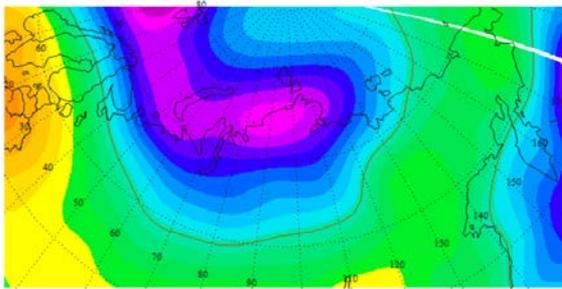
На рисунке 22 в декабре 1992 года наблюдается развитие мощного циклона, который вытесняет циклон за пределы полярного региона РФ.



Давление для периода однородной циркуляции 11-15 декабря 1992 года



Давление для периода однородной циркуляции 16-20 декабря 1992 года



Давление для периода однородной циркуляции 21-25 декабря 1992 года



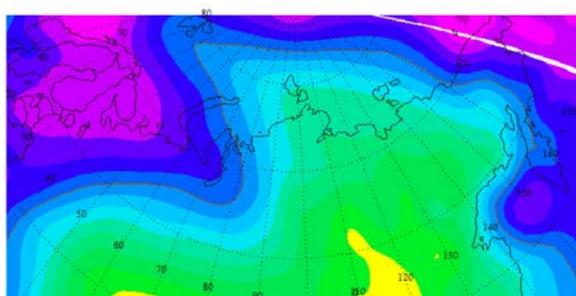
Давление для периода однородной циркуляции 26-31 декабря 1992 года

Рис 22. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 1992 года.

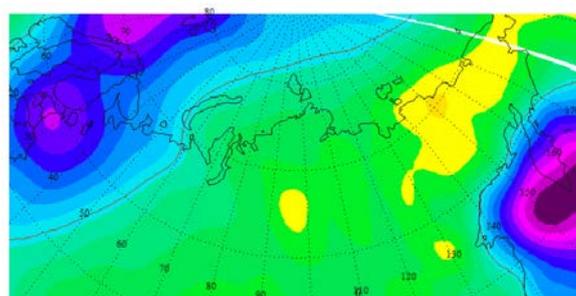
На основе полученно информации можно сделать вывод о том, что при отсутствие ВСП в тропосфере не возможно выявить каких-либо четких закономерностей в перемещении и развитии циклонов и антициклонов в полярных регионах РФ.

Рассмотрим так же карты приземного давления для зим с мощным ВСП, но имеющим не продолжительный характер.

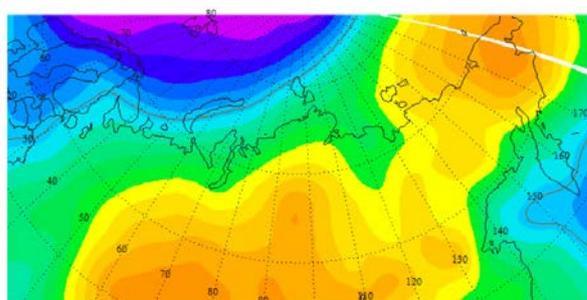
Изучив карты на рисунке 23 за 2012 год видно, что основную площадь полярных регионов РФ занимает монный антициклон, как во время так и после ВСП. Однако продолжительность его воздействия не превышает 2-х недель.



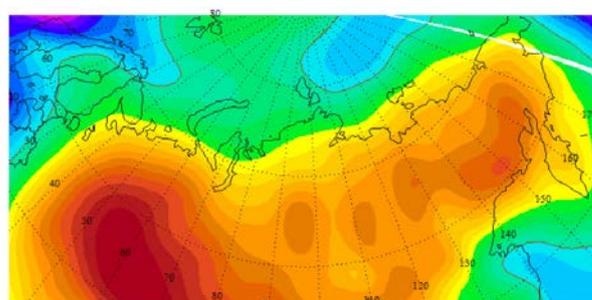
Давление для периода однородной циркуляции 6-10 января 2012 года (до ВСП)



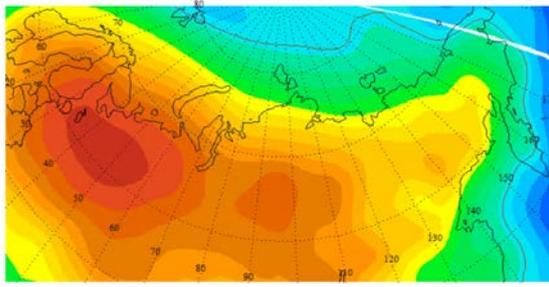
Давление для периода однородной циркуляции 11-15 января 2012 года (до ВСП)



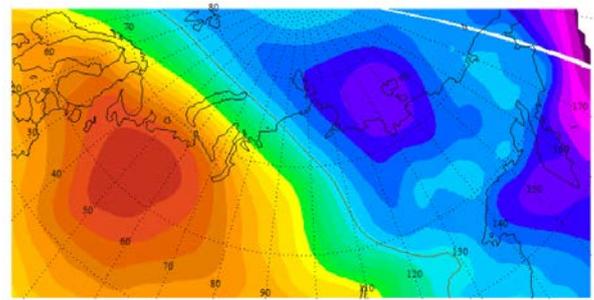
Давление для периода однородной циркуляции 16-20 января 2012 года (во время ВСП)



Давление для периода однородной циркуляции 21-25 января 2012 года (во время ВСП)



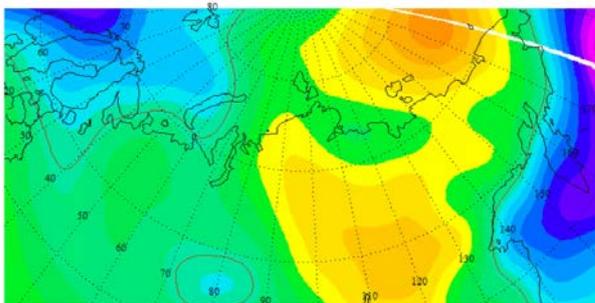
Давление для периода однородной циркуляции 26-31 января 2012 года (после всп)



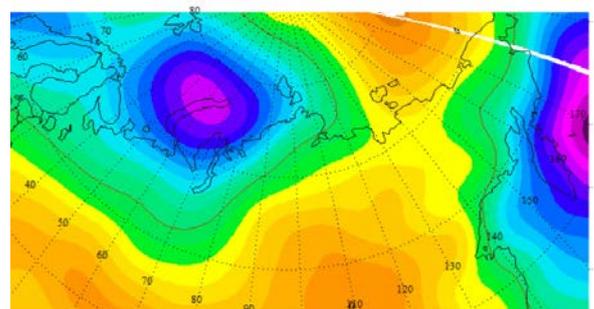
Давление для периода однородной циркуляции 1-5 февраля 2012 года (после всп)

Рис 23. Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 2011-12 года.

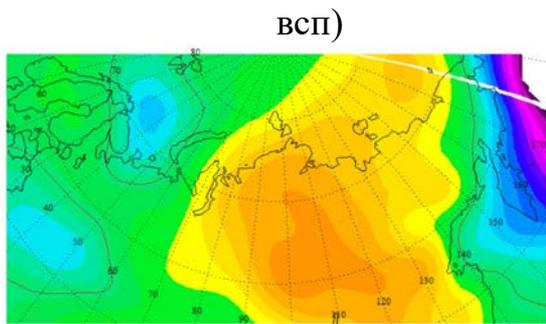
На архивных синоптических картах на рисунке 24 за декабрь-январь 2000-01 годов наблюдается похожая тенденция. Мощный антициклон, который вытягивается на север к полярному кругу. В период до ВСП давление в центре антициклона составляло около 1034-1036 гПа, во время-давление возросло до 1037-1039 гПа, а после составило 1045 гПа, что говорит о постепенном усилении мощности антициклона над полярными регионами РФ.



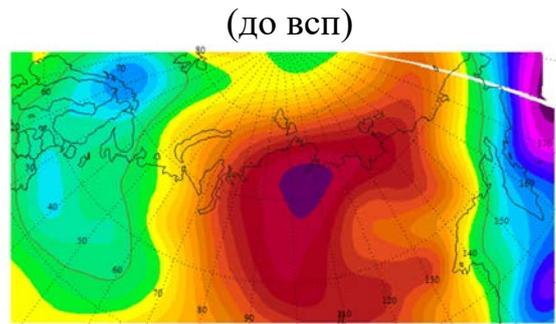
Давление для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 2000 года (до



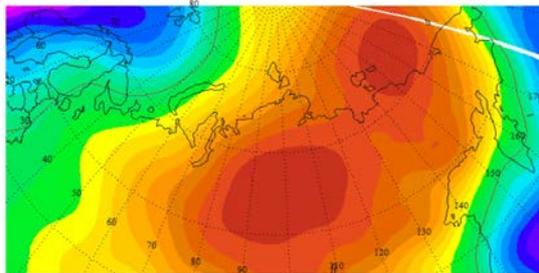
Давление для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 2000 года



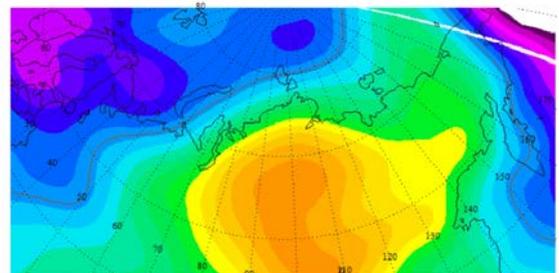
Давление для периода однородной циркуляции 16-20 декабря 2000 года (во время всп)



Давление для периода однородной циркуляции 21-25 декабря 2000 года (во время всп)



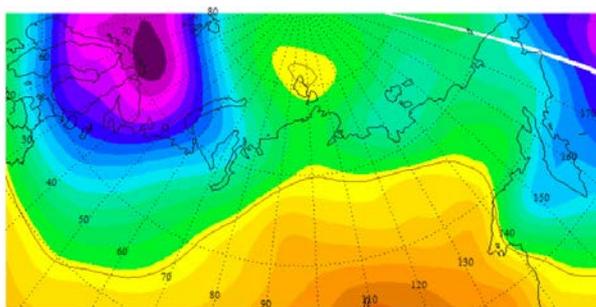
Давление для периода однородной циркуляции 1-5 января 2000 года (после всп)



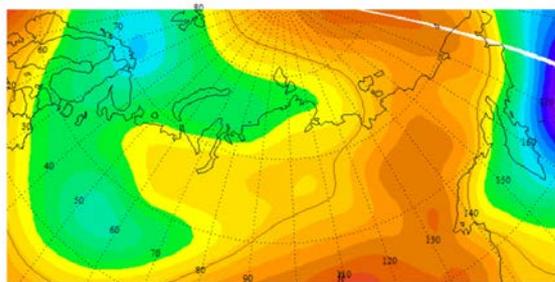
Давление для периода однородной циркуляции 6-10 января 2001 года (после всп)

Рис 24 . Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 2000-01 года.

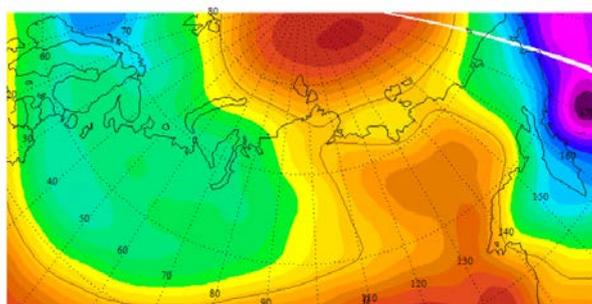
Анализируя карты давления на рисунке 25 в январе 1992 года видно, как происходит развитие антициклона и его вытягивание к полярному кругу, затем наблюдается развитие мощного циклона. Во время ВСП давление в центре антициклона возросло до 1036 гПа, в то время как до ВСП давление составляло около 1030 гПа. После ВСП давление снизилось до 1026 гПа, что свидетельствует о снижении мощности антициклона и уменьшении занимаемой им площади.



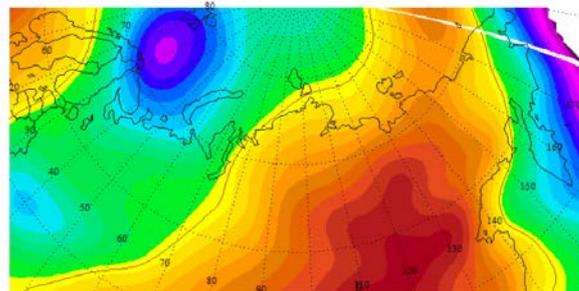
Давление для периода однородной циркуляции 1-5 января 1992 года (до всп)



Давление для периода однородной циркуляции 11-15 января 1992 года (во время всп)

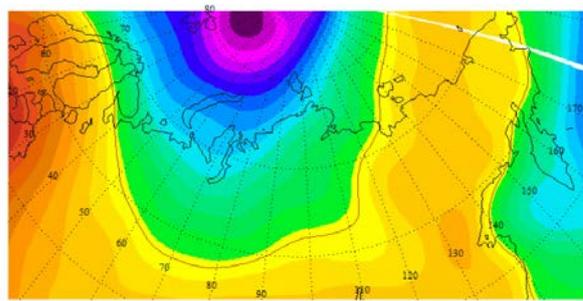


Давление для периода однородной циркуляции 6-10 января 1992 года (до всп)

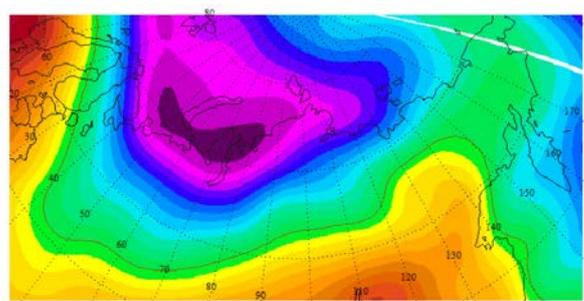


Давление для периода однородной циркуляции 16-20 января 1992 года (во время всп)





Давление для периода однородной циркуляции 21-25 января 1992 года (после всп)



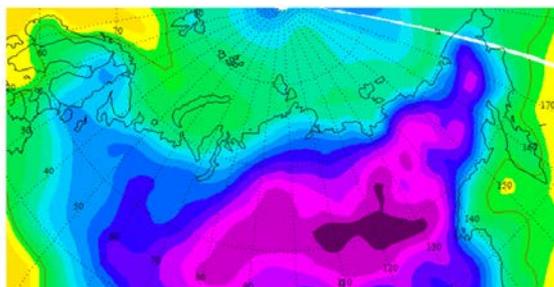
Давление для периода однородной циркуляции 26-31 января 1992 года (после всп)

Рис 25 . Синоптические карты распределения приземного давления для зимы 1991-92 года.

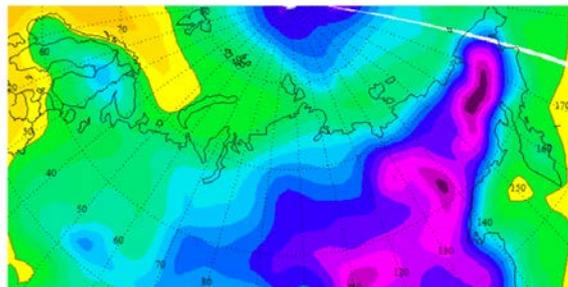
Рассмотрев три случая для зим с ВСП имеющих не продолжительный характер (рис 23,24 и 25) можно придти к выводу, что они довольно схожи с явлением ВСП имеющего продолжительный характер, в эти зимы привалирующую часть полярных регионов РФ также занимает антициклон, который мог быть вызван внезапным стратосферным потеплением. Однако антициклоническая деятельность имеет куда менее продолжительный временной характер воздействия и занимает меньшую площадь по территории действия антициклона на полярные регионы РФ.

### 3.2 Температура.

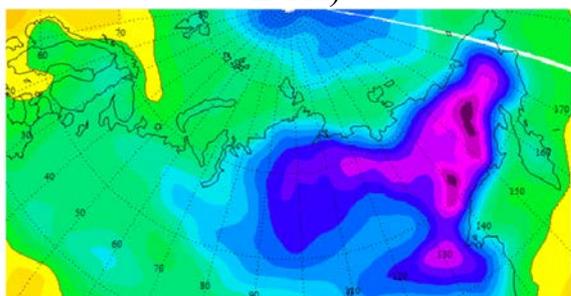
Рассмотрим архивные синоптические карты по распределению температуры для зим с продолжительным ВСП для пяти случаев. Условно период ВСП можно разделить на три временных отрезка: до, во время и после ВСП. Шкалы для каждого из случаев представлены индивидуально, они не общие для всех случаев.



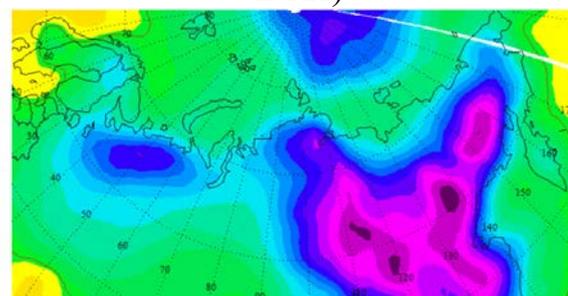
Т2м для периода однородной циркуляции 21-25 ноября 1987 (до ВСП)



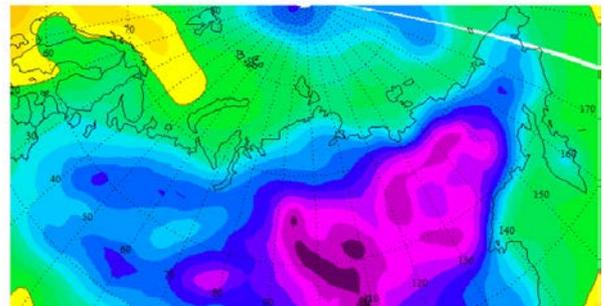
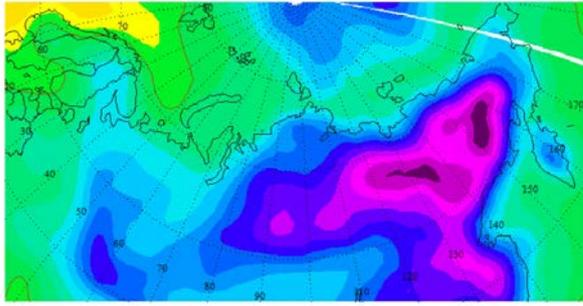
Т2м для периода однородной циркуляции 26-30 ноября 1987 (до ВСП)



Т2м для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1987 (во время ВСП)



Т2м для периода однородной циркуляции 11-15 декабря 1987 (во время ВСП)



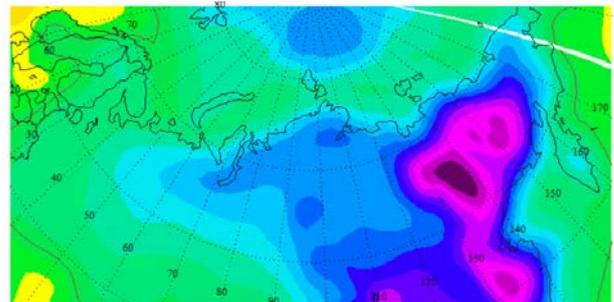
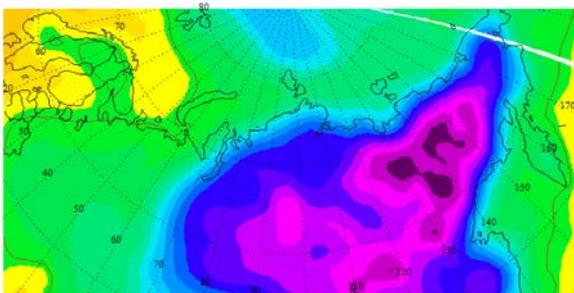
Т2м для периода однородной циркуляции 16-20 января 1988 год (после ВСП)



Т2м для периода однородной циркуляции 21-25 января 1988 год (после ВСП)

Рис 26 . Синоптические карты распределения температуры на высоте 2-х метров для зимы 1987-88 года.

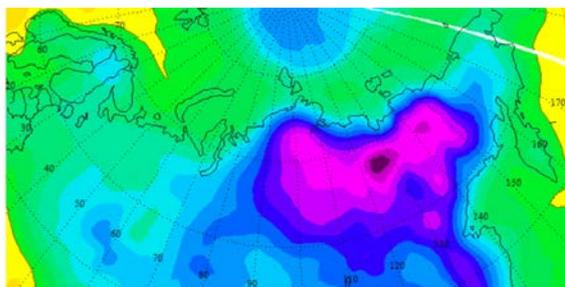
По картам распределения температуры на рисунке 26 для зимы 1987-88 годов для периода до ВСП температура на большей часть территории полярных регионов РФ в среднем варьируется от  $-7^{\circ}$  до  $-27^{\circ}\text{C}$ . Во время ВСП температура существенно снижается до интервала от  $-11^{\circ}$  до  $-31^{\circ}$ , а после от  $-15^{\circ}$  до  $-32^{\circ}\text{C}$ .



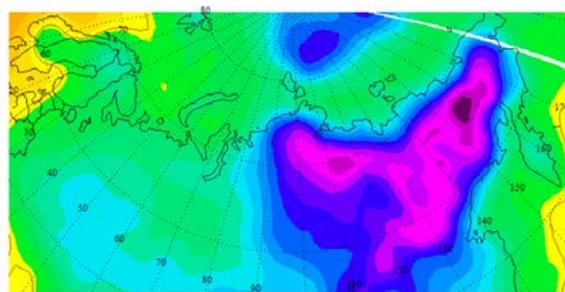
Т2м для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 2003 года (до ВСП)



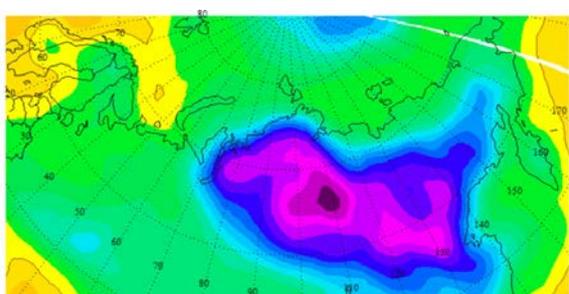
Т2м для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 2003 года (до ВСП)



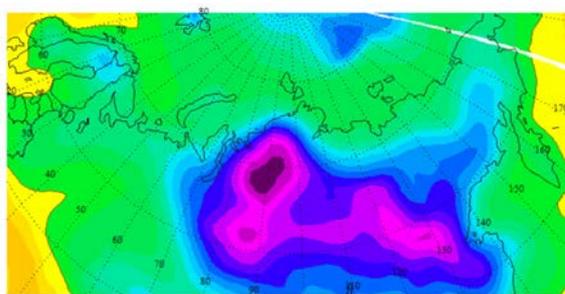
Т2м для периода однородной циркуляции 26-31 января 2004 года (во время ВСП)



Т2м для периода однородной циркуляции 1-5 февраля 2004 года (во время ВСП)



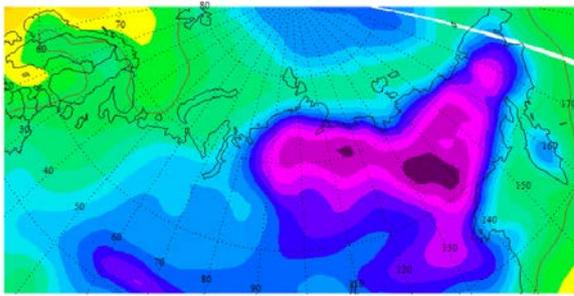
Т2м для периода однородной циркуляции 21-25 февраля 2004 года (после ВСП)



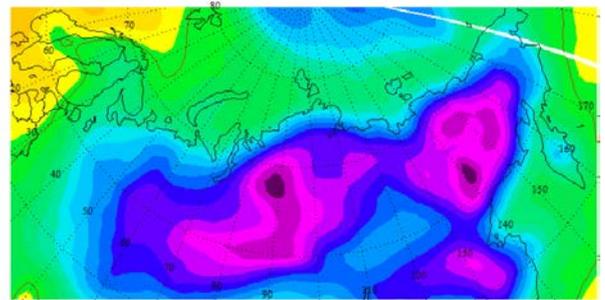
Т2м для периода однородной циркуляции 26-28 февраля 2004 года (после ВСП)

Рис 27 . Синоптические карты распределения температуры на высоте 2-х метров для зимы 2003-04 года.

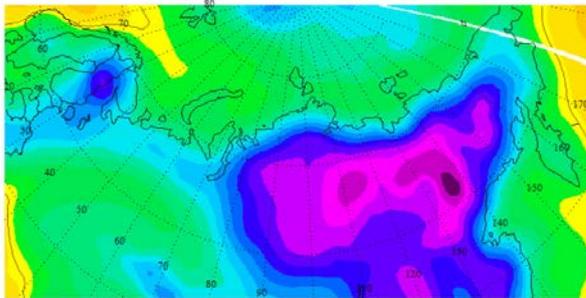
Изучив карты распределения температуры за 2003-04 года представленные на рисунке 27 и разделив его на три временных промежутка, получаем следующие количественные характеристики: до ВСП средняя температура на территории РФ от  $-3^{\circ}$  до  $-27^{\circ}\text{C}$ , во время от  $-10^{\circ}$  до  $-34^{\circ}\text{C}$ , а после от  $-9^{\circ}$  до  $-34^{\circ}$ .



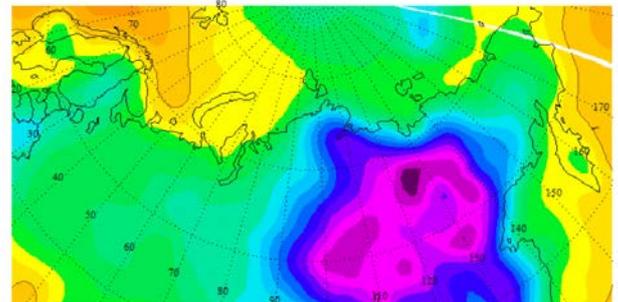
Т2м для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 1984 года (до ВСП)



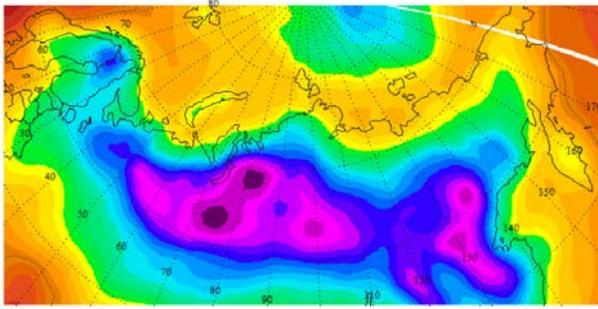
Т2м для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1984 года (до ВСП)



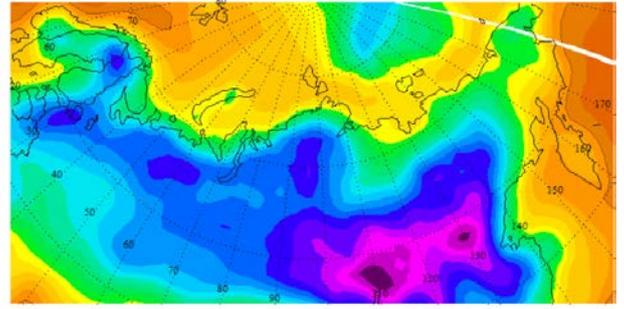
Т2м для периода однородной циркуляции 6-10 января 1985 года (во время ВСП)



Т2м для периода однородной циркуляции 11-15 января 1985 года (во время ВСП)



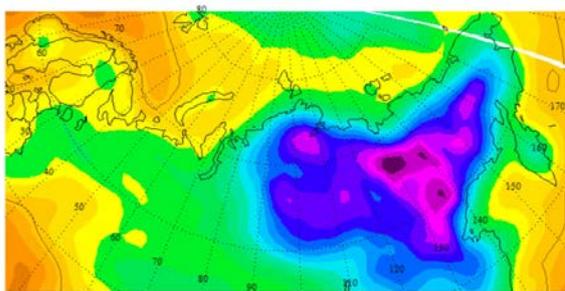
T2м для периода однородной циркуляции 1-5 февраля 1985 года (после ВСП)



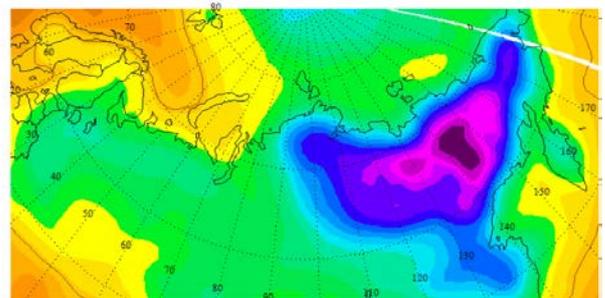
T2м для периода однородной циркуляции 6-10 февраля 1985 года (после ВСП)

Рис 28 . Синоптические карты распределения температуры на высоте 2-х метров для зимы 1984-85 года.

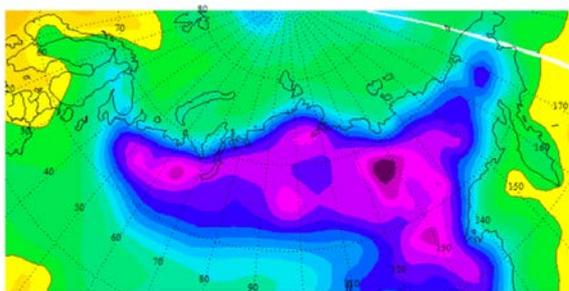
На рисунке 28 представлены синоптические карты за 1984-85 года, по ним были получены следующие данные: до ВСП распределение температуры варьируется от  $-8^{\circ}$  до  $-29^{\circ}\text{C}$ , во время - от  $-11^{\circ}$  до  $-32^{\circ}\text{C}$ , после - от  $-12^{\circ}$  до  $-32^{\circ}\text{C}$ . Однако стоит отметить, что после ВСП вдоль побережья наблюдается так же отрицательные температуры около  $-2^{\circ}\text{C}$ .



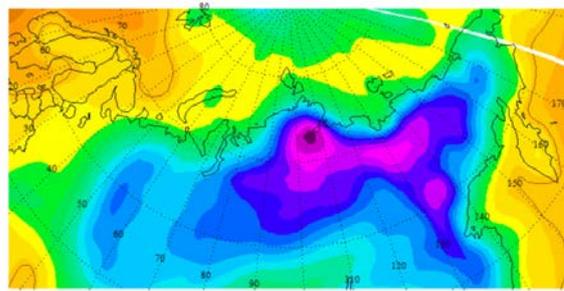
T2м для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1998 года (до ВСП)



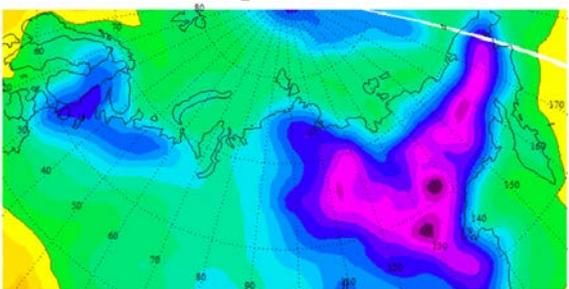
T2м для периода однородной циркуляции 11-15 декабря 1998 года (до ВСП)



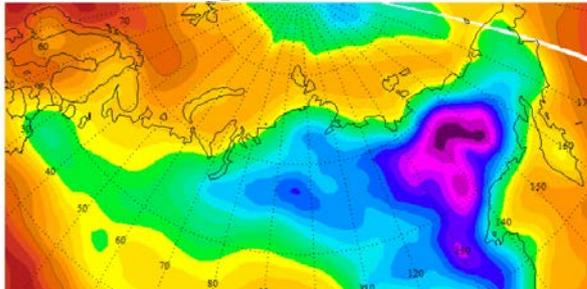
Т2м для периода однородной циркуляции 26-31 декабря 1998 года (во время ВСП)



Т2м для периода однородной циркуляции 1-5 января 1999 года (во время ВСП)



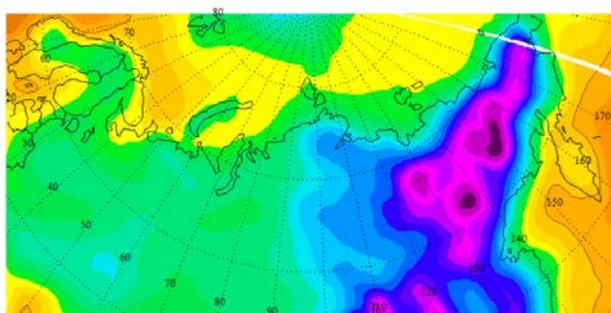
Т2м для периода однородной циркуляции 6-10 февраля 1999 года (после ВСП)



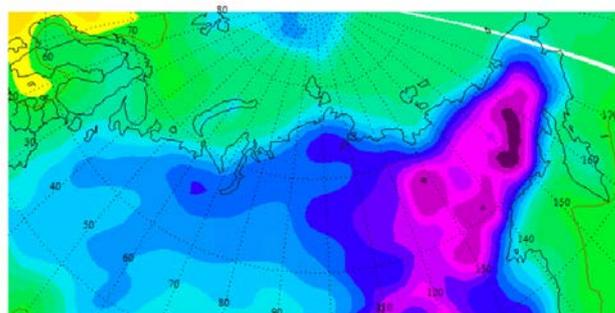
Т2м для периода однородной циркуляции 11-15 февраля 1999 года (после ВСП)

Рис 29 . Синоптические карты распределения температуры на высоте 2-х метров для зимы 1998-99 года.

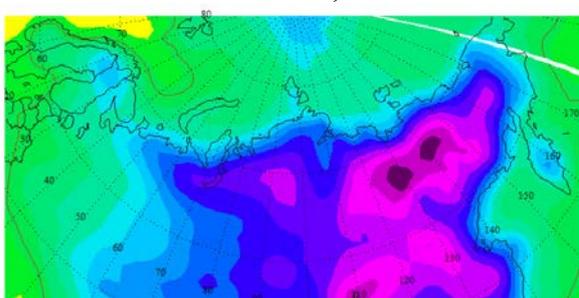
Средние значения распределения температуры полученные за 1998-99 года во время продолжительного ВСП на рисунке 29 следующие: до - от  $-5^{\circ}$  до  $-29^{\circ}$ , во время- от  $-11^{\circ}$  до  $-31^{\circ}\text{C}$ , а после ВСП- от  $-9^{\circ}$  до  $-31^{\circ}\text{C}$ .



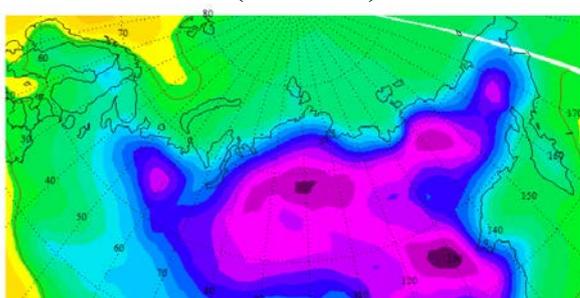
T2m для периода однородной циркуляции 1-5 января 2009 года (до ВСП)



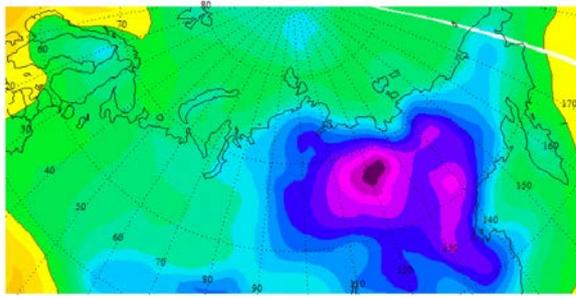
T2m для периода однородной циркуляции 6-10 января 2009 года (до ВСП)



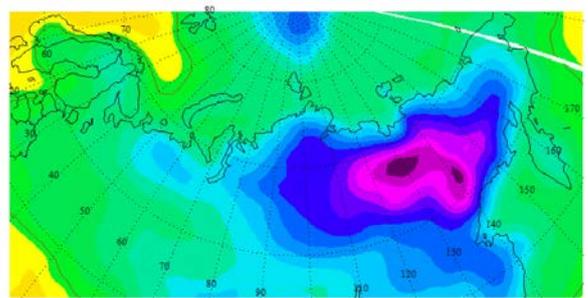
T2m для периода однородной циркуляции 21-25 января 2009 года (во время ВСП)



T2m для периода однородной циркуляции 26-31 января 2009 года (во время ВСП)



T2м для периода однородной циркуляции 26-28 февраля 2009 года (после ВСП)



T2м для периода однородной циркуляции 1-5 марта 2009 года (после ВСП)

Рис 30 . Синоптические карты распределения температуры на высоте 2-х метров для зимы 2008-09 года.

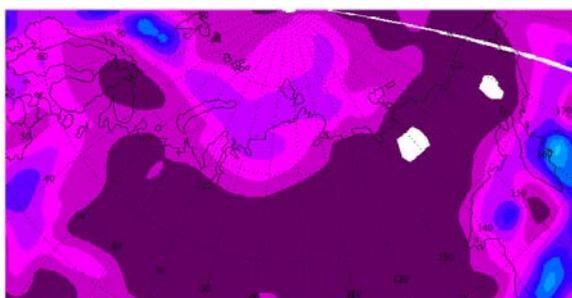
Анализируя полученные карты распределение температуры для полярного региона РФ для зимы 2009 года, представленные на рисунке 30, средняя температура варьируется в следующих диапазонах: до- от  $-7^{\circ}$  до  $-29^{\circ}\text{C}$ , во время- от  $-7^{\circ}$  до  $-34^{\circ}\text{C}$ , после ВСП- от  $-7^{\circ}$  до  $-32^{\circ}\text{C}$ .

Изучив пять случаев для зим с продолжительным ВСП была выявлена следующая закономерность в распределении температуры для полярного региона РФ. Значения температуры во время и после ВСП ниже, чем в период до наблюдаемого явления.

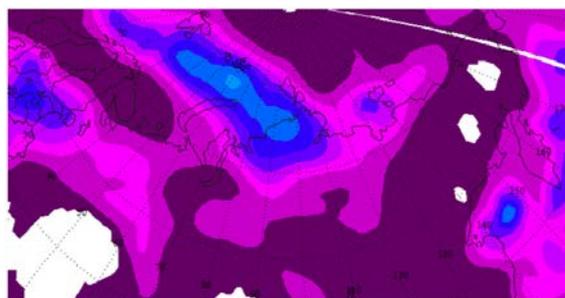
### 3.3 Осадки.

Проанализируем карты распределения осадков для зим с продолжительным ВСП за пять лет. Промежуток исследования был разделен на 3 равных отрезка: до ВСП, во время и после. Осреднение выбрано за пять дней, данные абсолютные. Шкалы для каждой карты индивидуальные.

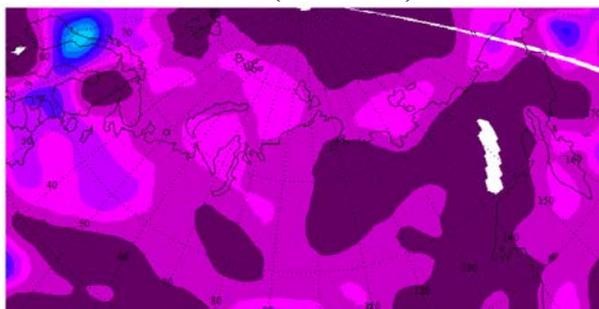
На рисунке 31 наблюдаем следующую картину, во время ВСП происходит увеличение количества осадков на карте, однако уже спустя 2 недели все приходит к аналогичному состоянию, как и за две недели до явления. До ВСП практически полностью отсутствуют осадки над территорией РФ, но ближе к началу ВСП мы наблюдаем небольшую область над п-ов Таймыр с достаточно сильными осадками до 8 мм.



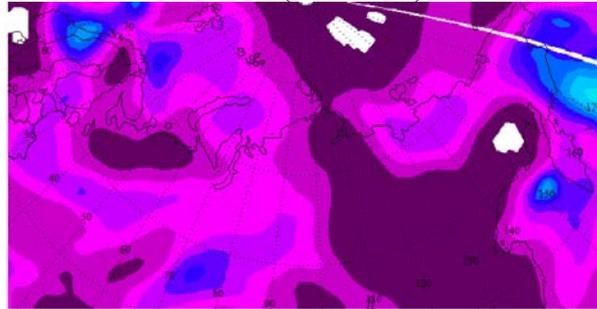
Осадки для периода однородной циркуляции 21-25 ноября 1987 года (до ВСП)



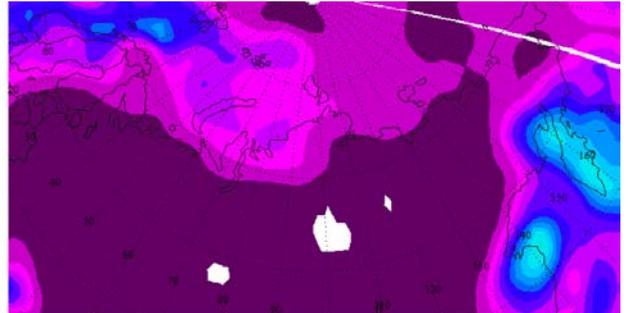
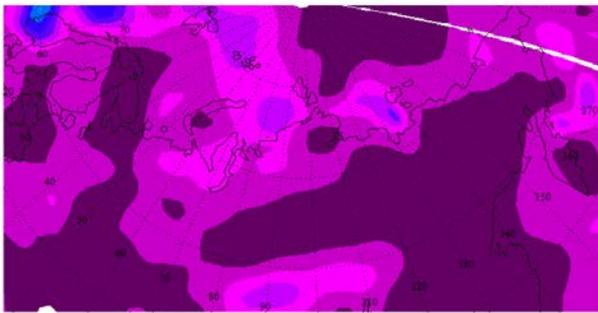
Осадки для периода однородной циркуляции 26-30 ноября 1987 года (до ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1987 года (во время ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 11-15 декабря 1987 года (во время ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 16-20 января 1988 года (после ВСП)

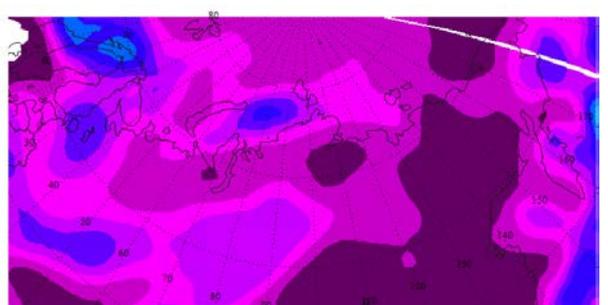
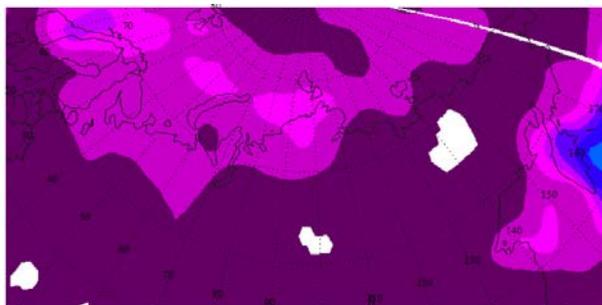


Осадки для периода однородной циркуляции 21-25 января 1988 года (после ВСП)

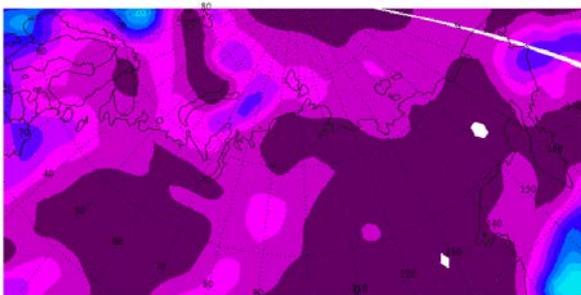
Рис 31 . Синоптические карты распределения осадков для зимы 1987-88 года.

Вовремя ВСП на всей территории мы видим выпадение осадков до 7 мм, кроме Дальне Восточной части РФ. Однако финальные дни ВСП можно наблюдать уменьшение осадков до 4 мм на некоторых участках, а со временем и полное их отсутствие.

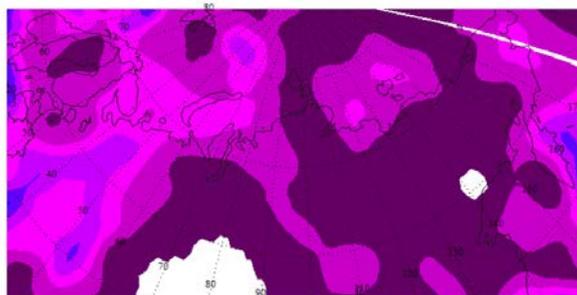
Просмотрев карты на рисунке 32 для зимы 2003-04 года сложно выявить какую-то четкую взаимосвязь.



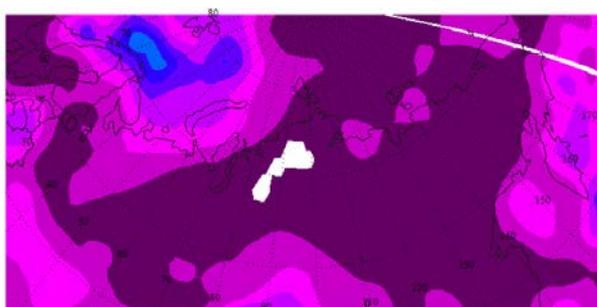
Осадки для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 2003 года (до ВСП)



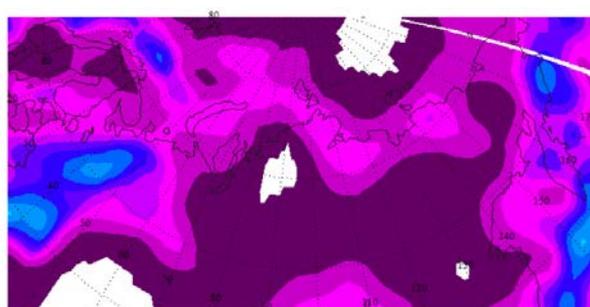
Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 2003 года (до ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 11-15 января 2004 года (во время ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 16-20 января 2004 года (во время ВСП)

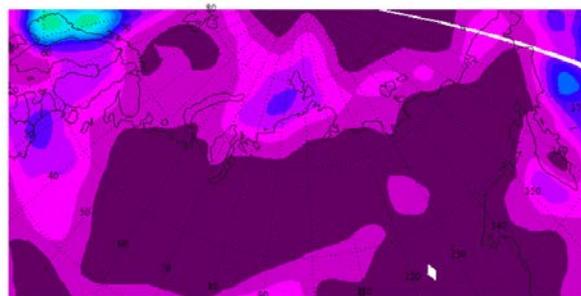
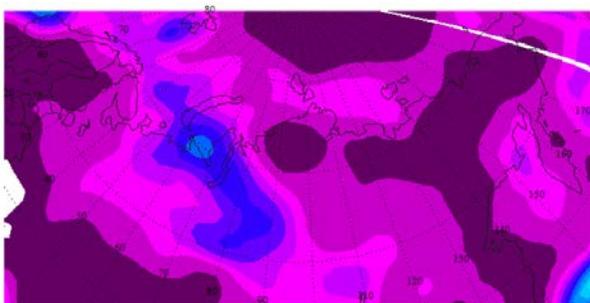


Осадки для периода однородной циркуляции 16-20 февраля 2004 года (после ВСП)

Рис 32 . Синоптические карты распределения осадков для зимы 2003-04 года.

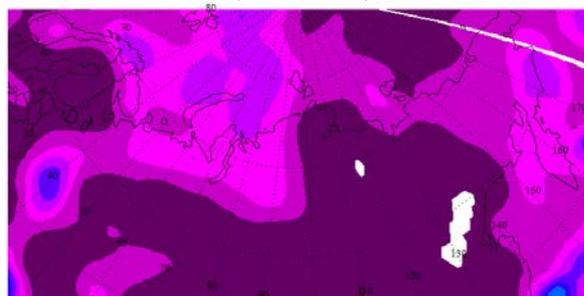
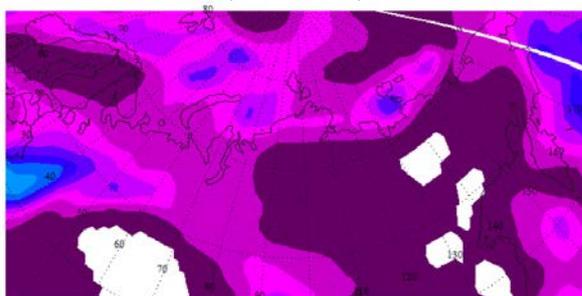
Во время и после ВСП на карте видны центры осадков со значениями около 7 мм.

Изучив карты на рисунке 33 для периода с продолжительным ВСП зимой 1984-85 года сложно определить четкие закономерности распределения и количества осадков.



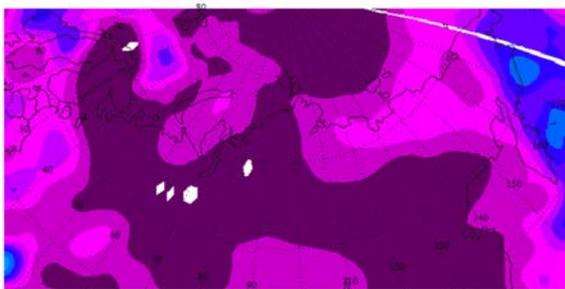
Осадки для периода однородной циркуляции 1-5 декабря 1984 года (до ВСП)

Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1984 года (до ВСП)

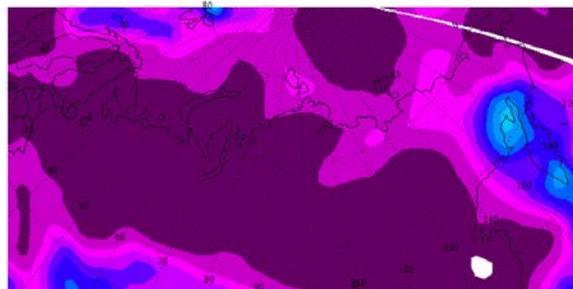


Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 января 1985 года (во время ВСП)

Осадки для периода однородной циркуляции 11-15 января 1985 года (во время ВСП)



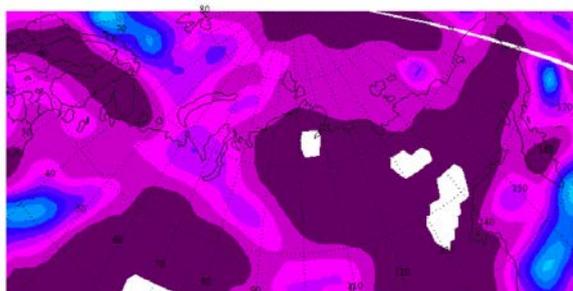
Осадки для периода однородной циркуляции 1-5 февраля 1985 года (после ВСП)



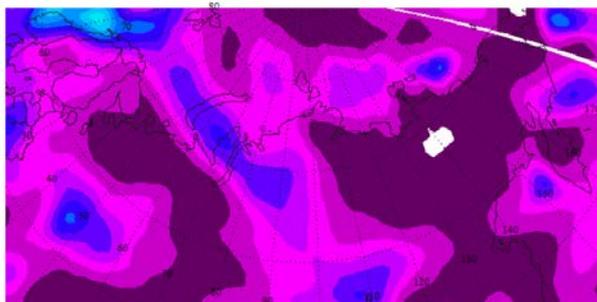
Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 февраля 1985 года (после ВСП)

Рис 33 . Синоптические карты распределения осадков для зимы 1984-85 года.

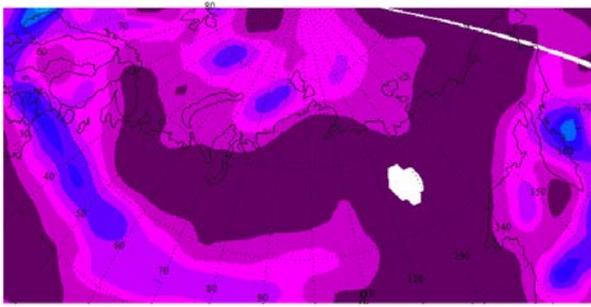
На картах распределения осадков за 1998-99 год на рисунке 34 видно, что площадь выпадения осадков значительно меньше, чем до ВСП. Однако зоны с большим количеством осадков, выше 6 мм есть во все периоды, но до ВСП их больше.



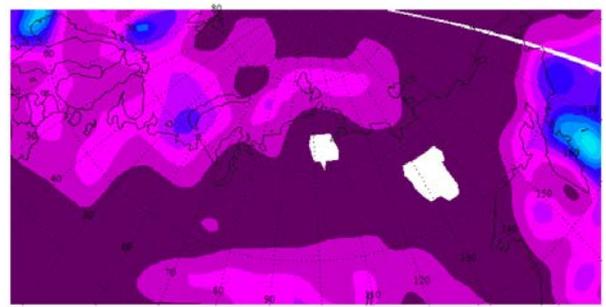
Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1998 года (до ВСП)



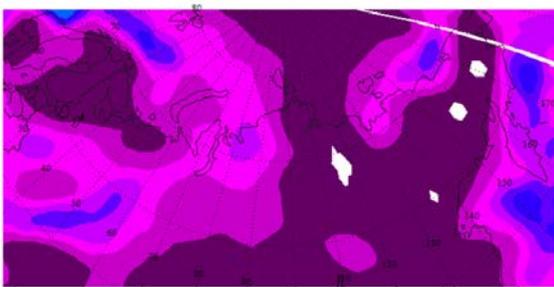
Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 декабря 1998 года (до ВСП)



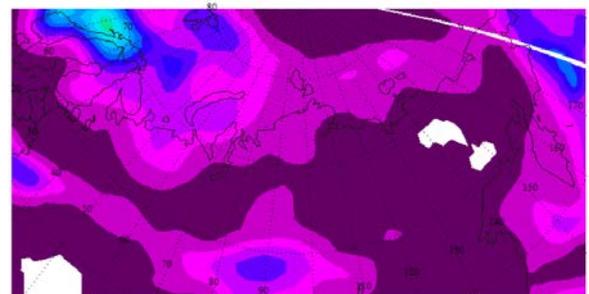
Осадки для периода однородной циркуляции 26-31 декабря 1998 года (во время ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 1-5 января 1999 года (во время ВСП)



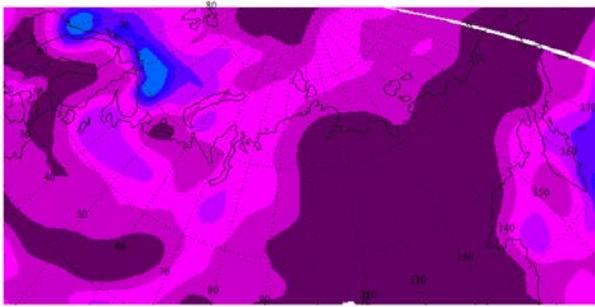
Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 февраля 1999 года (после ВСП)



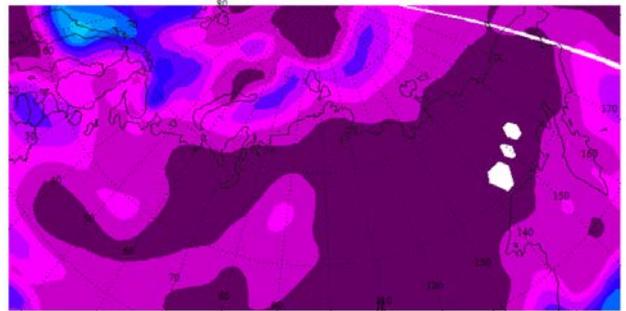
Осадки для периода однородной циркуляции 11-15 февраля 1999 года (после ВСП)

Рис 34 . Синоптические карты распределения осадков для зимы 1998-99 года.

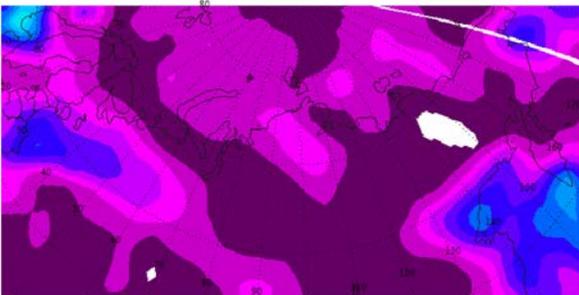
Проанализируем пятый случай продолжительного ВСП на рисунке 35 зимой 2009 года. Распределение зон без осадков не равномерное, сложно проследить какую-либо закономерность, карты постоянно меняются.



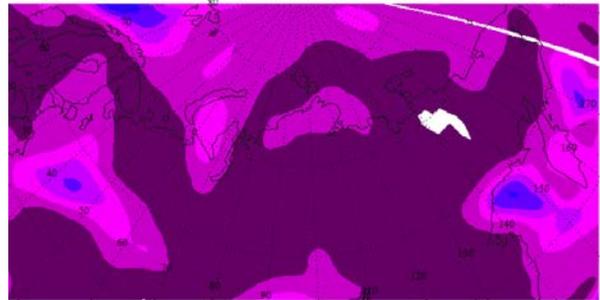
Осадки для периода однородной циркуляции 1-5 января 2009 года (до ВСП)



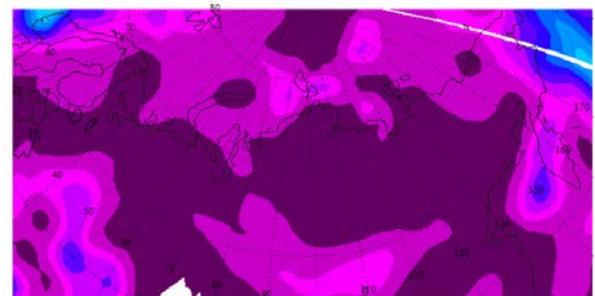
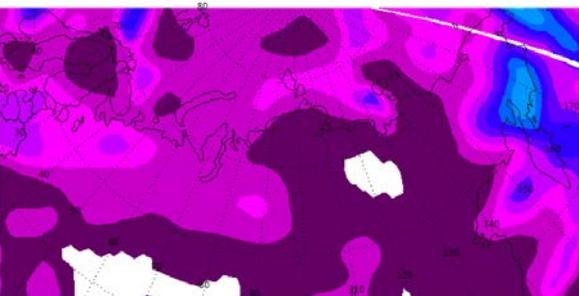
Осадки для периода однородной циркуляции 6-10 января 2009 года (до ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 21-25 января 2009 года (во время ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 25-31 января 2009 года (во время ВСП)



Осадки для периода однородной циркуляции 26-28 февраля 2009 года (после ВСП)

Осадки для периода однородной циркуляции 1-5 марта 2009 года (после ВСП)

Рис 35 . Синоптические карты распределения осадков для зимы 2008-09 года.

Изучив архивные карты по распределению осадков для зим с продолжительным ВСП сложно выявить какие-то общие закономерности.

Заключение.

В результате комплексного анализа распределения среднезонального ветра и аномалий температуры на высотах стратосферы, связанного с событиями внезапных стратосферных потеплений, наблюдавшихся в зимние периоды с 1984 по 2016 гг и соответствующим им полям распределения метеопараметров в полярном регионе РФ были сделаны следующие выводы:

1. В зимы с ВСП над полярными широтами РФ в большинстве случаев наблюдается мощный антициклон как во время, так и после зарегистрированного явления;
2. При продолжительном ВСП действие антициклона более мощное, разница давления составляет более 10 гПа, а длительность увеличивается в 2 раза при сравнении с менее сильными ВСП;
3. В зимние месяцы, которые не сопровождаются аномалией температуры на границе тропосферы-стратосферы в основном преобладает циклоническая деятельность;

4. Во время продолжительного ВСП и после него минимальная температура на  $8^{\circ}$ - $10^{\circ}$ С ниже, чем в период до регистрируемого явления, а максимальная – на  $4$ - $6^{\circ}$ С ниже.
5. Четких закономерностей по распределению осадков не выявлено.

Список используемой литературы.

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] Анисимова А.А., Исследование взаимосвязи явления ВСП с фазами Эль-Ниньо Южного Колебания и фазами КДК, 2018
- [4] Scherhag, R. (1952), Die explosionsartige Stratosphärenerwärmung des Spätwinters 1951/52, ВBeerr. DDTsscch. WWeeettteerrddiieennsstteess, 66,51–63
- [5] <https://eos.org/research-spotlights/what-triggers-intraseasonal-oscillations-inthe-indian-ocean>
- [6] <https://eos.org/research-spotlights/ionosphericwaves-linked-to-polar-atmospheric-dynamics>
- [7] 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
- [8] Bell C., et al. Stratospheric Communication of El Niño Teleconnections to European Winter // J. Climate. 2009. V. 22. P. 4083–4096.  
models // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. P. 2494–2505
- [9] Bell C., et al. Stratospheric Communication of El Niño Teleconnections to European Winter // J. Climate. 2009. V. 22. P. 4083–4096
- [10] Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. – 366 с.

- [11] Allan R.J., Nicholls N., Jones P.D., Butterworth I.J. A Further Extension of the Tahiti-Darwin SOI, Early ENSO and Darwin Pressure // *J. Climate*. – 1991. – Vol. 4. – P. 743–749
- [12] Ropelewski C.F., Jones P.D. An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index // *Mon. Wea. Rev.* –1987. – Vol. 115. – P. 2161–2165.
- [13] Сидоренков Н.С. Методика подготовки данных об особенностях циркуляции атмосферы для мониторинга климата
- [14] 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.
- [15] Cayan, D. R., Redmond, K. T., & Riddle, L. G. (1999). ENSO and hydrologic extremes in the Western United States. *Journal of Climate*, 12, 2881–2893
- [16] Piechota, T. C., Dracup, J. A., & Fovell, R. G. (1997). Western US streamflow and atmospheric circulation patterns during El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Hydrology*, 201(1–4), 249–271.
- [17] Horel, J. D., & Wallace, J. M. (1981). Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 109(4), 8130829. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<8130829>2.0.CO;2)
- [18] Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115(8), 1606–1626.
- [19] Bosilovich, M. G., F. R. Robertson, and J. Chen, 2011: Global energy and water budgets in MERRA. *J. Climate*, 24, 5721–5739, doi:10.1175/2011JCLI4175.1.

- [20] Robertson, F. R., M. G. Bosilovich, J. Chen, and T. L. Miller, 2011: The effect of satellite observing system changes on MERRA water and energy fluxes. *J. Climate*, 24, 5197–5217, doi:10.1175/2011JCLI4227.1
- [21] Reichle, R. H., R. D. Koster, G. J. M. De Lannoy, B. A. Forman, Q. Liu, S. Mahanama, and A. Toure, 2011: Assessment and enhancement of MERRA land surface hydrology estimate
- [22] Rienecker, M. M and Coauthors, 2011: MERRA: NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624–3648, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1
- [23] Kobayashi, S. and Coauthors, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5– 48, doi:10.2151/jmsj.2015-001