

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Савельевой Екатерины Сергеевны «Полярные вихри: причины и последствия аномальной динамики в нижней стратосфере», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы Ковадло Павла Гавриловича

1. Актуальность избранной темы исследования

Диссертация Савельевой Е. С. посвящена мало исследованной проблеме динамических причин формирования и характеристик развития стратосферных циркумполярных вихрей в Северном и Южном полушариях. В непосредственной физико-химической связи с динамикой этих вихрей проявляются изменения плотности стратосферного озонового слоя и его мощности от сезона к сезону и в долгосрочной перспективе. В работе также исследованы вопросы воздействия внешних факторов на развитие циркумполярных вихрей, в частности последствия вулканических выбросов в стратосферу, как на термодинамические параметры циркумполярных вихрей, так и на характеристики озонового слоя, вплоть до критического снижения его содержания. Сложным образом на усиление и ослабление полярных вихрей действует квазидвухлетняя цикличность перемены направлений западных и восточных течений на высотах 16 – 40 км, которые являются особенностью тропической стратосферы

Хотя число работ посвященных указанной проблеме растет, однако многие вопросы не разрешены, поэтому проблема, на которую направлены исследования, изложенные в диссертации, являются актуальными как в модельном представлении, так и в части практического приложения – прогноза климатических изменений

Трудности исследований геофизических процессов в стратосфере заключаются в недостатке данных прямых радиозондовых измерений скоростей ветра, температуры, влажности и, в частности, концентрации озона и других характеристик. Использование ассимилированных данных архивов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA-Interim и ERA5, Европейского космического агентства, Центра космических полетов им. Годдарда, всемирного центра данных по озону и ультрафиолетовому излучению, данных об извержениях вулканов Глобальной программы вулканизма, данных о скоростном режиме воздушных течений в стратосфере на низких и высоких широтах Берлинского института метеорологии, Национального центра прогнозирования параметров окружающей среды и других, требует большой работы по верификации и согласованию данных между разными архивами. Затрудняют такую работу данные, представленные в архивах с разными пространственными и временными шагами. Сразу отмечу, что автор с пониманием использовал данные многочисленных архивов, начиная с

анализа сравнительных характеристик полей скорости и температуры в стратосфере Северного и Южного полушарий, а также особенностей формирования и ослабления полярных вихрей. В результате за период 1979-2020 годы достоверно и убедительно выявлена разница в значениях геопотенциала $0,2 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2$ на границах полярных вихрей на уровнях 50 и 10 гПа в области максимальных перепадов температуры. Эта разница повлияла на оценку площадей полярных вихрей.

Научная новизна.

В ходе решения поставленных задач Савельева Е. С. получила ряд новых научных данных. Наиболее значимыми являются следующие результаты.

1. Изменения температуры нижней субтропической стратосферы усиливают/уменьшают меридиональный градиент температуры в результате которого южный циркумполярный вихрь усиливается или ослабляется. Пик его ежегодного усиления и высокой устойчивости обусловлен тем, что в сентябре рост глобального меридионального градиента температуры дополняется увеличением разности температур субтропической и полярной стратосферы. В северном полушарии наблюдается рассогласованность во времени этих процессов.
2. Увеличение температуры нижней субтропической стратосферы с октября по ноябрь усиливают южный циркумполярный вихрь, блокируя вовлечение внешней воздушной массы, и этот процесс сопровождается аномальным разрушением озона вплоть до катастрофического – возникновения “озоновых дыр”.
3. Крупные извержения вулканов с высотой выброса более 18 км, происходящие в период с сентября по декабрь, приводят потеплению в нижней тропической стратосфере и, соответственно, к усилению северного циркумполярного вихря и формированию озоновых понижений концентраций в зоне действия вихря с конца февраля по апрель.
4. Разработаны численные критерии аномального ослабления циркумполярного вихря в виде снижения площади до критической в 10^6 км^2 , и снижении скорости ветра по границе вихря до 30 и 45 м/с, соответственно, в нижней и средней стратосфере.
5. Разрушения озона в зоне действия циркумполярного вихря не наблюдается, если ослабление динамического барьера вихря, характеризуется локальным уменьшением скорости ветра по границе вихря ниже 20 м/с и разрушением частиц полярных стратосферных облаков внутри вихря.

Анализ содержания работы.

Диссертация Савельевой Е.С. состоит из введения, пяти глав текста, заключения и библиографического списка из 520 наименований. Текст изложен на 273 страницах,

включая 21 таблицу и 87 рисунков. По теме диссертации опубликовано 75 научных работ, в том числе одна монография, 28 статей в журналах, включенных в специальный перечень рецензируемых научных изданий, 10 статей в зарубежных научных журналах, входящих в первый и второй квартиль, 18 статей в российских научных журналах, 13 - в сборниках трудов международных конференций и симпозиумов.

Во введении автор описывает актуальность имеющейся научной проблемы, формулирует цель, задачи и методы исследования. Далее показаны основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, личный вклад, апробация работы и публикации по теме диссертации.

В первой главе работы сделан обзор опубликованных по теме результатов, в том числе и собственных, а также приведены общие сведения об условиях формирования циркумполярных вихрей. Введены понятия завихренности, потенциал завихренности, описываемый уравнением вихря Эртеля, эффективная глубина вихря, понятия относительного и абсолютного вихрей, знак вихря, силовые компоненты, под действием которых формируется кривизна воздушного течения, геопотенциал и другие.

Рассмотрены известные схемы выхода планетарных волн Россби в стратосферу, взаимодействие вихревых движений с зональным течением, формирование вихревого потока тепла и связанного с этим явлением, так называемого, внезапного атмосферного потепления. Деформация стратосферного температурного поля приводит к ослаблению циркумполярного вихря или даже к его разрушению. Повышение вихревого потока тепла в средних и высоких широтах на уровне 100 гПа ослабляет полярный вихрь и приводит к его расщеплению. В связи с аномальным повышением температуры в нижней стратосфере может измениться знак меридионального градиента температуры, а западный циркумполярный поток переменится на восточный.

Автором подчеркнута, что интенсивность вихря зависит от радиальной разности температуры внутри вихря и его периферии, с понижением температуры центральной части, вихрь усиливается, изменяется его механика взаимодействия с зональным потоком. Таким образом, формируется сезонная динамика вихря под действием течений общей циркуляции атмосферы.

Процессы сезонных и годовых изменений характеристик полярных вихрей в обоих полушариях анализируются в сравнении как внутри годовых, так и межгодовых аномалий за последние 40 лет на уровнях 100, 50 и 10 гПа по данным реанализа ERA-Interim. Арктический циркумполярный вихрь достигает пика активности в декабре-январе и ослабевает в марте, Антарктический циркумполярный вихрь развивается до максимума

активности в августе-сентябре и к декабрю ослабевает. Автор работы отмечает, что оба вихря имеют максимальные скорости в верхней стратосфере, но более устойчивым по динамическим характеристикам является Антарктический, кроме того он имеет круглую форму центрированную на полюс, тогда как форма Северного вихря вытянутая и подвержена изменениям ее по площади и ориентации. Кроме этого, жизненный цикл Северного в 1,5 – 2,5 раза короче, по площади меньше в 1,7 раза и в 2,5 слабее по скорости Южного. Период критически низких температур (ниже -78°C) для формирования полярных стратосферных облаков над Антарктикой в среднем 2,5 раза больше, а по площади превышает в 5 раз. Приведенные в диссертации результаты анализа данных прямых радиозондовых измерений и архивных (ассимилированных) подтверждают и уточняют известные феноменологические характеристики полярных вихрей.

В диссертации показан механизм внутри и межгодовой изменчивости вихрей, который тесно связан с изменениями температуры, как в нижней, так и в верхней стратосфере. Усиление вихря приводит к понижению температуры в нижних слоях стратосферы и к повышению в верхних. В работе отмечено, что над Арктикой в многолетних средних полях температуры вихрь выражен слабо, в связи с его высокой изменчивостью. Вариации температуры в верхней стратосфере напрямую зависят от плотности содержания озона и косвенно зависят от динамических характеристик вихря. При понижении содержания озона внутри развитого вихря в верхней стратосфере температура повышается. С другой стороны, усиление вихря приводит к локализации (ослаблению массообмена) воздушной массы вихря и концентрация озона снижается.

Этому важному процессу уделено в диссертации особое внимание. В реферативном порядке проанализированы основные опубликованные результаты синтеза озона и условий его разрушения. Подробно рассмотрены основные химические реакции и генерация озона, фотохимический цикл озона в чисто кислородной атмосфере по С. Чепмену и его расходу в зависимости от содержания активного аэрозоля. С появлением солнечного излучения в конце полярной ночи запускается хлорный цикл разрушения озона. При условии хорошо развитого полярного вихря, концентрация озона снижается до минимальных значений (менее 220 единиц Добсона). Показано влияние скоростного режима вихря на уровень содержания озона в его разных высотных слоях.

Проанализированы события аномального содержания озона в разные годы и указаны возможные причины этого явления. Согласно гипотезе Холтона-Тана (the Holton-Tan mechanism) квази-двухлетний цикл (КДЦ) влияет на динамику Арктического и Антарктического циркумполярных вихрей. Восточная фаза КДЦ ослабляет полярный

вихрь, западная – усиливает. В соответствие с этим меняется и концентрация озона в пределах вихря. Более сложно и менее эффективно влияет на динамику арктического циркумполярного вихря внутрисезонная тропическая осцилляция Маддена-Джулиана в тропосфере, проявляющаяся в периодическом движении в восточном направлении - вдоль экваториального пояса конвективной облачности и способствует понижению температуры в стратосфере.

В конце первой главы сделан обзор опубликованных результатов аномального разрушения озона в Арктике и проведен собственный анализ причин катастрофических аномалий 1996-1997, когда зарегистрированные значения концентрации озона опускались ниже 220 ед. Добсона. В этот период вихрь развился до больших масштабов. Аналогичная аномалия озона наблюдалась в 2020 году с марта по апрель по такому же сценарию, хотя вихрь был меньших масштабов, но интенсивнее. Высокое содержание озона в полярной стратосфере автор связывает с ослаблением циркумполярного вихря. В свою очередь, ослабление полярного вихря происходит при аномальном усилении вихревого потока тепла в нижней стратосфере и возникновении внезапного стратосферного потепления.

В частности, на динамику вихря в зимне-весенний период повлияло усиление планетарных волн и увеличение тепловых потоков Элиассена-Пальма. Автором было проверено это положение по архивным данным и показана высокая согласованность этих явлений. По результатам исследований в конце главы сформулирован итоговый вывод о том, что антарктический циркумполярный вихрь более мощный и устойчивый во времени, чем арктический, а пик активности находится в нижней стратосфере. Здесь возникает претензия к автору, почему не отражен в выводе существенный, если не главный результат о вариациях концентрации озона в области вихря, которые в отдельные годы снижаются до катастрофических.

Содержание обзора свидетельствует о хорошем знании диссертантом современного состояния решаемой научной проблемы, что также подтверждается цитированием большого количества статей - 237 наименований, включая собственные.

В главе второй диссертации Савельевой Е.С. исследовано влияние внеполярной стратосферы на динамику полярных вихрей. Основное внимание уделено прогреву тропической и субтропической стратосферы и формированию меридионального градиента температуры. От величины этого градиента зависит активность циркумполярных вихрей в разные сезоны года. В частности арктический полярный вихрь достигает пика активности в январе-феврале, а в последующие два месяца разрушается. Зеркально со сдвигом во времени – максимальные скорости ветра антарктического вихря в нижней стратосфере

достигают в сентябре и удерживаются до октября-ноября, после чего ослабевают и вихрь начинает разрушаться. В работе показана на уровне значимых корреляций прямая связь роста зонального ветра с ростом температуры воздуха в нижней тропической и субтропической стратосфере. Смещение температурного максимума в северное или южное полушарие в течение года приводит к усилению зонального ветра, соответственно, к усилению южного или северного полярных вихрей. Автором подмечено, что в Южном полушарии сезонные максимумы температуры воздуха в нижней субтропической стратосфере согласуются с максимумами скорости зонального ветра в этих же слоях. В Северном полушарии такая согласованность отсутствует, рассогласование составляет порядка месяца.

Два параграфа диссертации (2.2 и 2.3) посвящен анализу причин более мощного по сравнению с северным развития южного циркумполярного вихря, как по силе, так и по площади и связанное с этим явлением частые катастрофические снижения концентрации озона в пределах вихря. Стратосферные полярные вихри формируются благодаря сезонному увеличению стратосферного меридионального температурного градиента. В соответствии с тем, что величина градиента зависит от ряда термодинамических факторов, действующих в стратосфере сезонно в разных полушариях, интенсивность зональных потоков в разных полушариях наблюдается разная. Высокая развитость южного циркумполярного вихря и его ежегодное усиление в сентябре-октябре обусловлено сезонным повышением температуры воздуха нижней субтропической стратосферы, тем самым дает прирост общему меридиональному градиенту температуры и, соответственно, прирост силы барического градиента (термический ветер складывается с градиентным). Напрашивается естественный вывод, два источника силы, действующие в одном направлении, обеспечивают большую устойчивость вихрю. Этот вывод явно в тексте диссертации отсутствует.

В связи с этим добавлением, следует заметить, что таких не законченных выводов, делающих полученный результат исследований более наглядным и весомым, встречается в каждой главе, том числе и в основных положениях, вынесенных на защиту.

Аналогичная не полная формулировка дана важному новому результату – причине ослабленного развития и меньшей устойчивости северного циркумполярного вихря, которая заключается в полуторамесячном рассогласовании сезонного изменения температуры воздуха в нижней тропосфере субтропиков и развития внутригодового стратосферного меридионального барического градиента. При такой разнице во времени, термический ветер не дает суммарного эффекта со слабым градиентным ветром. Более того, в результате северный циркумполярный вихрь менее стабилен во времени, имеет

деформированную форму и подвержен внешним воздействиям. Отсюда следует, что внутривихревая воздушная масса слабее изолирована от внешнего притока, по сравнению с воздушной массой более развитого южного циркумполярного вихря. Вероятность катастрофических понижений концентрации озона в зоне действия северного циркумполярного вихря по указанной причине гораздо ниже, чем южного циркумполярного вихря.

В третьей главе приведены результаты исследований влияния вулканических извержений на динамику циркумполярных вихрей и связанную с этими явлениями колебания концентрации стратосферного озона в зонах действия этих вихрей.

Раздельно рассмотрено влияние вулканов, действующих в низких и высоких широтах. В диссертации приведен список мощных вулканических событий с 1815 г по 2020 г. Фактически все вулканические события так или иначе отражаются на геофизических характеристиках тропосферы. В работе показано, что наибольшее воздействие на динамику стратосферы оказывают извержения с выбросом вулканической массы выше тропопаузы. Если выбросы происходят в тропических и субтропических широтах, то они оказывают разогревающее действие на воздушные тропосферные стратосферные массы увеличивают меридиональные градиенты температуры и усиливают вихри. Однако, как отмечает автор, в период с 1979 по 2020 гг. не наблюдалось усиления антарктического циркумполярного вихря в результате вулканогенного разогрева тропической стратосферы, хотя произошло более 70 извержений включая, крупнейшее – вулкан Пинатубо.

Приводится другой пример, весеннее усиление в 2011 году арктического циркумполярного вихря привело к образованию одного из крупнейших озоновых снижений концентрации после извержения вулкана Мерапи в Индонезии с высотой выброса вулканической массы на высоту 18,3 км. Отмечается, что после крупных вулканических извержений, происходящих с выбросом в стратосферу, в нижней тропической стратосфере наблюдается повышение температуры воздуха в течение полугода. Согласно полученным результатам, последствия предсказуемы – следует усиление циркумполярных вихрей, вероятность снижения концентраций озона ниже критических в зоне действия вихрей возрастает.

В работе подробно исследовано влияние извержений внетропических вулканов на полярные озоновые аномалии (разделы 3.3 -3.4). Получены новые результаты и уточнены уже известные. Если вулканогенный аэрозоль приносится в тропическую или полярную стратосферу, то он способствует формированию условий к снижению концентрации озона и усилению этого снижения. В тропической стратосфере вулканогенный аэрозоль за счет

поглощения длинноволнового излучения Земли и коротковолнового солнечного излучения приводит к нагреву воздуха, увеличению стратосферного температурного градиента и последующему усилению циркумполярного вихря. Усиление вихря сопровождается снижением концентрации озона. В полярной стратосфере вулканогенный аэрозоль вовлекается в полярный вихрь и усиливает реакции разрушения озона, кроме этого способствует увеличению облачности.

Результаты исследований в третьей главе суммированы в формулировке третьего защищаемого положения. Крупные извержения тропических вулканов усиливают северный циркумполярный вихрь и формируют аномальное снижение концентрации озона в области вихря. Приведен обобщенный на основе результатов трех глав вывод: ключевую роль в формировании усилении и ослаблении циркумполярных вихрей играет стратосферный меридиональный градиент температуры. Надо отметить, что вывод слишком общий и не отражает всех полученных результатов в этой главе. Например, важным и новым является выявленный следующий феномен. После извержения вулкана Пинатубо в июне 1991 г. температура нижней тропической стратосферы повысилась на 3° и сохранялась в течение почти 2 лет, однако это не повлияло на усиление и другие характеристики южного циркумполярного вихря, в том числе на концентрацию озона в зоне его действия. И эта ситуация характерна для южного циркумполярного вихря за период с 1979 по 2020 гг.

В четвертой главе исследованы особенности динамики стратосферных циркумполярных вихрей. Речь идет об оценке скорости ветра по границе вихря и средней температуре внутри вихря. Автором разработан и предложен метод оценки основных параметров вихря, основанный на его оконтуривании. По мнению автора, основанного на практическом опыте, для определения границ полярного вихря в стратосфере наилучшим образом подходят поля данных геопотенциала, как в нижней, так и средней стратосферы. Для реализации этого метода оценки на уровнях 50 и 10 гПа использовались ассимилированные данные архива ERA5 с пространственным разрешением $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ за 1079-2020 гг. период. Этот же архив данных привлекался для анализа скорости зонального и меридионального ветров, и средней температуры воздуха на указанных уровнях.

Предложенным методом оценивались геометрические характеристики полярных вихрей, площадь и объем воздушной массы вихря, что позволило их дифференцировать по степени развитости и связать это с площадью и объемом. Зная границы - определять средние значения температуры воздуха и массовое отношение смеси озона внутри вихря.

Разработанный метод в процессе анализа данных убедительно подтвердил свою эффективность. Удалось сравнить северный и южный полярные вихри по ряду характеристик - по мощности на границе вихря на разных уровнях, по изменениям температуры воздуха внутри вихря в зависимости от скорости ветра на границе вихря в разные стадии его развития и другие. Было выявлено критическое значение скорости ветра по границе вихря, при котором еще существует динамический барьер – 20 м/с.

Примечательный результат получен из анализа площади вихря на разных стадиях его развития. При уменьшении площади вихря ниже 10^6 км² во всех случаях происходит ослабление вихря по скорости ветра (на границе скорость уменьшается до 20 м/с и ниже), ослабление динамического барьера вихря, роста температуры и разрушение вихря в последующие 2-3 недели. Однако в выводах к главе 4 сказано, что при уменьшении площади арктического вихря ниже 10^6 км² на границе вихря скорость ветра составляет более 30,1 м/с, антарктического вихря той же площади также более 30,1 м/с в нижней стратосфере. Отсюда можно понять что, несмотря на ослабление по площади, динамический барьер вихри сохраняют. В выводах 3, стр.169 при снижении площади вихря ниже 10^6 км² при скорости ветра на границе вихря «ниже 30 и 45 м/с» в нижней и средней стратосфере полярный вихрь становится небольшим циклоном и разрушается в течение 3 недель. В тексте разъяснение по этому вопросу отсутствует.

Разделы 4.2 - 4.4 посвящены анализу аномальных проявлений в усилении и ослаблении, соответственно, арктического и антарктического циркумполярных вихрей во время катастрофических снижений концентрации озона и в период крупнейшего внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. На основе расчетов и оконтуривания, оценены параметры и трансформация северного циркумполярного вихря, при которых наблюдались наиболее крупные арктические озоновые аномалии за период с 1979 по 2019 гг. Получены новые результаты. На основе метода оконтуривания дано описание аномальных усилений арктических циркумполярных вихрей в 1997, 2011 и 2020 гг., которые сопровождалось формированием глубоких понижений концентрации озона. Анализ показал, что все имели большую площадь и интенсивность. Наиболее сильный из них в 2020 г имел наибольшую площадь и был симметричен относительно полюса.

Профессионально дано описание трансформации арктического полярного вихря во время крупнейшего за весь период наблюдений внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. Констатирован факт, вихрь распался на две составляющие в средней и нижней стратосфере, и сократился по площади новых вихрей ниже 10^6 км² с одновременным уменьшением скорости и стремительным повышением содержания озона. Аналогично при внезапном атмосферном потеплении распался антарктический

циркумполярный вихрь. Причиной внезапного потепления, без указания подробностей, в стратосфере названо тепловое воздействие вертикально распространяющейся планетарной волны.

Здесь следует отметить, что название параграфов 4.2 - 4.4 не соответствуют тексту и вводят в заблуждение читателя.

В пятой главе на многочисленных примерах, выбранных из наблюдений, исследуются последствия ослабления динамического барьера циркумполярного вихря. Частично эти вопросы рассматривались в четвертой главе. Здесь обобщены результаты развития циркумполярных вихрей с точки зрения арктических озоновых аномалий, внезапных стратосферных потеплений и развития и разрушения полярных стратосферных облаков в областях действия вихрей. Наиболее значимый результат получен при исследовании локального ослабления динамического барьера циркумполярного вихря, который сопровождается ростом температуры воздуха и разрушением частиц стратосферных облаков. Кроме этого, происходит изменение газового и аэрозольного состава воздуха внутри вихря до его первоначального состояния – в начальной стадии формирования вихря воздух не содержит продуктов гетерогенных реакций, поэтому активного разрушения озона не происходит, даже если вихрь усилился и вырос объем облачных стратосферных частиц. Этот результат вынесен на защиту.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Диссертация Савельевой Е.С. характеризуется несомненной научной ценностью. В частности, полученные результаты вносят достойный вклад в существующие представления о динамике стратосферных циркумполярных вихрей и важны при решении важной в практическом отношении проблеме влияния процессов происходящих во внеполярной стратосфере на формирование полярных озоновых аномалий. Кроме того, полученные данные являются полезным дополнением к современным представлениям о глобальных климатических переменах. Её результаты могут быть использованы в экологических мероприятиях освоения северных и южных полярных территорий.

Степень обоснованности, достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационной работы являются обоснованными как результатами проведенного собственного исследования, так и общепринятыми концепциями современной физики строения тропосферы и стратосферы.

Общая оценка работы и ее соответствие требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация Савельевой Е. С. представляет собой важное, интересное и профессионально выполненное исследование, соответствующее статусу научно-квалификационного труда. Полученные в диссертационной работе данные отражены в 28 статьях в журналах, включённых в перечень ВАК России и рекомендованных для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Материалы диссертации докладывались на 24 научных конференциях и съездах всероссийского и международного значения, что говорит о профессиональном уровне их написания.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Вопросы и замечания, выявленные в процессе чтения диссертационной работы Е.С. Савельевой

Несмотря на многочисленные достоинства диссертации, в ней имеются отдельные недочеты, которые вызывают ряд вопросов, но при этом серьёзно не влияют на общее благоприятное впечатление о работе.

1. Не сделан вывод о приоритетной значимости причин усиления и ослабления полярных вихрей, а следовательно и аномалий озона в периоды ослаблений и усилений
2. Не показана связь полярных вихрей со струйными течениями в верхних слоях тропосферы и нижней стратосферы.
3. Часто анализ данных носит описательный характер, без физической и геофизической интерпретации (гл.4, 4.2-4., 3 и других).
4. С отдельными рассуждениями автора такими как «Полярные вихри могут способствовать увеличению стратосферно-тропосферного обмена в период их наибольшего усиления», трудно согласиться, хотя они не являются принципиальными для оценки работы.
5. Констатация факта проявления события без попыток его объяснения, например, четко не показано при каких условиях формируется динамический барьер полярного вихря и какова его проницаемость для внешних потоков воздуха, в том числе из верхних и нижних слоев (гл. 5).
6. Редакционные стилистические и жаргонные выражения «глобальное возмущение стратосферного аэрозольного слоя», «существует 2 способа механизма влияния крупных вулканических извержений на формирование полярных озоновых аномалий».

Заключение.

Диссертационная работа Савельевой Екатерины Сергеевны «Полярные вихри: причины и последствия аномальной динамики в нижней стратосфере», является самостоятельным завершённым научным трудом, выполненным на высоком профессиональном уровне.

По актуальности, новизне, научно-практической значимости, степени достоверности результатов исследований и объему диссертационная работа Савельевой Е.С. полностью соответствует критериям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, с изменениями от 21.04.2016 г. №335, а также от 02.08.2016 г. № 748, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник отдела физики Солнца Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Физика Солнца, Почтовый адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291
E-mail: kovadlo2006@rambler.ru
Телефон: 8 (395) 2425785, +79149238714

«23» мая 2022 г.

Ковадло Павел Гаврилович

Я, Ковадло Павел Гаврилович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

 Ковадло Павел Гаврилович

Подпись Ковадло Павла Гавриловича заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук



 Салахутдинова Ирина Игнатьевна