

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.034.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 14 июня 2022 г. № 13

О присуждении Савельевой Екатерине Сергеевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Полярные вихри: причины и последствия аномальной динамики в нижней стратосфере» по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы принята к защите 2 марта 2022 г. (протокол заседания № 5) диссертационным советом Д 003.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126-а, а/я 291, утвержденного приказом Министерства образования и науки РФ № 105нк от 11 апреля 2012 г.

Соискатель Савельева Екатерина Сергеевна, 15 марта 1989 года рождения, защитила диссертацию «Вулканогенные факторы разрушения стратосферного озона» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы 5 декабря 2014 г. в диссертационном совете Д 003.029.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН). В настоящее время Савельева Е.С. работает в должности старшего научного сотрудника в Лаборатории геосферно-биосферных взаимодействий в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН).

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы выполнена в Лаборатории геосферно-биосферных взаимодействий ИМКЭС СО РАН.

Научный консультант – Зуев Владимир Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, ИМКЭС СО РАН, Лаборатория геосферно-биосферных взаимодействий, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

1. Криволуцкий Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Центральная аэрологическая обсерватория, Лаборатория химии и динамики атмосферы, заведующий лабораторией;

2. Кашкин Валентин Борисович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Сибирский федеральный университет, Кафедра радиотехники, профессор;

3. Ковадло Павел Гаврилович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Отдел физики Солнца, старший научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ, г. Санкт-Петербург) в своем положительном отзыве, подготовленном профессором Кафедры физики атмосферы СПбГУ, доктором физико-математических наук Гавриловым Николаем Михайловичем и утвержденном проректором по научной работе СПбГУ, кандидатом физико-математических наук Микушевым Сергеем Владимировичем, указала, что соискателем получено и систематизировано большое количество наблюдательных фактов и закономерностей, описывающих динамику стратосферных полярных вихрей, что способствует решению важной междисциплинарной проблемы влияния внеполярной стратосферы на формирование полярных озоновых аномалий, а также открывает перспективы совершенствования методов моделирования глобальных и региональных климатических изменений. В отзыве содержатся следующие замечания:

1. В п. 1.1. сделан вывод, что антарктический вихрь имеет меньшую межгодовую изменчивость, чем арктический. Вместе с тем, в табл. 1.2 и 1.3 и на рис. 1.4–1.7 приведены данные только для арктического вихря. Следовало бы также дать аналогичную информацию для антарктического вихря.

2. В гл. 2 причиной увеличения меридионального градиента температуры и скорости полярного вихря считается потепление внеполярной стратосферы. При этом не анализируются одновременное изменения приполярной температуры. Вместе с тем, усиление вихря должно приводить к уменьшению температуры полярной стратосферы, которое также может вносить вклад в увеличение меридионального градиента температуры. Относительная роль этого процесса выяснена недостаточно.

3. В п. 3.5 есть фраза «Показано, что около 70 % арктических озоновых аномалий наблюдались в результате зимне-весеннего усиления северного полярного вихря после крупных извержений тропических вулканов». Учитывая, что аномалии, понимаемые в метеорологии, как любые отклонения от климатических средних, существуют ежедневно, а крупные извержения тропических вулканов происходят не каждый год, указанная фраза требует серьезных уточнений.

Отмечено, что высказанные замечания не затрагивают основных результатов и выводов диссертации и не снижают общего положительного впечатления от работы. Диссертационная работа вносит существенный вклад в понимание структуры, функций, механизмов действия, физико-химических и динамических характеристик полярных вихрей в зимней стратосфере Арктики и Антарктики, которые могут приводить, в частности, к образованию «озоновых дыр» в зимне-весенний период и существенно влиять на климат средней атмосферы.

Соискатель имеет 82 публикации, в том числе по теме диссертации опубликовано 75 работ, включая монографию, 18 статей в российских рецензируемых научных изданиях и 10 статей в зарубежных рецензируемых научных изданиях, входящих в первый (Q1) и второй (Q2) квартили. В этих работах дано детальное описание, обоснование и анализ результатов проведенных исследований, позволивших установить новые физические закономерности, описывающие динамику стратосферных полярных вихрей и способствующие решению важной междисциплинарной проблемы влияния внеполярной стратосферы на формирование полярных озоновых аномалий. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения о публикациях.

К наиболее важным работам, в которые автор внес преобладающий вклад, следует отнести:

1. Зуев В.В., Савельева Е.С. Динамика стратосферных полярных вихрей. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – 115 с.
2. Zuev V.V., Savelieva E. The role of the polar vortex strength during winter in Arctic ozone depletion from late winter to spring // Polar Sci. 2019. V. 22.

- P. 100469.
3. Zuev V.V., **Savelieva E.** Arctic polar vortex dynamics during winter 2006/2007 // Polar Sci. 2020. V. 25. P. 100532.
 4. Zuev V.V., **Savelieva E.** The cause of the spring strengthening of the Antarctic polar vortex // Dynam. Atmos. Oceans. 2019. V. 87. P. 101097.
 5. Zuev V.V., **Savelieva E.** The cause of the strengthening of the Antarctic polar vortex during October–November periods // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 190. P. 1–5.
 6. **Савельева Е.С.** Динамика антарктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в 2002 г. // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 1. С. 50–55.
 7. Зуев В.В., **Савельева Е.С.**, Павлинский А.В. Анализ динамики арктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67, № 2. С. 134–146.
 8. Зуев В.В., **Савельева Е.С.**, Павлинский А.В. Беспрецедентная озоновая аномалия в арктической стратосфере в зимне-весенний период 2020 г. // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 495, № 2. С. 36–40.
 9. Зуев В.В., **Савельева Е.С.** Аномальное разрушение озона в Арктике с января по апрель 2020 г.: динамика полярного вихря под влиянием планетарных волн // Исследование Земли из космоса. 2021. № 1. С. 41–52.
 10. Zuev V.V., **Savelieva E.** Arctic polar vortex splitting in early January: The role of the Arctic sea ice loss // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2019. V. 195. P. 105137.
 11. **Савельева Е.С.**, Зуев В.В. Роль уменьшения площади арктического морского льда осенью в расщеплении полярного вихря зимой 1984/1985, 1998/1999 и 2012/2013 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 967–970.
 12. **Савельева Е.С.**, Зуев В.В., Зуева Н.Е. Роль вулканогенного фактора в усилении весенней озоновой аномалии над Антарктидой // Химия уст. разв. 2012. Т. 20, № 6. С. 739–744.
 13. Zuev V.V., Zueva N.E., **Savelieva E.S.** The role of the Mt. Merapi eruption in the 2011 Arctic ozone depletion // Atmos. Environ. 2017. V. 166. P. 327–333.
 14. Zuev V.V., Zueva N.E., **Savelieva E.S.**, Gerasimov V.V. The Antarctic ozone depletion caused by Erebus volcano gas emissions // Atmos. Environ. 2015. V. 122. P. 393–399.
 15. **Савельева Е.С.**, Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулкан Эребус – ключевой фактор усиления антарктической озоновой дыры // Химия уст. разв. 2014. Т. 22, № 5. С. 541–547.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв на автореферат, подписанный член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессором Н.Ф. Еланским, главным научным сотрудником ФГБУН Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Отзыв положительный, содержит следующие замечания:

К недостаткам автореферата можно отнести неточные формулировки некоторых выводов и положений. В частности, большая часть текста п.2 «основных положений» представляет собой перефразирование описания, которое содержится в п.1 тех же «основных положений». Не вполне корректно звучит: «решение важной междисциплинарной проблемы влияния внеполярной стратосферы на формирование полярных озоновых аномалий» («научная значимость»).

2. Отзыв на автореферат, подписанный д.ф.-м.н. А.Н. Груздевым, ведущим научным сотрудником ФГБУН Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Отзыв положительный, содержит замечание:

Если судить по автореферату, то в работе уделено мало внимания динамическому механизму озоновых аномалий. Создается впечатление, что автор связывает аномалии стратосферного содержания озона в полярной области исключительно с его химическим разрушением по механизму «озоновой дыры», реализуемому при наличии полярных стратосферных облаков. Однако истощение озона в полярной области имеет важную циркуляционную составляющую – ослабление меридионального переноса озона к полюсу из низких широт в результате ослабления активности планетарных волн и меридиональной стратосферной циркуляции.

3. Отзыв на автореферат, подписанный д.г.-м.н. В.Л. Сывороткиным, ведущим научным сотрудником Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Отзыв положительный, содержит замечание:

Огорчило рецензента использование диссидентом фреоновой гипотезы разрушения озонового слоя в качестве рабочей. Практика, этот критерий истинности, давно поставил на ней крест.

4. Отзыв на автореферат, подписанный д.т.н. В.А. Кузнецовым, профессором Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева. Отзыв положительный, без замечаний.

5. Отзыв на автореферат, подписанный д.ф.-м.н. И.И. Морозовым, главным научным сотрудником ФГБУН Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН. Отзыв положительный, без замечаний.

6. Отзыв на автореферат, подписанный д.ф.-м.н. А.М. Фейгиным, заведующим отделом физики атмосферы и микроволновой диагностики

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук». Отзыв положительный, содержит следующие замечания:

1. На странице 13 описан каталитический цикл разрушения озона внутри полярного вихря, обусловленный хлорсодержащими малыми газовыми составляющими. Справедливо отмечается ключевая роль нитрата хлора ClONO_2 («озононеактивного» хлорного соединения («резервуара») для производства газообразного молекулярного хлора Cl_2) как основного источника озонаактивного атомарного хлора Cl , разрушающего озон в каталитическом цикле (5), (6). В этом контексте представляется естественным подчеркнуть, что в условиях антарктического полярного вихря концентрация ClONO_2 увеличивается в результате автокаталитического («самоускоряющегося») цикла, в результате которого две молекулы ClONO_2 «рождаются» из одной молекулы ClONO_2 . Именно этот процесс обеспечивает в итоге высокую скорость истощения озона, что приводит к формированию «озонной дыры» за сравнительно непродолжительное время от момента «запуска» фотохимических реакций (начало августа) до разрушения антарктического вихря.

2. В диссертации для анализа динамики полярных вихрей предложен и используется метод оценки основных параметров вихря (скорости ветра по границе вихря, площади вихря, средней температуры и содержания озона внутри вихря), основанный на «оконтуривании его границ с помощью значений геопотенциала, определенных по максимальному градиенту температуры и максимальной скорости ветра» (стр. 26 автореферата). Выше на этой же странице приведены краткие характеристики двух предложенных ранее (другими исследователями) методов оконтуривания с указанием их достоинств и недостатков. Никакой информации о достоинствах и недостатках предлагаемого метода в сравнении с уже существующими в автореферате не приводится.

3. На рис. 10 (стр. 27) приведены изменения средней температуры внутри арктического полярного вихря на уровне 50 гПа в зависимости от скорости ветра по границе вихря в зимний период. В комментарии на стр. 28 утверждается, что «распределение температуры внутри вихря при скорости ветра $> 20 \text{ м/с} \dots$ во всех случаях ... находилось примерно в одном температурном диапазоне и сопровождалось формированием ПСО в зимний период (рис. 10)», что не соответствует приведенным на рис. 10 результатам: практически для всего массива данных для скорости ветра $> 20 \text{ м/с}$ температура внутри арктического вихря (приведена на оси ординат) выше -78°C , что делает возникновение ПСО невозможным.

7. Отзыв на автореферат, подписанный д.ф.-м.н. Ю.Е. Беликовым, заведующим отделом физики атмосферы и микроволновой диагностики ФГБУ Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова. Отзыв положительный, содержит следующие замечания:

1. В первом положении, выносимом на защиту, в частности отмечается, что устойчивость и сила антарктического полярного вихря по сравнению с динамикой

арктического вихря обусловлены влиянием сезонного хода температуры в нижней субтропической стратосфере. При этом указывается на рассогласованность в Северном полушарии этого хода температуры со скоростью зонального ветра на 60 градусе с.ш. В то же время в Южном полушарии такой рассогласованности не наблюдается.

Не подвергая сомнению выводы автора диссертации, на мой взгляд, в них следовало еще отметить, что все эти особенности являются также следствием существенно различных температур в Арктике и Антарктике, обусловленных тем, что Антарктида это континент, а Арктика расположена на территории моря вблизи теплых течений. Возможно, именно по этой причине именно Арктика так чувствительна к изменению температуры в субтропической нижней стратосфере. Ведь сила ветра, меридиональный перенос из субтропической стратосферы в полярную зависят не только от абсолютной величины температуры в субтропической стратосфере, а определяется разностью температур в нижней полярной и субтропической стратосфере.

Для Арктики этот градиент существенно меньше, чем для Антарктики и возможно именно поэтому, в общем, не очень сильные изменения температуры в субтропической стратосфере незначительно влияют на перенос воздуха в Антарктику и в то же время, для Арктики рассматриваемое влияние может быть велико.

2. В разделе 3.2 автор диссертации провела анализ влияния крупных извержений вулканов, расположенных в тропической зоне на образования арктических озоновых аномалий и выявил тесную связь между этими явлениями, что подтверждает выводы диссертационной работы автора. В то же время, был обнаружен ряд исключений, когда, по мнению автора, вулканы не могли оказать, по крайне мере определяющую роль в образовании озоновых аномалий в Арктике. Это 1987, 1996, 1997 и 2016 годы. Такие случаи автор диссертации справедливо относит за счет влияния других причин, например за счет влияния КДЦ.

В контексте этого анализа, возможно, следовало бы упомянуть о влиянии солнечной активности на образование озоновых аномалий. Еще в ранних 50-х - 60-х годах прошлого века была выявлена корреляция между солнечной активностью и содержанием озона в северном полушарии (Александров и др. Атмосферный озон и изменения глобального климата, 1982, с.25). При этом максимальные концентрации озона наблюдались в годы максимума солнечной активности, а минимальные в годы минимума.

Отметим, что годы 1987, 1996, 1997 и 2016 приходятся на низкую солнечную активность. Особенно хотелось бы отметить 2011 год, когда в Арктике наблюдалась исключительно сильная озоновая аномалия. Этот год приходится на минимальную солнечную активность. Возможно, это тот случай, когда влияние извержения вулкана Мерапи в тропиках в 2010 году совпало с низкой активностью Солнца в 2010-2011 годах, что усилило образование озоновой аномалии в Арктике в 2011 году.

Причины корреляции солнечной активности и содержания озона в атмосфере кроются во влиянии заряженных частиц на убыль озона. Действие космических лучей усиливается во время уменьшения солнечной активности и наоборот.

Гипотеза о влиянии космических лучей на озон высказывалась достаточно давно. В дальнейшем эта гипотеза нашла ряд подтверждений (Lu Q.B. New Theories and Predictions on the Ozone Hole and Climat Change, 2015, 285 pp.; Belikov Yu. and Nikolayshvili S. The Role of the Dipole Interaction of Molecules with Charged Particles in the Polar Stratosphere. JEASE, 2016, 6, 115-149).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются известными и авторитетными учеными в области физики атмосферы, динамики стратосферы и озоносферы и выполняли работы, близкие к проблеме исследования, а ведущая организация является одним из ведущих мировых и отечественных научных центров, проводящих комплексные исследования в области физики атмосферы, непосредственно связанные с темой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработан метод оконтуривания стратосферных полярных вихрей, позволивший выявить особенности аномальной динамики вихрей;
- предложена площадь и скорость на границе, как характеристики динамического барьера полярного вихря, а также критерии его ослабления в нижней стратосфере;
- доказано определяющее влияние изменений температуры тропической и субтропической стратосферы на динамику стратосферных полярных вихрей.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- изучены причины и последствия аномальной динамики стратосферных полярных вихрей;
- выявлена определяющая роль вариаций температуры нижней субтропической стратосферы в формировании, усилении и ослаблении антарктического полярного вихря;
- показано влияние извержений тропических вулканов с высотой выброса не менее 18 км на динамику арктического полярного вихря;
- изучены последствия ослабления динамического барьера полярного вихря в зимний период, проявляющиеся в отсутствии разрушения озонаового слоя с конца зимы по весну даже в условиях сильного вихря;
- с использованием предложенного метода определены динамические характеристики полярного вихря (площадь вихря более 10 млн. км² и средняя скорость ветра по границе вихря более 30 и 45 м/с соответственно в нижней и средней стратосфере).

Практическая значимость исследования обоснована тем, что:

- разработан метод, основанный на оконтурировании вихрей и позволяющий вычислить площадь вихря, скорость ветра у границы вихря, средние значения температуры и массовой доли озона внутри вихря с использованием значений геопотенциала, определенных по максимальным значениям градиента температуры и скорости ветра;
- представлены механизмы влияния внеполярной стратосферы на формирование полярных озоновых аномалий, которые могут быть использованы при моделировании глобальных и региональных климатических изменений;
- определены ключевые факторы (вулканические извержения, зимние ослабления динамического барьера вихря), позволяющие оценивать возможность формирования арктической озоновой аномалии в пределах года для уточнения последующего прогноза изменений биологически активной ультрафиолетовой радиации в приполярной атмосфере.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- результаты получены на общедоступном фактическом материале с использованием стандартных методов анализа и могут воспроизводиться другими исследователями;
- установлено хорошее согласие рассчитанных характеристик полярных вихрей по предложенному методу с данными наблюдений;
- отмечено соответствие авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и формулировке задач диссертационной работы, разработке методов решения поставленных задач, математической обработке данных наблюдений, подготовке публикаций и апробации полученных результатов. Лично автором разработан метод оценки основных параметров стратосферных полярных вихрей, предложены критерии ослабления динамического барьера полярного вихря, выявлена зависимость динамики антарктического полярного вихря от изменений температуры нижней субтропической стратосферы.

В ходе защиты диссертации было высказано следующее критическое замечание: нужно было бы детальнее описать методику получения значений геопотенциала, характеризующих границы полярных вихрей в предложенном методе.

Соискатель Савельева Е.С. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию, пояснив используемые в работе методы, а также согласилась с рядом замечаний.

На заседании 14 июня 2022 г. диссертационный совет принял решение: за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, присудить Савельевой Е.С. ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросфера.

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, в том числе дистанционно – 1, из них 6 докторов наук по специальности 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросфера, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 19 человек, против – 1 человек.

Зам. председателя
диссертационного совета Д 003.034.01,
член-корр. РАН



Медведев
Андрей Всеволодович

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.034.01,
кандидат физико-математических наук

Поляков
Владимир Иванович

14 июня 2022 г.