Правительство Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(СПбГУ)

|  |  |
| --- | --- |
|  | УТВЕРЖДАЮ  Проректор по научной работе  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_С. В. Микушев  «\_\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_202\_ г. |

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ

О РАБОТЕ ЛАБОРАТОРИИ/ЦЕНТРА

(название **Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы**)

за 2024 год

Руководитель Е. В. Розанов И. О. Фамилия

Санкт-Петербург

2024

**1. Общая информация о Лаборатории/Центре**

Общеизвестно, что озоновый слой защищает биосферу и людей от жесткого ультрафиолетового излучения солнца и поэтому контроль за его состоянием чрезвычайно важен. Эволюция озонового слоя до начала индустриальной эры в основном контролировалась природными факторами. С 1970-х годов антропогенная деятельность и связанные с ней выбросы парниковых газов и разрушающих озон примесей привели к катастрофическому падению концентрации озона в высоких широтах южного полушария и в глобальном масштабе. В конце 1980-х был принят Монреальский протокол, ограничивающий производство озон-разрушающих газов. Этот международный договор и дополнения к нему помогли переломить ситуацию и нейтрализовать негативные тенденции. Однако, результаты измерений показывают, что, несмотря на принятые меры по ограничению антропогенного влияния на содержание озона, его восстановление происходит медленнее ожидаемого, а в некоторых регионах продолжается его значительное сокращение. Ситуацию усугубляет появление обширной озоновой дыры над Арктикой в 2020 году, озоновых мини-дыр над территорией России и нарушения ограничения выбросов разрушающих озон примесей. Экстраполяция выявленных негативных тенденций в будущее вызывает беспокойство общества и политиков, в связи с чем назрела необходимость создания специальной научно-исследовательской лаборатории. Такая лаборатория должна использовать комплексный подход к изучению и прогнозированию атмосферных процессов, включающий как наблюдение за состоянием озонового слоя и других важных атмосферных газов, так и математическое моделирование множества процессов, включая химию, динамику и перенос в атмосфере. С целью реализации указанных амбициозных планов необходимо создать модель, способную адекватно реагировать на изменения антропогенной, солнечной, вулканической и геомагнитной активности. Это в итоге должно обеспечить появление новых данных диагностики и прогнозирования состояния озонового слоя, существенно превышающих мировой уровень, а также методов решения указанных проблем, носящих глобальный характер. До 2019 года в России не существовало подразделений способных проводить указанные исследования на высоком уровне, что и послужило причиной создания новой лаборатории.

Идея создания лаборатории появилась в 2019 года после обсуждения проблем эволюции озонового слоя специалистами кафедр физики атмосферы и физики Земли СПбГУ с Е. Розановым (руководителем климатической группы Физической и Метеорологической Обсерватории Давоса). Заявка по программе мегагрантов Российского правительства была поддержана в 2020 году, и лаборатория приступила к работе с 1 июля 2021 года согласно приказа 6368/1 от 10.06.2021. Состав лаборатории был утвержден приказом 6567/1 от 17.06.2021.  После окончания мегагранта лаборатория продолжила работу под руководством Е. В. Розанова. Основные задачи лаборатории в основном сохранился. Научный коллектив лаборатории был утвержден приказом 1583/1 от 21.02.2024. В 2024 году в лаборатории работали 39 сотрудников, включая 8 докторов и 9 кандидатов наук. План работы лаборатории на 2024 год утвержден приказом 9519/1 от 02.07.2024.

**2. Результативная часть отчета**

**Проведение научных исследований**

В 2024 в лаборатории выполнялись 5 проектов:

Проект «Анализ и прогнозирование состояния климата, озонового слоя и ионосферы с использованием моделирования и измерений газового состава атмосферы» (ID Pure 116234986);

В 2024 были выполнены следующие исследования:

* Регистрация и анализ спектров прямого солнечного излучения с высоким спектральным разрешением для получение новых данных о газовом составе атмосферы.
* Интерпретация спектральных наземных измерений спектров для получения новых данных об общем содержании и изменчивости климатически важных газов.
* Усовершенствование методики интерпретации наземных спектральных измерений солнечного излучения для получения информации об общем содержании газов.
* Анализ возможности определения содержаний СlO по спектрам солнечного излучения высокого разрешения.
* Разработка методики решения обратной задачи получения информации о вертикальной структуре распределения озона из спектров российского спутникового прибора ИКФС-2**.**
* Адаптации региональную численную модель газового и аэрозольного состава нижней атмосферы для описания изменчивости климатически важных газов в тропосфере в северных районах России.
* Создание архивов независимых результатов реанализа моделирования и измерений содержаний климатически важных газов и основных параметров атмосферы в северных районах России.
* Проведение комплексную валидации региональной модели химического состава нижней атмосферы при помощи локальных и дистанционных измерений содержания климатически важных газов и метеорологических измерений.
* Разработка параметризации динамического и теплового воздействия акустико-гравитационных волн от атмосферных динамических источников для используемой нами климатической модели озоносферы SOCOL. Разрабатываемая параметризация позволит учесть внутриатмосферные динамические источники волн, что улучшит диффузионные свойства климатической системы подготовке прогнозов;
* Моделирование влияния гравитационных волн орографического происхождения на глобальную меридиональную циркуляцию и перенос тепла, озона и парниковых газов в арктических районах с использованием климатической модели SOCOL и новой уникальной, разработанной нашими сотрудниками, параметризации эффектов орографических гравитационных волн в модели СОКОЛ.
* Определение вклада различных процессов в изменения климата и озонового слоя в прошлом и будущем.
* Оценка вкладов изменчивости свойств океана и биогенных эмиссий на климат и озоновый слой.
* Расчет изменения климата и озонового слоя до 2100 года с учетом возможных вулканических извержений различных типов и альтернативных сценариев антропогенной деятельности.
* Объединение используемых в лаборатории моделей фотохимии и климата SOCOL с региональной моделью WRF для оценки изменений в отдельных регионах России, включая Арктику.
* Исследование физических причины формирования возмущений в средней и верхней атмосфере, включая ионосферу в периоды геомагнитных бурь, солнечных вспышек, солнечных протонных событий и внезапных стратосферных потеплений.
* Анализ сложных геофизические событий, включающие несколько перекрывающихся явлений космической погоды и атмосферных возмущений.
* Создание концепции эмпирической модели высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса на основе инжекций с учетом поведения различных параметров радиационного пояса.
* Исследование потоков высыпающиеся электронов, изменения ионизации и состава атмосферы для экстремальных случаев.

Опубликованы следующие статьи:

Akishina, S., A. Polyakov, Y. Virolainen, Ground-based measurements of HF and HCl total columns in atmosphere near Saint Petersburg (2009–2023) // International Journal of Remote Sensing, 2024, 45, 7, P. 2315-2336, doi:10.1080/01431161.2024.2326536.

Ermakova, T.; Koval, A.; Didenko, K.; Aniskina, O.; Okulicheva, A. Influence of Natural Tropical Oscillations on Ozone Content and Meridional Circulation in the Boreal Winter Stratosphere. Atmosphere 2024, 15, 717. https://doi.org/10.3390/atmos15060717

Arsenović, P., E. Rozanov, I. Usoskin, C. Turney, T. Sukhodolov, K. McCracken, M. Friedel, J. Anet, S. Simić, V. Maliniemi, T. Egorova, M. Korte, H. Rieder, A. Cooper, Th. Peter, Global impacts of an extreme solar particle event under different geomagnetic field strengths, Proceedings of the National Academy of Sciences, 121, 28, 2024, doi: 10.1073/pnas.2321770121

Shiokawa, K., D. Marsh, D. Pallamraju, S. Patsourakos, N. Pedatella,V. Ratnam, E. Rozanov, N. Srivastava, S. Tulasiram, Special issue of SCOSTEP's 15th Quadrennial Solar-Terrestrial Physics Symposium (STP-15), Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 259, 2024, 106236, doi:0.1016/j.jastp.2024.106236

Kurdyaeva, Y., F. Bessarab, O. Borchevkina, M. Klimenko, Model study of the influence of atmospheric waves on variations of upper atmosphere and ionosphere parameters during a meteorological storm on May 29, 2017, Advances in Space Research, 74, 5, 2024. doi:10.1016/j.asr.2024.05.062

Golubenko, K., Rozanov, E., Kovaltsov, G., Baroni, M., Sukhodolov, T., & Usoskin, I., Full modeling and practical parameterization of cosmogenic 10Be transport for cosmic‐ray studies: SOCOL‐AERv2‐BE model. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 129, e2024JA032504, 2024. doi:1029/2024JA032504

Doronin, G.; Mironova, I.; Bobrov, N.; Rozanov, E. Mesospheric Ozone Depletion during 2004–2024 as a Function of Solar Proton Events Intensity. Atmosphere 2024, 15, 944. doi:10.3390/atmos15080944

Timofeyev,Y.M., G. M. Nerobelov, D. A. Kozlov, I. C. Cherkashin, P. M. Nerobelov, A. N. Rublev , A. B. Uspenskii , and Yu. V. Kiseleva: Spatiotemporal Variation of Outgoing Thermal Radiation of the Earth by the Space-Based IKFS-2 IR Spectrometer, Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2024, Vol. 60, No. 3, pp. 260–271. DOI: 10.1134/S0001433824700294

Sergeev, V. A., Stepanov, N. A., Ogawa, Y., Rozanov, E. V., & Shukhtina, M. A. (2024). Local time distribution and activity dependence of extreme electron densities in the auroral D‐region as an image of energy‐dependent energetic electron precipitation. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 129, e2024JA032913. https://doi.org/10.1029/2024JA032913

Vargin, P.; Koval, A.; Guryanov, V.; Volodin, E.; Rozanov, E. Variations of PlanetaryWave Activity in the Lower Stratosphere in February as a Predictor of Ozone Depletion in the Arctic in March. Atmosphere 2024, 15, 1237. https://doi.org/10.3390/atmos15101237

Usacheva, M.; Rozanov, E.; Zubov, V.; Smyshlyaev, S. Temperature and Ozone Response to Different Forcing in the Lower Troposphere and Stratosphere. Atmosphere 2024, 15, 1289. https://doi.org/10.3390/atmos15111289,

Koval, A.V., Didenko, K.A., Ermakova, T.S., Gavrilov, N.M., Sokolov, A.V. Changes in general circulation of the middle and upper atmosphere associated with main and transitional QBO phases. Advances in Space Research, 2024, V. 74(10), P. 4793-4808б https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.07.037

Сделано 15 докладов на международных и всероссийских конференциях.

Проект «Спутниковые исследования пространственной и временной изменчивости содержания озона в тропосфере над территорией России» (ID Pure 115558332)

В 2024 году были выполнены следующие исследования:

* Адаптация и запуск численной модели WRF-Chem для моделирования пространственно-временной изменчивости содержания тропосферного озона для ряда российских регионов, расчет и анализ полей распределения тропосферного озона за 2019–2021 гг.
* Получение и анализ данных ре-анализа ЕАС4 по распределению тропосферного озона над территорией России за 2019–2021 гг.
* Усовершенствование методики интерпретации спектральных измерений спутникового прибора ИКФС-2 для получения информации о содержании тропосферного озона.
* Массовая интерпретация спектральных измерений ИКФС-2 для получения полей распределения тропосферного содержания озона за 2015–2022 гг.
* Валидация измерений ИКФС-2 тропосферного содержания озона при сопоставлении с независимыми данными спутниковых и наземных измерений.
* Исследование пространственной и временной изменчивости тропосферного содержания озона над территорией России.
* Расчет и анализ средних климатологических данных по тропосферному содержанию озона над территорией России.
* Выявление и анализ наблюдаемых аномалий в тропосферном содержании озона над отдельными регионами России.

Опубликованы следующие статьи:

Nerobelov, G.; Virolainen, Y.; Ionov, D.; Polyakov, A.; Rozanov, E. WRF-Chem Modeling of Tropospheric Ozone in the Coastal Cities of the Gulf of Finland. Atmosphere 2024, 15, 775. <https://doi.org/10.3390/atmos15070775>

Polyakov, A.V., Virolainen, Y.A., Nerobelov, G.M., Akishina, S.V. Technique for Determining Tropospheric Ozone Content from Spectral Measurements of Outgoing Thermal Radiation by the IKFS-2 Satellite Instrument. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 60, 533–543 (2024). https://doi.org/10.1134/S000143382470049X

Сделаны 6 докладов на международных и всероссийских конференциях.

Проекты «Магнитное пересоединение в космической и лабораторной плазме: компьютерные симуляции и эмпирическое моделирование» (ID Pure 116862684)

В рамках проекта проводилось трехмерное кинетическое численное моделирование мини-магнитосферы с параметрами, характерными для плазменной установки SESRI (длина 10 м, диаметр 3 м, расположена в Харбинском технологическом институте, Китай). Особенностью эксперимента является сложная конфигурация источника плазмы (4 токопроводящие катушки диаметром порядка 1 м., покрытые керамикой). Для корректного моделирования динамики плазмы требуется учитывать в расчете протяженную геометрию источника, а также учитывать масштаб по времени накачки магнитного потока. Основным новшеством в 2024 явилось добавление в код iPIC3D нового модуля с внутренним граничным условием.  Эффекты от токов, производимых дипольными катушками, добавлены непосредственно в численную схему.

Опубликованы следующие статья:

Sun, M., Mao, A., He, X., Divin, A., Zou, J., Wang, Z., Zhou, T. and Wang, X. (2024). Cold ion effects in density-asymmetric collisionless magnetic reconnection. Plasma Physics and Controlled Fusion, 66(9), 095007, <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ad670b>

Проект «Исследование трехмерных кинетических структур при выбросах энергичной плазмы посредством лабораторного эксперимента и численного моделирования» (ID Pure 116636433)

На установке КИ-1 (ИЛФ СО РАН, Новосибирск) был проведен цикл экспериментов, посвященный сверх-Альвеновскому разлету облаков лазерной плазмы (ОЛП) во внешнее магнитное поле и фоновую плазму. Дополнительно были проведены эксперименты по суб-Альфвеновскому разлету сферического, а также направленного плазменных облаков. Результаты эксперимента были в основном подтверждены в трехмерном численном моделировании методом "Частица-в-ячейке". В моделировании джетов при низкой плотности фоновой плазмы (<1.0\*10^12 cm-3) первоначальное облако плазмы джета формирует диамагнитную каверну, и динамика этой стадии во многом сходна с эволюцией симметричного облака лазерной плазмы. Генерируется внутреннее и внешнее Холловское магнитное поля, далее происходит схлопывание каверны, после чего коллимированный джет распространяется на большие расстояния. Было показано большое отличие в движении ионов углерода и водорода, составляющих джет. А именно, водород концентрируется на фронте джета, в то время как углерод формирует основную протяженную структуру и филаменты плотности. Рассмотрены варианты с динамикой джетов в замагниченном фоне.

Проект «Атмосферные эффекты высыпаний энергичных электронов внешнего радиационного пояса: Часть III» (ID Pure 121199972).

* Исследовались высыпания энергичных электронов во время магнитной бури, сопровождавшейся продолжительной суббуревой активностью 10–16 октября 2017 г.
* Восстанавливались спектры высыпаний энергичных электронов с использованием информации по данным со спутников, данным, полученным в периоды аэростатных/баллонных экспериментов.
* Рассчитывались скорости ионизации атмосферы во время магнитосферной и геомагнитной возмущенности с использованием восстановленных спектров высыпающихся электронов.
* Анализировались высыпания энергичных электронов и изменения озоноразрушающих компонентов атмосферы в различные фазы слабой магнитной бури в период 1–4 февраля 2015 г и магнитной бури 10–16 октября 2017 года.
* С использованием трехмерных химико-климатических моделей проводилось исследование изменений в ионосфере и атмосфере, связанных с внезапным стратосферным потеплением (ВСП) и высыпаниями энергичных электронов в полярную атмосферу.

**Участие в конференциях, форумах, иных научно-практических мероприятиях**

Сотрудниками лаборатории были сделаны следующие доклады

Determination of total and tropospheric ozone by measurements of thermal outgoing infrared radiation, Hangzhou, China, 17.06.24, IRS-2024, секционный, Поляков А. В., Крюковских Е. П., Акишина С.В., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., http://www.irs2024.org/irs2024/index.html?time=1717941407108 , PURE ID 121117530.

Determination Of the Ozone Vertical Distribution Elements In The Atmosphere From Satellite Spectral Measurements Of Outgoing Thermal Radiation, China, 17.06.24, IRS-2024, секционный, Акишина С.В., Поляков А. В., Виролайнен Я.А., http://www.irs2024.org/irs2024/index.html?time=1717941407108 , PURE ID 121117480.

Ozone and temperature response to different forcing during 1980–2020 period, Boulder, USA, online, 15.07.2024, Quadrennial Ozone Symposium, стендовый, Усачева М., Смышляев С., Розанов Е., Зубов В., https://qos2024.colorado.edu/, PURE ID 122893586

Spatio-temporal variation of the Earth outgoing thermal radiation by space-based IR Fourier spectromet, Boulder, USA, online, 15.07.2024, Quadrennial Ozone Symposium, стендовый, Неробелов Г. М., Тимофеев Ю. М., Неробелов П.М., https://qos2024.colorado.edu/, PURE ID 122894371

15 лет измерений стратосферных газов на станции NDACC St. Petersburg, Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Виролайнен, Я. А., Поляков, А. В., Акишина, С. В., Тимофеев, Ю. М., Поберовский, А. В., Неробелов, Г. М., Имхасин, Х. Х., <https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/index>, PURE ID 121545961

Numerical Modeling of QBO and ENSO Phase Impact on the Evolvement of Sudden Stratospheric Warming and Waves processes, Pune, Maharashtra, India, 20.06.24, Stratosphere-Troposphere Interactions and Prediction of Monsoon weather EXtremes (STIPMEX), секционный, Диденко К., Коваль А. <https://sparc-extreme.tropmet.res.in/>, PURE ID 120929221

Изменения стратосферы Арктики в XXI веке в расчетах ХКМ SOCOL4, Санкт-Петербург, 4.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы“, секционный, Коваль А., Розанов Е., https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/i1, PURE ID 121824402

Determining Ozone Content through Outgoing Infrared Thermal Radiation Measurements, Boulder, USA, online, 15.07.2024, Quadrennial Ozone Symposium, стендовый, Акишина С.В., Поляков А. В., Крюковских Е. П., Виролайнен Я. А., Неробелов Г. М.,https://qos2024.colorado.edu/, PURE ID 124009767

Верификация метода максимумов скорости изменения атмосферных параметров для определения характеристик внезапных стратосферных потеплений, Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Ефимов М., Гаврилов Н., <https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/i1>, PURE ID 123278973

Climatology of mesoscale perturbations of OH and O2 rotational temperature in Rikubetsu, Shigaraki and Sata, Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Ефимов М., Гаврилов Н., <https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/i1>, PURE ID 121043221

Применение методики определения общего содержания озона из спектральных измерений ИКФС-2 в период 2021–2022гг., Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Поляков А. В., Крюковских Е. П., Виролайнен Я.А., Неробелов Г.М., Тимофеев Ю. М., <https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/i1>, PURE ID 121545195

Анализ возможностей определения элементов вертикального распределения атмосферного озона по спектральным измерениям уходящего ИК излучения атмосферы прибором ИКФС-2, Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Акишина С., Поляков А., Виролайнен Я., <https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/index>, PURE ID 121644186

Анализ синергетического наземного МКВ+ИК метода определения вертикальных профилей содержания озона, Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Бордовская Ю.И., Тимофеев Ю. М., Виролайнен Я.А., Поберовский А.В., <https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/index>, PURE ID 124009853

Сравнения наземных и спутниковых измерений общего содержания СО2в Петергофе, Санкт-Петербург, 02.07.2024, XХХ Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", секционный, Никитенко А., Тимофеев Ю., Неробелов Г., Виролайнен Я., https://symp.iao.ru/ru/aoo/30/index, PURE ID 124009963

Изменения химического состава мезосферы, вызванные солнечными протонными событиями, Москва, 1.07.2024, 38-я Всероссийская конференция по космическим лучам, секционный, Миронова, И.А. Доронин, Г. Розанов, Е., https://events.sinp.msu.ru/event/12/, PURE ID 121160614

**Мероприятия Лаборатории/Центра**

Мероприятия на проводились

**Экспертная деятельность**

Не проводилась

**Достижение плановых показателей деятельности Лаборатории/Центра**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Показатель | План на год | Факт за отчетный период |
| **Проведение научных исследований** | | | |
| 1 | Текущие НИР по тематике исследования (гранты, коммерческие договора) членов коллектива | 5 | 5 |
| 2 | Публикации (типа article и review) в научных журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования (Web of Science Core Collection и (или) Scopus) | 10 | 15 |
| 3 | Прочие публикации в научных журналах, входящих в базу данных РИНЦ, в т.ч. в ядро РИНЦ | 0 | 0 |
| 4 | Рецензируемые монографии (при наличии ISBN), рецензируемые энциклопедии (при наличии ISBN) | 0 | 0 |
| 5 | Число поданных заявок на получение патента или регистрацию результата интеллектуальной деятельности (далее — РИД) | 2 | 2 |
| **Участие в конференциях, форумах, иных научно-практических мероприятиях** | | | |
| 6 | Доклады на ведущих международных научных (научно—практических) конференциях в Российской Федерации и за рубежом | 4 | 15 |
| **Мероприятия Лаборатории/Центра** | | | |
| 7 | Проведение научных мероприятий | 0 | 0 |
| 8 | Подготовка и реализация различных образовательных программ, курсов, лекций, семинаров, стажировок и т. п. | 0 | 0 |
| **Экспертная деятельность** | | | |
| 9 | Аналитические материалы в интересах (по заказам) органов государственной власти | 0 | 0 |
| 10 | Подготовка экспертных материалов/заключений, работа в составе экспертных комиссий, рабочих группах, советах и прочее. | 0 | 0 |

**3. Заключение**

В результате проделанной работы по проекту «Анализ и прогнозирование состояния климата, озонового слоя и ионосферы с использованием моделирования и измерений газового состава атмосферы» (ID Pure 116234986):

* Получены новые данные о спектральном излучении и вертикальном профиле озона и других газовых примесей.
  + - * Усовершенствованы методики интерпретации наземных спектральных измерений солнечного излучения применены для восстановления общего содержания озона, нитрата хлора и ClO.
      * На основе сочетания методов главных компонент, искусственных нейронных сетей и оптимального оценивания (статистической регуляризации) разработан алгоритм восстановления вертикального профиля озона на основе спутниковых измерений уходящего теплового излучения прибором ИКФС-2. Теоретические оценки показали точность восстановления 15–20%.
* Трехмерная численная модель WRF-Chem адаптирована к условиям северных районов России и проведены тестовые расчеты газового и аэрозольного состава атмосферы России с 2019 по 2021 года. Проведена оценка точности расчетов метеопараметров по сравнению с данными реанализа.
* Разработана новая версия параметризации влияния гравитационных волн орографического происхождения (ОГВ) способна реалистично воспроизводить эффекты ОГВ от поверхности до нижней термосферы, что дает возможность улучшить качество прогнозов с используемыми моделями климата.
* Определена степень влияния различных факторов таких как: концентрация парниковых и озоноразрушающих газов, поток солнечной радиации, вулканические выбросы, изменчивость свойств океана и биогенных эмиссий на состояние климата и озонового слоя.
* Получены оценки изменений климата и озонового слоя до 2100 с учетом возможных сценариев вулканических извержений и альтернативных сценариев антропогенной деятельности.
* Создана новая модель, объединяющая используемые в лаборатории модели фотохимии и климата SOCOL с региональной моделью WRF. Получены оценки изменений климата и газового состава в отдельных регионах России, включая Арктику в 21-м веке.
* Выявлены физических причины атмосферных возмущений в периоды солнечных протонных событий и внезапных стратосферных потеплений.
* Создана концепция эмпирической модели высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса с учетом поведения различных параметров радиационного пояса.
* Проведено исследование влияния потоков, высыпающиеся электронов для экстремальных случаев.
* Проведен анализ сложных геофизические событий, включающие несколько перекрывающихся явлений космической погоды и атмосферных возмущений.
* Выполнены тестовые расчеты с моделью, объединяющей ионосферу (ГСМ-ТИП) и магнитосферу (GAMERA).

Полученные результаты соответствуют плану работ.

В результате работы по проекту «Спутниковые исследования пространственной и временной изменчивости содержания озона в тропосфере над территорией России» (ID Pure 115558332):

* Получены и проанализированы данные по тропосферному содержанию озона над территорией России с помощью численного моделирования WRF-Chem и на основе ре-анализа EAC4 за 2019–2021 гг.
* С помощью оптимизированной методики интерпретации спутниковых данных российского прибора ИКФС-2 создан архив измерений тропосферного содержания озона за 2015–2022 гг.
* Проанализирована пространственно-временная изменчивость тропосферного содержания озона над территорией России по данным спутниковых измерений ИКФС-2 и IASI, а также данным численного моделирования WRF-Chem и данным ре-анализа CAMS (EAC4).
* Созданы архивы средних климатологических данных по содержанию тропосферного озона на основе спутниковых измерений (2015–2022 гг.), а также данных моделирования и ре-анализа над территорией России (2019–2021 гг.). База климатологических данных глобальных измерений содержания тропосферного озона ИКФС-2 зарегистрирована в Реестре баз данных (№2024621981 от 08.05.2024).

В результате проделанной работы по проекту «Магнитное пересоединение в космической и лабораторной плазме: компьютерные симуляции и эмпирическое моделирование» (ID Pure 116862684) идентифицированы области магнитного пересоединения в окрестности источника дипольного ("Земного") магнитного поля. Также обнаружены области магнитного пересоединения между отдельными катушками, что может приводить к дополнительному нагреву плазмы в установке.

В результате проделанной работы по проекту «Исследование трехмерных кинетических структур при выбросах энергичной плазмы посредством лабораторного эксперимента и численного моделирования» (ID Pure 116636433) показано, что формирование джетов затруднено: происходит резкий останов водородной компоненты и растекание углеродной компоненты без коллимации струи.

В результате выполнения проекта «Атмосферные эффекты высыпаний энергичных электронов внешнего радиационного пояса: Часть III» (ID Pure 121199972).

* Рассчитаны скорости ионизации атмосферы во время магнитосферной и геомагнитной возмущенности с использованием каталога восстановленных спектров высыпающихся электронов.
* Вычислены скорости ионизации, вызванные высыпаниями энергичных электронов (ВЭЭ) с использованием данных, полученных с низкоорбитального спутника Метеор-М2 и аэростатных измерений.
* Получены спектры высыпающихся потоков энергичных электронов на основе измерений полярного спутника Метеор-М2 в период слабой магнитной бури в период 1–4 февраля 2015 г. Показано, что наиболее сильная реакция озона, а также озоноразрушающих компонентов атмосферы наблюдается в главную фазу бури и в начале фазы восстановления, когда ВЭЭ наиболее интенсивны во время суббуревой активности. Установлено, что уменьшение концентрации мезосферного озона на 24% связано с увеличением отношения смеси газов группы HO𝑥 и NO𝑦 на 10 ppbv и 600 ppbv соответственно.
* Даны оценки изменения электронной концентрации, озоноразрушающих химических компонентов и мезосферного озона на ВЭЭ во время магнитной бури с 10 по 16 октября 2017 г.
* Дана оценка влияния высыпаний энергичных электронов на химический состав атмосферы для периода с сентября 2017 по март 2018, включающего внезапное стратосферное потепление (ВСП) в середине февраля 2018 года. Показано, что влияние ВСП в начальный период приводит к демпфированию сигнала в NO𝑥 и озоне, связанного со смещением циркумполярного вихря, увеличением горизонтального перемешивания и притока воздуха из нижележащей стратосферы. В завершающей фазе ВСП знак влияния восстанавливается, но амплитуда воздействия уменьшается.