

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

Миронова Ирина Александровна

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ НА АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ**

Научная специальность

1.3.1. Физика космоса, астрономия

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2023

## Содержание

1. Введение..... стр. 3-4
2. Задачи и результаты диссертационной работы.....стр. 5-13
  - 2.1.Краткое описание выполненной соискателем работы.....стр. 6
  - 2.2.Краткое описание результатов, полученных соискателем.....стр. 6 - 13
3. Основные положения, выносимые соискателем на защиту.....стр. 14 - 15
4. Список публикаций соискателя в хронологическом порядке.....стр. 16 - 21

## 1. Введение

Атмосфера Земли постоянно находится под воздействием энергичных заряженных частиц, которые попадают, или другими словами, высыпаются в ионосферу/атмосферу из магнитосферы Земли или межзвездного пространства. Такие частицы известны под общим названием энергичные высыпающиеся частицы; они проникают в атмосферу Земли и могут влиять на различные атмосферные процессы. Большинство энергичных частиц приходят из космоса, они известны как галактические космические лучи, и состоят в основном из протонов. Во время сильных солнечных протонных событий и выбросов корональных масс в атмосферу Земли проникают протоны солнечного происхождения. Дополнительным источником менее энергичных частиц является Солнечный ветер, состоящий в основном из электронов, которые могут ускоряться/захватываться в магнитосфере Земли. Такие частицы высыпаются в атмосферу из различных областей магнитосферы как под влиянием солнечного ветра, так и под действием внутренних магнитосферных процессов и геомагнитных возмущений. Множество процессов и их динамическая изменчивость приводят к большим вариациям пространственного, временного, спектрального распределения высыпающихся частиц. Высыпаясь в атмосферу, энергичные частицы влияют на всю атмосферу, создавая скорости ионизации атмосферы, от нижней термосферы / мезосферы через стратосферу и тропосферу до поверхности Земли. Все высыпающиеся энергичные частицы ионизируют нейтральные молекулы (например,  $N_2$  и  $O_2$ ) в атмосфере Земли и производят химически активные радикалы, такие как  $N$ ,  $NO$ ,  $H$  и  $OH$ . Распределение атмосферных скоростей ионизации в пространстве и времени зависит от типа высыпающихся частиц, от их взаимодействия с переменными гелиосферным и геомагнитным полями. Несмотря на это, прямые химические эффекты считаются более или менее одинаковыми и заключаются в дополнительном образовании оксидов водорода ( $HO_x = H + OH + HO_2$ ) и азота ( $NO_x = N + NO + NO_2$ ), способных ускорять каталитические реакции и приводить к разрушению озона. В диссертационной работе исследуются различные источники и энергии высыпающихся частиц, таких как галактические космические лучи, солнечные протоны связанные с эруптивными процессами на Солнце и высыпания энергичных электронов. Изучаются все предполагаемые на современном этапе механизмы воздействия энергичных высыпающихся частиц на атмосферу, включая скорости

ионизации атмосферы и их воздействие на озон в мезосфере и стратосфере, воздействия на глобальную электрическую цепь и на аэрозоли. Отдельное внимание уделяется изучению механизма воздействия электромагнитной радиации во время солнечных вспышек класса X на содержание озона в атмосфере. Изучение роли энергичных частиц в атмосфере Земли является междисциплинарной проблемой, связанной с изучением процессов распространения солнечных, галактических и магнитосферных энергичных частиц от Солнца до нижних слоев атмосферы Земли, и требующей знаний, как в области физики космоса и астрономии, так и в науках об атмосфере и климате.

## 2. Задачи и результаты диссертационной работы

В начале двухтысячных годов произошел прорыв в изучении процессов в цепочке солнечно-земных связей, обусловленный прорывом в разработке химико-климатических моделей, позволяющих учитывать солнечный форсинг через скорости ионизации атмосферы и изучение их воздействия на озон и локальный климат Земли. Однако потенциальная роль энергичных частиц в вариациях параметров атмосферы до сих пор остается малоизученной из-за больших неопределенностей в скоростях ионизации атмосферы, связанных с потоками выпадающих частиц. Поэтому одной из задач диссертационной работы является разработка численных моделей скоростей ионизации атмосферы во время высыпаний энергичных частиц, связанных с эруптивными солнечными протонными событиями, высыпаниями энергичных электронов из магнитосферы и вариациями потоков галактических космических лучей. Следующей задачей является проведение модельных расчетов скоростей ионизации атмосферы и получение численных оценок роли скоростей ионизации атмосферы в вариациях химического состава полярной атмосферы, в разрушении мезосферного и стратосферного полярного озона, воздействие на глобальную электрическую цепь и на полярный стратосферный аэрозоль. В итоге, в рамках диссертационной работы ставятся следующие задачи:

- Проведение модельных исследований распространения моноэнергичных электронов в атмосфере Земли, численный расчет скоростей ионизации атмосферы во время событий, связанных с высыпаниями энергичных электронов, и оценка их роли в разрушении полярного озона в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений и сезонов.
- Проведение модельных исследований распространения моноэнергичных протонов в атмосфере Земли, численный расчет скоростей ионизации атмосферы во время солнечных протонных событий типа GLE (Ground Level Enhancement) и определение их роли в формировании полярного стратосферного аэрозоля.
- Проведение модельных расчетов и получение результатов в виде численных оценок вариаций химического состава полярной атмосферы, в том числе озона во время уменьшений скоростей ионизации атмосферы, связанных с Форбуш-понижениями галактических космических лучей.
- Проведение модельных расчетов параметров электрической цепи в зависимости от процессов в магнитосфере и ионосфере, скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний энергичных частиц. Проведение модельных расчетов и

получение оценок степени воздействия электромагнитного излучения во время солнечных вспышек на химический состав высокоширотной атмосферы и озон.

## **2.1. Краткое описание выполненной соискателем работы**

- Постановка выполняемых задач, выполнение исследований и получение научных результатов.
- Модельные численные расчеты скоростей ионизации атмосферы во время событий, связанных с высыпаниями энергичных частиц.
- Численные оценки отклика атмосферы на события, связанные с высыпаниями энергичных частиц, с помощью моделирования, и верификация результатов с использованием спутниковых данных.

## **2.2. Краткое описание результатов, полученных соискателем**

Проведенные исследования и полученные результаты представляют созданное автором, в сотрудничестве с его коллегами и учениками, новое направление солнечно-земных исследований: «Скорости ионизации атмосферы как основное звено в цепочке солнечно-земных связей, необходимое для изучения воздействия космической погоды и солнечной активности на атмосферу Земли»:

### **I. Скорости ионизации атмосферы во время событий, связанных с высыпаниями энергичных электронов, и оценка их роли в разрушении полярного озона в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений и сезона**

Динамическое взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли приводит к ускорению энергичных магнитосферных частиц, частично высыпающихся в атмосферу. Важную роль в атмосферных процессах играют высыпающиеся популяции авроральных электронов и энергичных электронов радиационных поясов. Высыпание электронов в атмосферу происходит из различных областей магнитосферы, благодаря различным механизмам. Энергичные электроны с энергиями более десятков кэВ не проникают в атмосферу глубже приблизительно 50 км из-за больших ионизационных и радиационных потерь энергии. Однако энергичные электроны генерируют рентгеновское тормозное излучение, и это излучение может достигать высот около 20 км.

Высыпание электронов охватывает диапазон энергий от десятков кэВ до нескольких МэВ и продолжается от долей секунды до нескольких часов в зависимости от геомагнитных возмущений. Для того чтобы корректно оценивать эффекты в атмосфере во время высыпаний энергичных электронов, были проведены модельные исследования распространения моноэнергичных электронов в атмосфере Земли с учетом тормозного излучения [A13, A28, A30]. Были выделены два пика энерговыделения в атмосфере. Первый пик ионизации связан с прямой ионизацией первичных релятивистских электронов, а второй соответствует тормозному излучению. В работах [A13, A28, A30] представляются не только модельные таблицы распространения моноэнергичных электронов в атмосфере Земли, но и приводится разработанная технология расчета скоростей ионизации атмосферы во время событий, связанных с высыпаниями энергичных электронов. Разработанная технология расчета скоростей ионизации атмосферы от нижней термосферы до нижней стратосферы [A13, A28] позволила рассчитать скорости ионизации атмосферы на различных временных интервалах, во время различных уровней геомагнитной возмущенности с использованием реальных спектров высыпаний энергичных электронов, полученных по спутниковым и баллонным наблюдениям [A1-A3, A4, A7, A16, A19, A23, A24, A26, A37]. Было показано, что численные расчеты скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний в ионосферу энергичных электронов, демонстрируют сильную вариабельность и строгую зависимость от геомагнитных возмущений на разных высотах атмосферы от 120 до 25 км [A1-A3, A18, A19, A23, A26]. После сопоставления результатов наблюдений за высыпаниями энергичных электронов на спутниках и баллонах, был предложен критерий [A3], по которому можно контролировать скорости ионизации в атмосфере на высотах до 20-25 км по измерениям на спутниках. Применяя критерий [A3], (по данным со спутников поток высыпающихся энергичных электронов  $>800$  кэВ должен быть  $>100$  pfu), было оценено количество дней в году, когда высыпания энергичных электронов будут наблюдаться в нижней стратосфере северной полярной зоны (географическая широта  $60^{\circ}$ – $70^{\circ}$ , долгота  $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ , параметр МакИлвейна  $L = 4$ – $8$ ).

С помощью разработанной технологии расчета скоростей ионизации атмосферы [A13, A28] во время событий, связанных с высыпаниями энергичных электронов, сделаны оценки степени разрушения мезосферного озона в зависимости от сезона, места и интенсивности вариаций скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний энергичных электронов [A1, A4, A11, A18, A24, A26, A27, A31-A32]. Осенью и весной максимальное истощение мезосферного полярного озона может достигать 20% во время средней и сильной геомагнитной активности. Полярный мезосферный озон не может быть разрушен под

воздействием высыпаний энергичных электронов летом в присутствии УФ-излучения. В зимнее время максимальное истощение мезосферного полярного озона может достигать до 80% при сильных геомагнитных возмущениях. Получена линейная зависимость максимального истощения мезосферного озона в разные сезоны в зависимости от скоростей ионизации атмосферы во время высыпаний энергичных электронов во время геомагнитных возмущений.

## **II. Скорости ионизации атмосферы во время солнечных протонных событий типа GLE (Ground Level Enhancement) и определение их роли в формировании полярного стратосферного аэрозоля**

Основными источниками протонов в атмосфере Земли являются космические лучи, которые могут иметь галактическое, солнечное или гелиосферное происхождение. Доминирующей компонентой космических лучей являются протоны, около 10% (по числу частиц) составляют ядра He ( $\alpha$ -частицы), остальные ядра составляют менее 1%. Галактические космические лучи, постоянно поступающие из-за пределов Солнечной системы, состоят из протонов с энергиями приблизительно от  $10^7$  эВ до  $10^{21}$  эВ. Солнечные космические лучи, или энергичные солнечные частицы, появляются в околоземном пространстве спорадически, в связи с взрывными энерговыделениями на Солнце, и могут иметь энергию приблизительно до 10 ГэВ. Солнечные космические лучи (> 90% протоны) связаны с быстрыми мощными энерговыделениями на Солнце - солнечными вспышками и/или выбросами корональных масс. Энергетический спектр солнечных энергичных протонов охватывает более 4 порядков по энергии и более 8 порядков по интенсивности. Наиболее энергичные потоки солнечных протонов (свыше 1000 МэВ) могут инициировать нуклонно-электромагнитный каскад в атмосфере, приводя к нуклонным и мюонным компонентам, потенциально регистрируемым наземными детекторами (нейтронными мониторами). Такие эруптивные солнечные протонные события выделяют как отдельный класс/тип GLE (ground level enhancement) событий. Ионизационный эффект от GLE событий важен только в полярной атмосфере, где он может быть значительным в стратосфере (около 25-30 км) во время крупных GLE. Для того, чтобы корректно оценивать эффекты в атмосфере во время высыпаний энергичных протонов, были проведены модельные исследования распространения моноэнергичных протонов в атмосфере Земли. Модель распространения в атмосфере моноэнергичных солнечных протонов от 10 МэВ до сотни ГэВ и связанных с ними скоростей ионизации атмосферы и спектров потоков энергичных протонов во время эруптивных солнечных протонных событий типа GLE (ground level enhancement) представлены в работах [A38-A40,



A8, A21, A25, A29]. В статьях [A39-A40] представляются не только модельные таблицы распространения моноэнергичных электронов в атмосфере Земли, но и приводится разработанная технология расчета скоростей ионизации атмосферы во время событий, связанных с высыпаниями энергичных протонов во время крупных GLE событий.

С помощью разработанной технологии расчета скоростей ионизации атмосферы [A39-A40] во время GLE событий, связанных с высыпаниями энергичных протонов, определена роль скоростей ионизации атмосферы в формировании полярного стратосферного аэрозоля [A32, A34-A36]. Сочетание как минимум двух факторов может привести к формированию стратосферного аэрозоля: 1) существенное, по крайней мере примерно в два раза, увеличение скорости ионизации в полярной стратосфере и 2) зимний сезон без УФ и с низкой температурой, достаточной для образования полярных стратосферных облаков [A34 - A37, A39 -A41, A43 - A46].

### **III. Скорости ионизации атмосферы во время Форбуш-понижений галактических космических лучей и определение их роли в вариациях химического состава атмосферы**

Спорадические выбросы энергии на Солнце, солнечные вспышки и/или выбросы корональных масс, обычно сопровождаются сильными возмущениями, часто вызываемыми выбросами корональных масс, распространяющимися в межпланетной среде. Когда такое возмущение проходит вблизи Земли, оно приводит к подавлению интенсивности галактических космических лучей, известному как уменьшение Форбуша. Основной особенностью Форбуш-понижения является резкое (длительностью несколько часов) уменьшение интенсивности галактических космических лучей, вызванное прохождением возмущения, с последующим постепенным, почти экспоненциальным, восстановлением, которое может занять несколько дней и даже недель. Типичное Форбуш-понижение имеет величину около 4–5% (до 20%), наблюдаемую наземными нейтронными мониторами.

С помощью разработанной технологии расчета скоростей ионизации атмосферы [A39-A41], связанных с высыпаниями энергичных протонов, рассчитаны скорости ионизации атмосферы во время Форбуш-понижений галактических космических лучей и сделаны оценки степени разрушения озона и озон разрушающих групп (НОх и NOх). Анализ Форбуш-понижений галактических космических лучей в январе 2005 года показал что 18 и 21 января всемирная сеть нейтронных мониторов зафиксировала значительное снижение

скорости счета. Форбуш-понижение, вызванное межпланетным возмущением 18 января 2005 г., представляло собой сильное 15%-ное уменьшение потока галактических космических лучей, а 21 января 2005 г. Форбуш-понижение составило около 10%. В работе [A15], показано, что из-за снижения скоростей ионизации, вызванных Форбуш-понижениями, семейство радикалов оксида водорода (HOx) теряет около половины своей концентрации над полярной ночной стратосферой в зимний период. При этом устойчивый отклик в азотном семействе (NOx) и стратосферном озоне не обнаруживается, как и эффект от Форбуш-понижений галактических космических лучей в летнее время в южной полярной стратосфере [A15].

#### **IV. Вариации параметров электрической цепи в зависимости от процессов в магнитосфере и ионосфере, скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний энергичных частиц**

Высыпания энергичных частиц воздействуют не только на химический состав атмосферы и аэрозоли, но и на параметры электрической цепи. Поэтому на следующем этапе изучения воздействия энергичных частиц на атмосферу Земли возникла необходимость давать численную оценку изменению параметров электрической цепи в зависимости от процессов в магнитосфере, ионосфере и скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний энергичных частиц. В работе [A20] показано, что скорости ионизации атмосферы, во время экстремальных солнечных протонных событий приводят к значительному увеличению токов хорошей погоды в глобальном масштабе, а величина эффектов зависит от местоположения и может превышать фоновое значение более чем в 10 раз в высоких широтах. В работах [A12, A14] доказано, что высыпания энергичных электронов во время геомагнитных возмущений модулируют резонанс Шумана в высоких широтах и влияют на глобальное электронное содержание во время геомагнитных возмущений. Параметры глобальной электрической цепи также могут быть связаны с магнитосферными процессами [A5, A9-A10, A22], поэтому в работе [A5] была сделана попытка оценить степень воздействия флуктуаций Ву компоненты межпланетного магнитного поля на приземные метеорологические параметры через глобальную электрическую цепь атмосферы над полярными регионами. Однако модельные численные результаты не подтверждают связь приземной температуры и давления с воздействием Ву компоненты межпланетного магнитного поля через глобальную электрическую цепь атмосферы [A5].

## **V. Воздействия электромагнитного излучения во время солнечных вспышек на химический состав высокоширотной атмосферы и озон**

Состояние атмосферы Земли зависит от различных внешних космических и солнечных факторов [A33, A42, A47], в том числе, не только от высыпающихся энергичных частиц солнечного, галактического или магнитосферного происхождения, а также от солнечного излучения. Поэтому на этапе изучения эффектов в атмосфере, связанных со скоростями ионизации, было принято решение протестировать и дать оценки степени воздействия солнечного излучения во время вспышечной активности на озон-разрушающие группы NO<sub>x</sub>, NO<sub>y</sub> и озон. В работах [A6, A17] на основе модельных расчетов делается оценка степени воздействия солнечного излучения во время солнечной вспышечной активности в сентябре 2017 г. на озоноразрушающие компоненты и озоновый слой в атмосфере Земли. Для этого были выбраны две крупнейшие солнечные вспышки класса X 24-го солнечного цикла: вспышка X9.3 6 сентября и вспышка X8.2 10 сентября 2017 г. Для модельных численных оценок использовались данные о потоках излучения во всем спектре длин волн до 190 нм от солнечных вспышек в начале сентября 2017 г. Нечетное семейство азота и нечетная группа водорода были выбраны в качестве основных озоноразрушающих компонентов атмосферы. В работах [A6, A17] показано, что водородная группа (NO<sub>x</sub>) лишь незначительно подвержена вспышечной активности над экваториальными и полярными широтами. Статистически значимого отклика в семействе NO<sub>x</sub> не обнаружено. При анализе отклика нечетного семейства азота (NO<sub>y</sub>) было показано, что солнечное излучение во время двух солнечных вспышек 6 и 10 сентября 2017 г. увеличивало концентрацию NO<sub>y</sub> до 40% в мезосфере в районах экваториальных широт. Важно отметить, что солнечные вспышки в начале сентября 2017 г. привели к значительному увеличению концентраций реакционноспособных оксидов азота. Однако, это увеличение не повлияло на изменение содержания озона в тропической стратосфере, так как разрушение озона оксидами азота в верхней мезосфере неэффективно и отсутствуют устойчивые нисходящие движения, которые могут выносить излишки NO<sub>x</sub> вниз, в стратосферу. Таким образом, можно сделать вывод, что изменения озона, вызванные процессами, связанными с воздействием электромагнитного излучения на атмосферу Земли во время солнечных вспышек, если и будут иметь место, то только при более интенсивных солнечных вспышках, чем вспышки сентября 2017 года. Изменение химического состава атмосферы в полярных регионах мало и статистически не значимо [A6, A17].

**Выполнение диссертационных исследований соискателя, за последние 10 лет, в рамках выполнения научно-исследовательских проектов, поддержаны фондами:**

- Российскими научными фондами:

- РФФИ проект № 20-67-46016 “Экстремальные явления космической погоды: оценка воздействия на окружающую среду” (2020 - 2022 гг –руководитель)
- РФФИ международный проект № 20-55-12020 ННИО\_а “Высыпания высокоэнергичных электронов в атмосферу: оценка на основе аэростатных наблюдений и модельных расчетов (H-EPIC)” (2020 - 2022 гг –руководитель)
- РФФИ проект № 19-35-90134 Аспиранты, “Воздействие космических факторов на процессы в глобальной электрической цепи” (2021 -2019гг –руководитель)
- РФФИ проект № 20-0500450 А “Дневной и ночной механизм атмосферных свечений кислорода согласованный с ночным излучением гидроксила в мезосфере и нижней термосфере” (2021- 2020гг – исполнитель, 2022г–руководитель)
- РФФИ проект № 17-55-10014 КО\_а “Воздействие атмосферного электричества на погоду и климат, обусловленное облаками и осадками” (2018 - 2019гг – исполнитель)
- Мегагрант “Прогнозирование состояния озонового слоя с использованием моделирования и измерений состава атмосферы”, Соглашение № 075–15-2021-583 от 03.06.2021 г между Министерством науки и высшего образования РФ и СПбГУ (2021 -2023 гг – основной исполнитель)

- Зарубежными научными фондами:

- 2018-2019 – проект ISSI (Международный институт космических наук)  
«Релятивистские электронные осадки и их атмосферный эффект (ISSI в Берне и ISSI в Пекине)» Роль: Руководитель группы/проекта
- 2013-2015 гг. – проект ISSI (Международный институт космических наук)  
«Спецификация источников ионизации, влияющих на атмосферные процессы»  
Роль: Руководитель группы/проекта

- 2010-2012 гг. – проект ISSI (Международный институт космических наук).  
«Исследование влияния космических лучей на атмосферные процессы»  
Роль: Руководитель группы/проекта
- 2011-2015 гг. – проект COST ES1005 (ТОСКА) «На пути к более полной оценке влияния солнечной изменчивости на климат Земли».  
Роль: член коллектива и со-руководитель рабочей группы «Атмосферные эффекты энергетические частицы»
- 2016-2020 – проект COST CA15211 (ELECTRONET)  
«Сеть атмосферного электричества: соединение с Земной системой, климат и биологические системы»  
Роль: член коллектива

- Другими внешними организациями:

Договоры на НИР “Атмосферные эффекты выпадений энергичных электронов внешнего радиационного пояса: Часть I и Часть II” между СПбГУ и НИИЯФ МГУ, выполнение задач по междисциплинарному РФФИ проекту № 22-62-00048 (2022г-2023г – руководитель)

### 3. Основные положения, выносимые соискателем на защиту

Создано новое направление солнечно-земных исследований: «Скорости ионизации атмосферы как основное звено в цепочке солнечно-земных связей, необходимое для изучения воздействия космической погоды и солнечной активности на атмосферу Земли», основанное на положениях, выносимых на защиту:

1. Модельные оценки распространения в атмосфере моноэнергичных электронов от 30 кэВ до нескольких МэВ во время высыпаний в ионосферу энергичных электронов магнитосферного происхождения. Технологии расчета скоростей ионизации атмосферы от нижней термосферы до нижней стратосферы по спутниковым и баллонным наблюдениям. Численные расчеты скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний в ионосферу энергичных электронов, которые демонстрируют сильную вариабельность и строгую зависимость от геомагнитных возмущений на разных высотах атмосферы от 120 до 25 км [A1- A4, A7, A13, A16, A18-A19, A23-A24, A26, A30, A37].

2. С помощью модельных расчетов скоростей ионизации атмосферы по данным спутниковых и баллонных наблюдений сделаны оценки степени разрушения мезосферного озона в зависимости от сезона, места и интенсивности вариаций скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний энергичных электронов. Осенью и весной максимальное истощение мезосферного полярного озона может достигать 20% во время средней и сильной геомагнитной активности. Полярный мезосферный озон не может быть разрушен под воздействием высыпаний энергичных электронов летом в присутствии УФ-излучения. В зимнее время максимальное истощение мезосферного полярного озона может достигать 80% при сильных геомагнитных возмущениях. Получена линейная зависимость максимального истощения мезосферного озона в разные сезоны в зависимости от скоростей ионизации атмосферы во время высыпаний энергичных электронов во время геомагнитных возмущений [A1- A3, A4, A7, A11, A13, A16, A18-A19, A23-A24, A26, A27-A28, A30-A32, A37].

3. Модельные оценки распространения в атмосфере моноэнергичных солнечных протонов от 10 МэВ до сотни ГэВ и технологии расчета скоростей ионизации атмосферы во время эруптивных солнечных протонных событий типа GLE (ground level enhancement). На основе модельных расчетов скоростей ионизации атмосферы во время эруптивных солнечных протонных событий типа GLE определена роль скоростей ионизации атмосферы в формировании полярного стратосферного аэрозоля. Сочетание как минимум двух факторов может привести к формированию стратосферного аэрозоля: 1) существенное, по крайней

мере, примерно в два раза, увеличение скорости ионизации в полярной стратосфере и 2) зимний сезон без УФ и с низкой температурой, достаточной для образования полярных стратосферных облаков [A8, A21, A25, A29, A34 - A37, A38 -A40, A43 - A46].

4. На основе модельных расчетов скоростей ионизации атмосферы во время Форбуш-понижений галактических космических лучей сделаны оценки степени разрушения озона и озон разрушающих групп (НОх и NOх). Из-за снижения скоростей ионизации, вызванных Форбуш-понижениями, семейство радикалов оксида водорода (НОх) теряет около половины своей концентрации над полярной ночной стратосферой в зимний период. При этом устойчивый отклик в азотном семействе (NOх) и стратосферном озоне не обнаруживается, как и эффект от Форбуш-понижений галактических космических лучей в летнее время в южной полярной стратосфере [A15, A39 - A41].

5. С помощью модельных исследований дана оценка изменений параметров электрической цепи в зависимости от процессов в магнитосфере, ионосфере и скоростей ионизации атмосферы под воздействием высыпаний энергичных частиц. Скорости ионизации атмосферы во время экстремальных солнечных протонных событий приводят к значительному увеличению токов хорошей погоды в глобальном масштабе, а величина эффектов зависит от местоположения и может превышать фоновое значение более чем в 10 раз в высоких широтах. Высыпания энергичных электронов во время геомагнитных возмущений модулируют резонанс Шумана в высоких широтах и влияют на глобальное электронное содержание во время геомагнитных возмущений. Вместе с тем, изучение влияния флуктуаций Ву компоненты межпланетного магнитного поля через глобальную электрическую цепь не подтвердило заметного воздействия на приземные метеорологические параметры. [A5, A9 – A10, A12, A14, A22].

6. С помощью модельных исследований дана оценка степени воздействия электромагнитного излучения во время солнечных вспышек на химический состав атмосферы и озон. Электромагнитное излучение от солнечных вспышек класса X может привести к значительному увеличению концентрации семейств оксидов азота (NOх) в экваториальных широтах. Однако это увеличение не влияет на изменение содержания озона в тропической стратосфере. Изменение химического состава атмосферы в полярных регионах мало и статистически не значимо [A6, A17].

#### 4. Список публикаций соискателя в хронологическом порядке

A1. Mironova I, Grankin D, Rozanov E. Mesospheric Ozone Depletion Depending on Different Levels of Geomagnetic Disturbances and Seasons. *Atmosphere*. 2023; 14(8):1205.

<https://doi.org/10.3390/atmos14081205>

A2. Makhmutov V., Mauricev E., Bazilevskaya G., Mironova I. Development of a method for reconstructing the energy spectra of precipitating electrons from measurements in the atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023, 63, 5, 638–643. doi:10.31857/S0016794023600564

A3. Mironova I, Bazilevskaya G, Makhmutov V, Mironov A, Bobrov N. Energetic electron precipitation via satellite and balloon observations: their role in atmospheric ionization. *Remote Sensing*. 2023; 15(13):3291.

<https://doi.org/10.3390/rs15133291>

A4. Grankin D, Mironova I, Bazilevskaya G, Rozanov E, Egorova T. Atmospheric Response to EEP during Geomagnetic Disturbances. *Atmosphere*. 2023; 14(2):273.

<https://doi.org/10.3390/atmos14020273>

A5. Karagodin A, Rozanov E, Mironova I. On the possibility of modeling the IMF  $B_y$ -weather coupling through gec-related effects on cloud droplet coalescence rate. *Atmosphere*. 2022;

13(6):881. <https://doi.org/10.3390/atmos13060881>

A6. Pikulina P, Mironova I, Rozanov E, Karagodin A. September 2017 Solar Flares Effect on the Middle Atmosphere. *Remote Sensing*. 2022; 14(11):2560. <https://doi.org/10.3390/rs14112560>

A.7. Mironova I., Sinnhuber M., Bazilevskaya G., Clilverd M., Funke B., Makhmutov V., Rozanov, E., Santee M. L., Sukhodolov T., and Ulich T. Exceptional middle latitude electron precipitation detected by balloon observations: implications for atmospheric composition. *Atmos. Chem. Phys.* 2022.; 22, 6703–6716, <https://doi.org/10.5194/acp-22-6703-2022>

A.8. Usoskin, I., Koldobskiy, S., Kovaltsov, G., Mishev, A., Mironova I. Strongest directly observed Solar Proton Event of 23-Feb-1956: Revised reference for the cosmogenic-isotope method. *Proceedings of Science*, 2022; 395. 1319.

<https://doi.org/10.22323/1.395.1319>



- A.9. Mironova I, Füllekrug M, Kourtidis K and Mareev E. Editorial: atmospheric electricity. *Front. Earth Sci.*, 2022;10:853584. doi: 10.3389/feart.2022.853584
- A.10. Mironova, I., Karagodin, A., Rozanov, E. Sensitivity of Surface Meteorology to Changes in Cloud Microphysics Associated with IMF By. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences* 2022; pp. 413-420.
- A.11. Makhmutov, V.S., Bazilevskaya, G.A., Mironova, I.A. *et al.* Atmospheric Effects during the Precipitation of Energetic Electrons. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 85, 1310–1313 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1062873821110228>
- A.12. Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., Bessarab, F.S., Mironova, I.A., Rozanov, E.V. On possible causes of positive disturbance of global electronic content during a complex heliogeophysical event on september 2017. *Cosmic Research.* 2021; 59(6). 456–462 doi: 10.1134/S0010952521060046
- A.13. Mironova I, Kovaltsov G, Mishev A, Artamonov A. Ionization in the earth's atmosphere due to isotropic energetic electron precipitation: ion production and primary electron spectra. *Remote Sensing.* 2021; 13(20):4161. <https://doi.org/10.3390/rs13204161>
- A.14. Bozóki T, Sători G, Williams E, Mironova I, Steinbach P, Bland EC, Koloskov A, Yampolski YM, Budanov OV, Neska M, Sinha AK, Rawat R, Sato M, Beggan CD, Toledo-Redondo S, Liu Y and Boldi R. Solar cycle-modulated deformation of the earth–ionosphere cavity. *Front. Earth Sci.* 2021; 9:689127. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.689127>
- A.15. Mironova I, Karagodin-Doyennel A and Rozanov E. The Effect of Forbush Decreases on the Polar-Night HO<sub>x</sub> Concentration Affecting Stratospheric Ozone. *Front. Earth Sci.* 2021; 8:618583. doi: 10.3389/feart.2020.618583
- A.16. Grankin D. V., Mironova I. A., Rozanov E. V. Polar winter mesospheric ozone depletion during energetic electron precipitation. *Proc. SPIE.* 2021; 11916. 119167Z. <https://doi.org/10.1117/12.2603373>

A.17. Pikulina P. O., Mironova I. A., Rozanov E. V., Sukhodolov T. V., and Karagodin A. V. Response of the upper atmosphere to irradiance increase after the solar flare on 6 September 2017. *Proc. SPIE* . 2021; 11916.1191680.  
<https://doi.org/10.1117/12.2603374>

A.18. Mironova I., Sinnhuber M., Rozanov E. Energetic electron precipitation and their atmospheric effect. *E3S Web of Conferences*. 2020; 196. doi:10.1051/e3sconf/202019601005

A.19. Yakovchuk O. and Mironova I. Energetic Particle Precipitation during Extreme Space Weather Events. *E3S Web of Conferences*. 2020; 196. doi:10.1051/e3sconf/202019601006

A.20. Golubenko, K., Rozanov, E., Mironova, I., Karagodin, A., Usoskin, I. Natural sources of ionization and their impact on atmospheric electricity. *Geophysical Research Letters*. 2020; 47, e2020GL088619. <https://doi.org/10.1029/2020GL088619>

A.21. Usoskin, I. G., Koldobskiy, S. A., Kovaltsov, G. A., Rozanov, E. V., Sukhodolov, T. V., Mishev, A. L., Mironova, I. A. Revisited reference solar proton event of 23 February 1956: Assessment of the cosmogenic-isotope method sensitivity to extreme solar events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2020; 125, e2020JA027921.  
<https://doi.org/10.1029/2020JA027921>

A.22. Karagodin, A., Rozanov, E., Mareev, E., Mironova, I., Volodin, E., & Golubenko, K. The representation of ionospheric potential in the global chemistry-climate model SOCOL. *Sci. Total. Environ.* 2019; 697, 134172.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134172>

A.23. Mironova, I.; Bazilevskaya, G.; Kovaltsov, G.; Artamonov, A.; Rozanov, E.; Mishev, A.; Makhmutov, V.; Karagodin, A.; Golubenko, K. Spectra of high energy electron precipitation and atmospheric ionization rates retrieval from balloon measurements. *Sci. Total. Environ.* 2019; 69, 133242. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.048>

A.24. Golubenko, K., Mironova, I., Rozanov, E. Impact of middle range energy electron precipitations on polar winter ozone losses. *E3S Web of Conferences*. 2019; 127.  
doi:10.1051/e3sconf/201912701005

A.25. Krivolutsky, A.A., Repnev, A.I., Mironova, I.A. *et al.* Results of Russian studies of the middle atmosphere in 2015–2018. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2019; 55, 537–551.

<https://doi.org/10.1134/S0001433819060069>

A.26. Mironova, I. A., Artamonov, A. A., Bazilevskaya, G., Rozanov, E., Kovaltsov, G. A., Makhmutov, V. S., Mishev A. L., Karagodin A. V. Ionization of the polar atmosphere by energetic electron precipitation retrieved from balloon measurements. *Geophysical Research Letters*. 2019; 46, 990–996.

<https://doi.org/10.1029/2018GL079421>

A.27. Karagodin, A.; Mironova, I.; Artamonov, A.; Konstantinova, N. Response of the total ozone to energetic electron precipitation events. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2018; 180, 153–158

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.009>

A.28. Artamonov, A., Mironova, I., Kovaltsov, G., Mishev, A., Plotnikov, E., and Konstantinova, N. Calculation of atmospheric ionization induced by electrons with non-vertical precipitation: updated model CRAC-EPII. *Adv. Space Res.* 2017; 59 (9), 2295–2300.

[doi:10.1016/j.asr.2017.02.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.019)

A.29. Krivolutsky, A.A., Vyushkova, T.Y., Mironova, I.A. Changes in the chemical composition of the atmosphere in the polar regions of the Earth after solar proton flares (3d modeling). *Geomagn. Aeron.* 2017; 57, 156–176.

<https://doi.org/10.1134/S0016793217020074>

A.30. Mishev, A. ; Artamonov, A. ; Kovaltsov, G. ; Mironova, I. ; Usoskin, I. Computation of electron precipitation atmospheric ionization: updated model CRAC-EPII

*Proceedings of Science*. 2018; 301. <https://doi.org/10.22323/1.301.0086>

A.31. Rozanov, E., Georgieva, K., Mironova, I. Tinsley B., Aylward A. Foreword: Special issue on “Effects of the solar wind and interplanetary disturbances on the Earth’s atmosphere and climate”.

*J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2016; 149, 146–150.

[doi:10.1016/j.jastp.2016.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.012)

A.32. Mironova, I.A., Aplin, K.L., Arnold, F., Bazilevskaya, G.A., Harrison,

R.G., Krivolutsky, A.A., Nicoll, K.A., Rozanov, E.V., Turunen, E., Usoskin, I.G. Energetic

Particle Influence on the Earth's Atmosphere. *Space Sci Rev.* 2015; 194, 1–96.

<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>

A.33. Morozova, A. L. and Mironova, I. A. Aerosols over continental Portugal (1978–1993): their sources and an impact on the regional climate, *Atmos. Chem. Phys.* 2015; 15, 6407–6418,

<https://doi.org/10.5194/acp-15-6407-2015>

A.34. Seppälä, A.; Matthes, K.; Randall, C.E.; Mironova, I.A. What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II. *Prog. in Earth and Planet. Sci.* 2014; 1. 24.

<https://doi.org/10.1186/s40645-014-0024-3>

A.35. Mironova, I. A. and Usoskin, I. G.: Possible effect of extreme solar energetic particle events of September–October 1989 on polar stratospheric aerosols: a case study, *Atmos. Chem. Phys.*,

2013; 13, 8543–8550. <https://doi.org/10.5194/acp-13-8543-2013>

A.36. Mironova, I. A., Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A., and Petelina, S. V.: Possible effect of extreme solar energetic particle event of 20 January 2005 on polar stratospheric aerosols: direct observational evidence, *Atmos. Chem. Phys.*, 2012; 12, 769–778. <https://doi.org/10.5194/acp-12-769-2012>.

A.37. Mironova, I., Tinsley, B., Zhou, L. The links between atmospheric vorticity, radiation belt electrons, and the solar wind. *Adv. Space Res.* 2012; 50, 783 -

790. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.043>

A.38. Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A., Mironova, I. A., Tylka, A. J., and Dietrich, W. F.: Ionization effect of solar particle GLE events in low and middle atmosphere, *Atmos. Chem. Phys.* 2011; 11,

1979–1988, <https://doi.org/10.5194/acp-11-1979-2011>, 2011.

A.39. Usoskin, I., Kovaltsov, G.A. Mironova, I.A., Numerical model of cosmic ray induced ionization in the atmosphere CRAC:CRII. *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference*, ICRC 2011. 2011; 11, 344-347 doi: 10.7529/ICRC2011/V11/0284

A.40. Usoskin, I. G., G. A. Kovaltsov, and I. A. Mironova. Cosmic ray induced ionization model CRAC:CRII: An extension to the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.* 2010; 115. D10302.

doi:10.1029/2009JD013142

- A.41. Usoskin, I.G., I.A. Mironova, M. Korte, G.A. Kovaltsov, Regional millennial trend in the cosmic ray induced ionization of the troposphere, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010; 72, pp.19-25, doi:10.1016/j.jastp.2009.10.003
- A.42. Barlyaeva, T.V.; Mironova, I. A.; Ponyavin D, Nature of Decadal Variations in the Climatic Data of the Second Half of the 20th Century, *Doklady Earth Science*, 2009; 425 (2), 419-423. doi:10.1134/S1028334X09030155
- A.43. Mironova, I.A., L. Desorgher, I.G. Usoskin, E.O. Flückiger, and R. Bütikofer, Variations of aerosol optical properties during the extreme solar event in January 2005, *Geophys. Res. Lett.* 2008; 35, L18610doi:10.1029/2008GL035120
- A.44. Böckmann, C. , I. Mironova, D.Muller, L.Schneidenbach, R.Nessler, Microphysical aerosol parameters from multivavelength lidar, *J.Opt.Soc.Am.*, 2005; 22, 3, 518-528. doi:10.1364/JOSAA.22.000518
- A.45. Mironova I.A., Pudovkin M.I. Increase in the Aerosol Content of the Lower Atmosphere after the Solar Proton Flares in January and August 2002 according to Data of Lidar Observations in Europe, *J.Geomagnetism and Aeronomy*, 2005; 45. 2.234-240
- A.46. Mironova, I.A., Pudovkin, M.I., Böckmann, C. Variations of aerosol optical properties and solar proton events. *European Space Agency, ESA SP*. 2004; 2(561). 617-619
- A.47. Mironova I.A. The effect of solar activity on carbon dioxide concentration in the low atmosphere, *J.Geomagnetism and Aeronomy*, 2002; 42. 1. 135-138