

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН



чл. корр. РАН

А.А. Петрукович

«19» ноября 2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки
Института космических исследований Российской академии наук

Диссертация «Динамика заряженных частиц в геомагнитном поле в процессе его инверсии. Радиационная обстановка Земли и Европы — спутника Юпитера» выполнена в отделе Физики космической плазмы Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Царева Ольга Олеговна работала в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2020 году О.О. Царева окончила очную аспирантуру Института космических исследований РАН по специальности «Теоретическая физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2020 г. ИКИ РАН.

Научный руководитель:

- доктор физико-математических наук, Попов Виктор Юрьевич, профессор МГУ им. Ломоносова, ведущий научный сотрудник ФГБУН ИКИ РАН;

По результатам рассмотрения диссертации «Динамика заряженных частиц в геомагнитном поле в процессе его инверсии. Радиационная обстановка Земли и Европы — спутника Юпитера» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Диссертационная работа посвящена возможным угрозам для жизни на Земле во время геомагнитной инверсии и на спутнике Юпитера – Европе.

Глобальное магнитное поле Земли, существующее благодаря работе внутреннего динамо-механизма подвержено непрерывным изменениям, самые длительные из которых – это геомагнитные инверсии. Согласно палеоданным последняя инверсия магнитного поля произошла около 780 тысяч лет назад на границе эпох Матуяма–Брунеса, а ее

продолжительность составляла 7 тысяч лет. На основании наблюдений магнитное поле Земли в настоящее время ослабевает, а магнитные полюса смещаются, что может свидетельствовать о начале геомагнитной инверсии в ближайшем (в геологическом масштабе) будущем. Инверсия магнитного поля вызывает закономерную тревогу у человечества, прежде не сталкивающегося с этим относительно редким явлением. Возникают вопросы об изменении радиационных поясов Земли, атмосферы и радиационной обстановки в процессе геомагнитной инверсии.

Европа – спутник Юпитера – вызывает интерес у исследователей, поскольку она имеет водный океан под ледяной корой, в котором не исключено наличие микроскопической жизни. Однако орбита Европы лежит в радиационных поясах Юпитера, поэтому радиация может существенно ограничивать возможность обнаружения жизни на ней. Отсюда возникает вопрос о радиационной обстановке на поверхности Европы.

В первой главе сделано обобщение теории Штермера на случай суперпозиции аксиально-симметричных дипольно-квадрупольных магнитных полей, позволившее исследовать нелинейную динамику заряженных частиц, в частности определять их области захвата и жесткость геомагнитного обрезания в рассматриваемой конфигурации. Показано, что при ослабевании дипольной компоненты возникнет и будет увеличиваться новая область захвата частиц в южной доле поля, а сепаратриса между северным и южным долями, которая (наряду с магнитными полюсами) обеспечивает еще один путь проникновения заряженных частиц в ионосферу Земли, будет мигрировать с юга к экватору.

Во второй главе исследована диссипация атмосферы в процессе геомагнитной инверсии. Показано, что во время геомагнитной инверсии магнитное экранирование все еще эффективно защищает атмосферу Земли от распыления (sputtering) и захвата ионов (ion pickup) солнечным ветром, но способствует полярному и авроральному ветрам. По мере того, как магнитный дипольный момент убывает во время инверсии, площадь полярных шапок и скорость потери ионов из них увеличивается до тех пор, пока не изменится конфигурация магнитного поля. Новая конфигурация поля содержит квадрупольный экваториальный пояс и две полярные шапки, чья общая площадь достигает минимума при исчезновении дипольной компоненты, поэтому суммарная скорость потери ионов резко падает, а затем увеличивается с уменьшением напряженности квадрупольного поля. Оценено, что в предположении постоянного притока частиц от Земли в атмосферу скорость потери атмосферных ионов в процессе инверсии увеличится в 2.5 раза, т. е. атмосфера станет немного тоньше, но в чистой квадрупольной конфигурации скорость потери частиц уменьшится в 2 раза, и атмосфера

будет немного более плотной. Следовательно, для оценки доз радиации в первом приближении можно предполагать, что во время инверсии атмосфера Земли в целом не изменится.

В третьей главе, в рамках разработанной модели нелинейной динамики заряженных частиц в магнитном поле, исследована радиационная обстановка на Земле и околоземном пространстве в момент геомагнитной инверсии. Получено, что (при условии постоянных атмосферных свойств) средние эффективные дозы радиации протонов ГКЛ и СКЛ на поверхности Земли в момент инверсии увеличатся примерно в три раза по сравнению с уровнем 2015 года. Изменение конфигурации магнитного поля приведет к широтным перераспределением радиации, в связи с этим мощность эффективной дозы СКЛ и ГКЛ на орбите МКС увеличится в 14 раз.

В четвертой главе создана модель нелинейной динамики заряженных частиц в дипольном поле Юпитера, (в отличие от используемого приближения ведущего центра) включающая в себя более реалистичное поле Юпитера, альфвеновские крылья, индуцированное и внутреннее магнитные поля Европы. С ее помощью была уточнена и дополнена карта доз радиации на поверхности Европы в предположении электронно-протонного состава радиационных поясов Юпитера.

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены автором при поддержке и участии научных руководителей и соавторов публикаций. Автором была разработана численная модель, позволяющая получать спектры КЛ при их прохождении магнитосферы планеты, а также пространственное распределение частиц, осаждающих планету. Она была применена для магнитосфер Земли и Юпитера, и позволила автору рассчитать дозы радиации на поверхностях Земли (во время инверсии) и Европы. Автор обобщил классическую теорию Штермера на общий случай суперпозиции полей. Автором были оценены скорости потери атмосферных ионов при осесимметричной суперпозиции диполя и квадруполя. Автор использовал сценарии геомагнитной инверсии, полученные Popova (2016) и Glatzmaier & Roberts (1995) в рамках динамо моделей.

Степень достоверности результатов проведенного исследования

Достоверность результатов подтверждается 6 публикациями в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, а также докладами на российских и международных

конференциях: Конференция молодых ученых ИКИ РАН (2017 – 2020), General Assembly of European Geosciences Union (2018 – 2019), Ломоносовские чтения (2018 – 2020), Ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (2017 – 2018).

Научная новизна полученных результатов

Теория Штермера, ранее используемая для дипольной конфигурации, была развита на случай суперпозиции двух осесимметричных полей, диполя и квадруполья. Это позволило применить ее для исследования динамики заряженных частиц в процессе геомагнитной инверсии. Впервые оценена скорость диссипации атмосферы в процессе геомагнитной инверсии. Обнаружено, что скорость потери ионосферных частиц может вырасти в 2.5 раза, а затем упасть в 2 раза. Впервые оценены дозы радиации на поверхности Земли и околоземном пространстве в момент инверсии. Показано, что в предположении неизменной толщины атмосферы и ее состава средние мощности эффективных доз протонов КЛ возрастут примерно в 3 раза, а области повышенной радиации перераспределятся по поверхности Земли. При помощи прямого численного моделирования, включающего наклонный диполь Юпитера, крылья Альфвена, индуцированное и внутреннее поля Европы, построена карта доз радиации на поверхности Европы (под слоями льда разной толщины). Проведенное моделирование позволило уточнить и дополнить известные результаты, полученные с помощью приближения ведущего центра.

Научная и практическая значимость результатов исследования

Согласно наблюдениям, современное магнитное поле Земли ослабевает, а магнитные полюса смещаются, что может свидетельствовать о начале инверсии. Поскольку человечество, как вид, ни разу не переживало геомагнитных инверсий, возникает вопрос, несет ли будущая инверсия угрозу для жизни на Земле?

Результаты этой работы носят модельный и оценочный характер. С одной стороны они опровергают работы, в которых авторы предполагают массовую гибель всего живого на Земле. Результаты не свидетельствуют о критическом повышении радиационного фона на Земле или о потере значительной части атмосферы через диссипацию. В то же время, они предупреждают о радиационной опасности при нахождении людей в космосе в период геомагнитной инверсии. Численная модель была также адаптирована для нахождения концентрации протонов и электронов радиационных поясов Юпитера на

поверхности Европы, и тем самым позволила оценить ее радиационную обстановку. Проведенное исследование может быть полезно для планируемых в ближайшем будущем миссий на Европу.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

1. Царева О.О., Попов В.Ю., Малова Х.В., Зеленый Л.М., Попова Е.П. & Подзолко М.В. 2018 Что ожидает человечество при инверсии магнитного поля Земли: угрозы мнимые и подлинные. *Успехи физических наук* **188** (2), 208-220. DOI: 10.3367/UFNr.2017.07.038190
Tsareva, O. O., Zelenyi, L. M., Malova, H. V., Podzolko, M. V., Popova, E. P. & Popov, V. YU. 2018 What expects humankind during the inversion of the Earth's magnetic field: threats imagined and real. *Physics-Uspokhi* **61** (2), 191-202. DOI: 10.3367/UFNe.2017.07.038190
2. Царева О.О., Попов В.Ю., Малова Х.В., Зеленый Л.М., Попова Е.П. & Подзолко М.В. 2018 Моделирование взаимодействия галактических и солнечных космических лучей с магнитным полем Земли в процессе инверсии. *Ученые записки физического факультета Московского университета* (5), 1850305-1 – 1850305-8.
3. Tsareva, O. O. 2019 Generalization of Störmer theory for an Axisymmetric Superposition of Dipole and Quadrupole Fields. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* **124**, 2844-2853. DOI: 10.1029/2018JA026164
4. Царева, О. О., Зеленый, Л. М., Малова, Х. В. & Попов, В.Ю. 2020 Радиационные пояса в процессе инверсии магнитного поля Земли. *Космические исследования* **58** (4), 1-8, DOI: 10.31857/S002342062004010X
Tsareva, O. O., Zelenyi, L. M., Malova, H. V. & Popov, V. YU. 2020 Radiation Belts during a Magnetic Field Reversal. *Cosmic Research* **58** (4), pp. 227–233, DOI: 10.1134/S0010952520040103
5. Tsareva, O. O., Dubinin, E. M., Malova, H. V., Popov, V. YU. & Zelenyi, L. M. 2020 Atmospheric escape from the Earth during geomagnetic reversal. *Annals of Geophysics (Physics of the Atmosphere)* **63** (2), PA222, DOI: 10.4401/ag-8354
6. Dubinin, E., Fraenz, M., Pätzold, M., Woch, J., McFadden, J., Fan, K., Wei, Y., Tsareva, O. & Zelenyi, L. 2020 Impact of Martian Crustal Magnetic Field on the Ion Escape. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **125** (10), e2020JA028010, DOI: 10.1029/2020JA028010

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.04.02 — Теоретическая физика»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «01.04.02 — Теоретическая физика»: «Релятивистская астрофизика» и «Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей нелинейной динамики».

ВЫВОД. Кандидатская диссертация Царевой Ольги Олеговны «Динамика заряженных частиц в геомагнитном поле в процессе его инверсии. Радиационная обстановка Земли и Европы — спутника Юпитера» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики космической плазмы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 10 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «19» ноября 2020 г.

Зам. председателя НТС отдела 54 ИКИ РАН

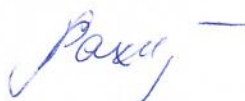
д.ф.-м.н.,



Д.Р. Шкляр

Секретарь НТС отдела 54 ИКИ РАН

к.ф.-м.н.



Л.С. Рахманова