

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор Института физики
Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
_____ /И/_____
чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук
С. А. Тихоцкий
«01» февраля 2021 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации ИФЗ РАН на диссертацию Царевой Ольги Олеговны «Динамика заряженных частиц в геомагнитном поле в процессе его инверсии. Радиационная обстановка Земли и Европы — спутника Юпитера», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — Теоретическая физика.

Диссертационная работа О.О. Царевой посвящена нелинейной динамике заряженных частиц в магнитном поле Земли во время его инверсии и в магнитном поле Юпитера вблизи его спутника — Европы. Во время инверсии магнитное поле Земли и, соответственно, защита от космического излучения предположительно ослабнут. Согласно наблюдениям, в настоящее время напряженность магнитного поля Земли уменьшается, а его магнитные полюса смещаются, что может свидетельствовать о начале новой инверсии (или экскурса). По палеомагнитным данным последний раз геомагнитная инверсия произошла около 780 тысяч лет назад, а значит, человечество прежде не сталкивалось с этим относительно редким явлением. Возникают актуальные вопросы: какую угрозу для жизни на Земле несет будущая инверсия? Как могли повлиять на эволюцию жизни на Земле прошедшие инверсии? Для строго количественного ответа на них О.О. Царевой были исследованы радиационная обстановка на Земле и в околоземном пространстве, радиационные пояса и атмосфера Земли в процессе геомагнитной инверсии. Кроме того, важная проблема при планетных исследованиях возникает при изучении Европы - спутника Юпитера, т.к. она подвержена сильному излучению радиационных поясов Юпитера и имеет подледниковый потенциально обитаемый океан. Важность оценки радиационной обстановки на поверхности Европы для планируемых миссий делает работу О.О. Царевой особенно актуальной.

Диссертационная работа О.О. Царевой состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Список используемой литературы содержит 168 наименований.

Введение диссертационной работы представляет собой краткий обзор строения магнитосферы Земли и влияния солнечного ветра на динамику системы. Приведены предпосылки будущей геомагнитной инверсии, ее наблюдательные и теоретические обоснования. Представлен обзор исследований причинно-следственных связей между жизнью и эволюцией геомагнитного поля. Показана актуальность, новизна и значимость представленной работы. Сформулированы основные результаты работы и положения, выносимые на защиту. Приведен список работ автора по теме диссертации. Охарактеризован личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию.

Глава 1 посвящена анализу эволюции радиационных поясов в процессе геомагнитной инверсии. Классическая теория Штермера, описывающая траектории заряженных частиц в дипольном поле, была обобщена на суперпозицию аксиально-симметричных магнитных диполя и квадруполья. Осесимметричное магнитное поле представлено с помощью потенциалов Эйлера. Выявлены разрешенные и запрещенные области движения заряженных частиц в дипольно-квадрупольном поле, а также их области захвата, обеспечивающие устойчивое существование радиационных поясов. Получена формула для вертикальной жесткости геомагнитного

обрезания космических лучей в суперпозиции полей. Показано, что согласно инверсионному сценарию, при ослабевании дипольной компоненты возникнет и будет увеличиваться новая область захвата частиц в южной доле поля. А сепаратриса между северным и южным долями магнитного поля, которая (наряду с магнитными полюсами) обеспечивает еще один путь проникновения заряженных частиц на Землю, будет мигрировать с юга к экватору.

В **Главе 2** оценена скорость диссипации атмосферы в процессе геомагнитной инверсии. Согласно сделанным в работе оценкам, магнитное экранирование атмосферы Земли во время инверсии будет все еще эффективно. Собственное магнитное поле Земли защищает атмосферу от распыления и захвата ионов ионосферы солнечным ветром, но не препятствует полярному ветру через открытые силовые линии. Источниками энергии полярного ветра являются ионизирующая солнечная радиация и энергия солнечного ветра, а скорости потерь ионов пропорциональны суммарной площади областей открытых силовых линий. Показано, что 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 (квадрупольная конфигурация), 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, но в чистой квадрупольной конфигурации скорость потери частиц уменьшится в 2 раза. Проведенные расчеты позволяют оценить скорость потери Земли своей атмосферы во время инверсии.

В **Главе 3** для определения доз радиации и их распределения на поверхности планеты была разработана численная модель динамики заряженных частиц в произвольном магнитном поле. В рамках модели, согласно инверсионному сценарию, в котором дипольная компонента магнитного поля обратится в ноль, а квадрупольная не изменится, оценена радиационная опасность на Земле и на высоте 400 км, соответствующей орбите МКС. Показано, что время минимума солнечной активности средние эффективные дозы радиации протонов ГКЛ должны увеличиться примерно в три раза. Изменение конфигурации магнитного поля приведет к перераспределению областей повышенной радиации на поверхности Земли, которые в настоящее время расположены вокруг магнитных полюсов. Во время инверсии при максимальной солнечной активности мощность эффективной дозы СКЛ и ГКЛ на орбите МКС может увеличиться в 14 раз, что связано с широтным перераспределением радиации.

В **Главе 4** создана модель движения заряженных частиц в дипольном поле Юпитера, включающая в себя реалистичное поле Юпитера, крылья Альфвена, 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. Показано, что области высыпания электронов на поверхность Европы в наклонном диполе Юпитера больше по размеру и концентрации частиц, чем области в осесимметричном диполе, используемом в приближении ведущего центра. Индуцированное магнитное поле снижает дозы радиации на поверхности Европы, увеличивая области их распространения. Крылья Альфвена не влияют на общую дозу облучения, а перераспределяют ее. Получено, что индуцированное и внутреннее поля Европы снижают максимальную дозу на поверхности почти в 2 раза. Проведенные исследования могут быть полезными для планируемых в ближайшем будущем миссий на Европу.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы. Геомагнитная инверсия приводит к реконфигурации радиационных поясов, атмосферным изменениям и ухудшению

радиационной обстановки. Однако полученные результаты не свидетельствуют о критическом повышении радиационного фона на Земле или о потере значительной части атмосферы через диссипацию. Моделирование динамики заряженных частиц вблизи Европы позволило уточнить результаты, полученные с помощью приближения ведущего центра. Новая карта доз радиации на поверхности Европы отличается увеличенной областью поражения, но пониженной мощностью доз.

В целом, диссертационная работа О.О. Царевой представляет собой законченное исследование в области теоретической физики. Все полученные результаты актуальны, удовлетворяют требованиям новизны и могут быть в дальнейшем использованы для моделирования динамики заряженных частиц в электромагнитных полях небесных тел.

Положения, выносимые на защиту, достоверны и обоснованы. Результаты диссертационного исследования опубликованы в престижных российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных системах цитирования, а также представлены на крупных российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Замечания к содержанию диссертации:

1. Поскольку вопрос о конфигурации геомагнитного поля во время инверсии остается открытым, следовало бы также рассмотреть и другие модели переходного поля, например с вращающимся диполем, как в работе Старченко и Щербакова (1991), которую пропустил диссертант.
2. Исследуя степень радиационной опасности в процессе инверсии, имело бы смысл рассмотреть не средний уровень, а экстремальные события с большими потоками СКЛ и ГКЛ.
3. Работе недостает сравнения с другими планетами земной группы, имеющими атмосферу. Например, если магнитное поле Земли препятствует сносу ее атмосферы солнечным ветром, то почему Венера сохраняет свою атмосферу в отсутствие собственного магнитного поля?

Указанные замечания не снижают очевидных достоинств диссертации О.О. Царевой и не влияют на её содержание и положительную оценку. Рассматриваемая диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемой ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а её автор — О.О. Царева, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 «теоретическая физика».

Результаты работы О.О. Царевой могут быть использованы в НИИЯФ, ИЗМИРАН, МФТИ, МГУ, ИФЗ РАН, СПбГУ, ИНАСАП, ПКИ, ФИАН, ГАИШ, ФТИ РАН и других российских и зарубежных научных организациях, ведущих работы по космической и геофизической тематике.

Отзыв составлен зав. лабораторией физики околоземной плазмы д.ф.-м.н. Пилипенко В. А. и обсужден на онлайн-семинаре Отделения геоэлектромагнитных полей и межгеосферных взаимодействий ИФЗ РАН 27.01.2021 г.

д.ф.-м.н., проф.

Пилипенко В. А.

123995 Россия, Москва, ул. Б. Грузинская, д. 10, ИФЗ РАН, тел. (903) 618-46-66,
e-mail: pilipenko_va@mail.ru