

На правах рукописи

Царева Ольга Олеговна

**ДИНАМИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В
ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ИНВЕРСИИ.
РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА ЗЕМЛИ И ЕВРОПЫ —
СПУТНИКА ЮПИТЕРА**

Специальность 01.04.02 — Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Научный руководитель: Попов Виктор Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор МГУ им. Ломоносова,
ведущий научный сотрудник ИКИ РАН

Официальные оппоненты: Янке Виктор Гугович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ИЗМИРАН,
заведующий отделом Космических лучей

Семенов Владимир Семенович,
доктор физико-математических наук,
профессор СПбГУ,
заведующий кафедрой Физики Земли

Ведущая организация: Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 на базе Института космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Цупко О. Ю., к.ф.-м.н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Тела солнечной системы находятся в постоянном потоке заряженных частиц солнечных и галактических космических лучей. Поток заряженных частиц отклоняется от своей первоначальной траектории под воздействием магнитного поля тела (планеты или спутника). При этом часть ионизированных частиц может захватываться магнитным полем, образуя так называемые радиационные пояса, а некоторая часть частиц может проникать в верхние слои атмосферы и даже достигать поверхности, составляя естественную фоновую радиацию. Интерес представляет радиация на поверхности небесных тел, на которых существует жизнь или предполагается ее наличие, например на Земле или на спутнике Юпитера — Европе, имеющей потенциально обитаемый океан. Радиационная обстановка на поверхности планеты зависит как от конфигурации и напряженности ее магнитного поля, так и от состава и плотности ее атмосферы.

Магнитное поле Земли нестабильно и претерпевает изменения на временных масштабах от миллисекунд до миллионов лет (McPherron, 2020). Самые длительные глобальные изменения магнитного поля Земли — инверсии — представляют собой смену направления геомагнитного поля. Последний раз инверсия магнитного поля произошла около 780 тысяч лет назад на границе эпох Матуяма–Брунеса (Haneda *et al.*, 2020; Gubbins, 1994; Jacobs, 1994; Gubbins & Kelly, 1995; Soler-Arechalde *et al.*, 2015), а ее продолжительность составляла 7 тысяч лет. Согласно наблюдениям магнитное поле Земли в настоящее время ослабевает, а магнитные полюса смещаются. Скорость миграции магнитного полюса в направлении географического севера в конце XX века составляла около 15–20 км/год, сейчас она выросла до 55–60 км/год. Южный магнитный полюс движется не так быстро, как северный, но этот процесс заметен. Магнитный дипольный момент демонстрирует резкое уменьшение: примерно на 9% с 1840 года или на 30% за последние 2000 лет (Glassmeier *et al.*, 2009*a,b*; Glassmeier & Vogt, 2010; Olson & Amit, 2006). Если текущее уменьшение продолжится, геомагнитное дипольное поле исчезнет в четвертом тысячелетии.

Из-за сложности анализа палеомагнитных данных и большого временного масштаба рассматриваемых событий невозможно представить детальную картину поведения магнитного поля во время инверсий. В простейших моделях инверсии поля (Merrill & McFadden, 1999) предполагается, что магнитный диполь либо уменьшается, пока не исчезает, а затем восстанавливается в противоположном направлении, либо вращается с той же напряженностью. Более сложные модели также учитывают более высокие мультиполи. Для описания магнитного поля Земли применяются модели, основанные на механизме геомагнитного динамо (Jacobs, 1994; Glatzmaier & Roberts, 1997; Kida & Kitauchi, 1998; Olson *et al.*, 2009; Sheyko *et al.*, 2016). С их помощью ученые воссоздают структуру палеомагнитосферы во время инверсий геомагнитного поля и проводят анализ их влияния на околоземное пространство (Glassmeier & Vogt, 2010; Vogt *et al.*, 2004; Glassmeier *et al.*, 2004; Stadelmann *et al.*, 2010). Однако влияние геомагнитной инверсии на структуру всей магнитосферы, систему токов и плазму в ней до конца не изучено.

Инверсия магнитного поля вызывает закономерную тревогу у человечества, прежде не сталкивавшегося с этим относительно редким явлением. Встают вопросы о радиационной опасности космического излучения для людей, для земных био- и техносфер, о диссипации атмосферы Земли в космическое пространство, а также об исчезновении озонового слоя и других элементах возможной экологической катастрофы во время геомагнитной инверсии. Поэтому исследование изменений радиационной обстановки на Земле, радиационных поясов и атмосферы в процессе геомагнитной является актуальной задачей.

Наверное, одной из самых интересных задач для ученых остается поиск внеземной жизни. Европа, спутник Юпитера, — наиболее перспективное небесное тело в Солнечной системе, поскольку имеет водный океан под ледяной корой, в котором не исключено наличие микроскопической жизни (Kargel *et al.*, 2000; Blanc *et al.*, 2020). Однако орбита Европы лежит в радиационных поясах Юпитера, поэтому радиация может существенно ограничивать возможность обнаружения жизни на ней. Отсюда возникает актуальный вопрос о радиационной обстановке на поверхности Европы.

Цели и задачи

Цель работы состоит в том, чтобы определить какую угрозу для человечества может представлять инверсия магнитного поля Земли. Для достижения этой цели были исследованы радиационная обстановка на Земле, радиационные пояса и атмосфера во время геомагнитной инверсии.

Европа, спутник Юпитера, имеет подледниковый водный океан, что

делает возможным существование жизни на поверхности или под ней. Однако радиация также представляет угрозу для ее обитаемости и возможной колонизации. Решены следующие задачи:

- Теоретическое развитие теории Штермера на случай осесимметричной суперпозиции дипольного и квадрупольного полей для исследования динамики заряженных частиц, а также определения областей захвата, обеспечивающих устойчивое существование радиационных поясов во время геомагнитной инверсии.
- Определение ключевых механизмов ускорения атмосферных частиц и оценка атмосферных потерь во время инверсии.
- Моделирование взаимодействия заряженных частиц КЛ с магнитным полем Земли для расчета доз радиации и их распределения на поверхности Земли во время инверсии магнитного поля.
- Численное моделирование динамики протонов и электронов радиационных поясов Юпитера для оценки радиационной обстановки на поверхности Европы.

Научная новизна работы

- Теория Штермера, ранее используемая для магнитной дипольной конфигурации, была развита на случай суперпозиции двух осесимметричных магнитных полей, диполя и квадрупольного. Это позволило применить ее для исследования динамики заряженных частиц в процессе геомагнитной инверсии и получить новые результаты.
- 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 магнитный диполь Юпитера, крылья Альфвена, индуцированное и внутреннее магнитные 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

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

Результаты этой работы носят оценочный и предсказательный характер. С одной стороны они опровергают работы, в которых авторы предполагают массовую гибель всего живого на Земле (Uffen, 1963; Simpson, 1966; Crain, 1971). 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 радиационную обстановку на спутнике. Проведенное исследование может быть полезно для планируемых в ближайшем будущем миссий на Европу.

Основные положения, выносимые на защиту

- Сделано обобщение теории Штермера на случай суперпозиции аксиально-симметричных дипольно-квадрупольных магнитных полей. Аналитически исследована нелинейная динамика заряженных частиц, определены их области захвата и жесткость обрезания в рассматриваемой конфигурации. В рамках обобщенной теории исследована эволюция радиационных поясов Земли в процессе геомагнитной инверсии.
- Модели диссипации атмосферы Земли были обобщены на случай дипольно-квадрупольной магнитосферы. Получены аналитические оценки скоростей потерь атмосферных частиц. Показано, как скорости потерь ионов атмосферы меняются в зависимости от конфигурации и величины геомагнитного поля в процессе инверсии.

-
- Построена модель нелинейной динамики заряженных частиц галактических и солнечных космических лучей в геомагнитном поле во время его инверсии. В рамках этой модели исследована радиационная обстановка на Земле и в околоземном пространстве. Получены оценки эффективных доз радиации и их распределение на Земле и на орбите МКС. Показано, что средние дозы радиации на поверхности Земли в момент инверсии увеличатся примерно в три раза по сравнению с уровнем 2015 года, а на орбите МКС — в 14 раз.
 - Построены модели нелинейной динамики заряженных частиц в электрических и магнитных полях Юпитера и Европы. Получено распределение доз радиации электронов и протонов радиационных поясов Юпитера на поверхности Европы для моделей различной сложности. Уточнены и дополнены результаты, полученные с использованием приближения ведущего центра.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается строгостью и обоснованностью проведения теоретических выкладок, а также хорошим соответствием между данными космических аппаратов и результатами численного моделирования. Все основные результаты работы подтверждены публикациями в рецензируемых изданиях из перечня ВАК и индексируемых базами Scopus, Web of Science, РИНЦ.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены в период с 2016 по 2020 годы и опубликованы в шести статьях в реферируемых журналах, и в двух одной статье, принятой к публикации. Результаты работы докладывались на семинарах ИФЗ РАН, ИКИ РАН и НИИЯФ МГУ, а также на всероссийских и международных конференциях:

- Конференция молодых ученых ИКИ РАН, Москва, 2017 – 2020
- General Assembly of European Geosciences Union (EGU), Vienna, Austria, 2018 – 2019
- Ломоносовские чтения, Секция «Физика», Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2018 – 2020

-
- Международная конференция Грингауз 100: Плазма в солнечной системе, ИКИ РАН, Москва, 2018
 - Workshop on Heliospheric Plasmas, Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, France, 2018
 - 12 – 13-я ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 2017 – 2018

Личный вклад автора

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены автором при поддержке и участии научного руководителя, коллег по научной работе и соавторов публикаций. Автором была разработана модель нелинейной динамики заряженных частиц в магнитном поле планеты, позволяющая получать спектры космических лучей (КЛ) при их прохождении магнитосферы планеты, а также пространственное распределение заряженных частиц на поверхности планеты. Она была применена для исследования нелинейной динамики заряженных частиц в магнитных полях 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 получены аналитические оценки скорости потери ионов из атмосферы Земли для различных сценариев геомагнитной инверсии. Автор использовал сценарии геомагнитной инверсии, полученные Ророва (2016*b*); Glatzmaier & Roberts (1995) в рамках динамо моделей.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, **4-х** глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет **111** страниц и **23** рисунка. Список используемой литературы содержит **168** наименований на **12** страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация посвящена возможным угрозам для жизни на Земле во время геомагнитной инверсии и на спутнике Юпитера — Европе. С помощью аналитических и численных методов исследованы изменения радиационных поясов Земли, атмосферы и радиационной обстановки во процессе инверсии.

Во **Введении** определены основные изучаемые объекты и сформулирована актуальность темы диссертационного исследования.

В разделе i обсуждаются строение магнитосферы Земли, влияние солнечного ветра на динамику системы. Особое внимание уделено радиационным поясам Земли.

В разделе ii определены основные механизмы диссипации атмосфер планет, такие как диссипация Джинса, гидродинамический отток, фотохимические потери, распыление (sputtering), ионный пикап (ion pickup), обмен зарядами, а также полярный и авроральный ветры.

В разделе iii приведены предпосылки будущей геомагнитной инверсии, ее наблюдательные (палеомагнитные исследования) и теоретические (модели геодинамо) обоснования. На основе нелинейной $\alpha\Omega$ -динамо модели (Порова, 2016a) и численной модели Glatzmaier & Roberts (1997) предложен сценарий геомагнитной инверсии, для которого магнитная дипольная компонента обращается в ноль, а квадрупольная носит случайный характер.

В разделе iv представлена математическая модель магнитного поля, определяемого с помощью скалярного потенциала $\mathbf{B} = -\vec{\nabla}U$ в виде бесконечного ряда сферических гармонических функций (Stern, 1976):

$$U(r, \theta, \phi) = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m \cos(m\phi) + h_n^m \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta).$$

где (r, θ, ϕ) — геоцентрические координаты, a — радиус Земли, P_n^m присоединенные полиномы Лежандра со степенью n и порядком m , нормированные по правилу Шмидта, g_n^m и h_n^m — коэффициенты Гаусса, (известные для Земли из модели IGRF (Thebault *et al.*, 2015)).

Раздел v посвящен истории исследования причинно-следственных свя-

зей между жизнью и эволюцией геомагнитного поля.

В разделе vi определена важность исследования Европы — спутника Юпитера — на предмет ее обитаемости.

Глава 1 посвящена анализу эволюции радиационных поясов в процессе геомагнитной инверсии. Классическая теория Штермера, описывающая динамику заряженных частиц в дипольном поле (Störmer, 1955; Longair, 1981; Smart *et al.*, 2000), была обобщена на суперпозицию аксиально-симметричных магнитных диполя и квадруполя, поскольку в такой конфигурации радиационные пояса сохраняются (Glassmeier & Vogt, 2010; Lemaire & Singer, 2012).

В разделе 1.1 осесимметричное магнитное поле $\mathbf{V} = [\vec{\nabla}\alpha \times \vec{\nabla}\beta]$ представлено с помощью потенциалов Эйлера (Willis & Young, 1987; Jacobs, 1994). На Рис. 1 изображены силовые линии поля, вдоль которых найдены положение минимума напряженности поля и метастабильные круговые орбиты заряженных частиц.

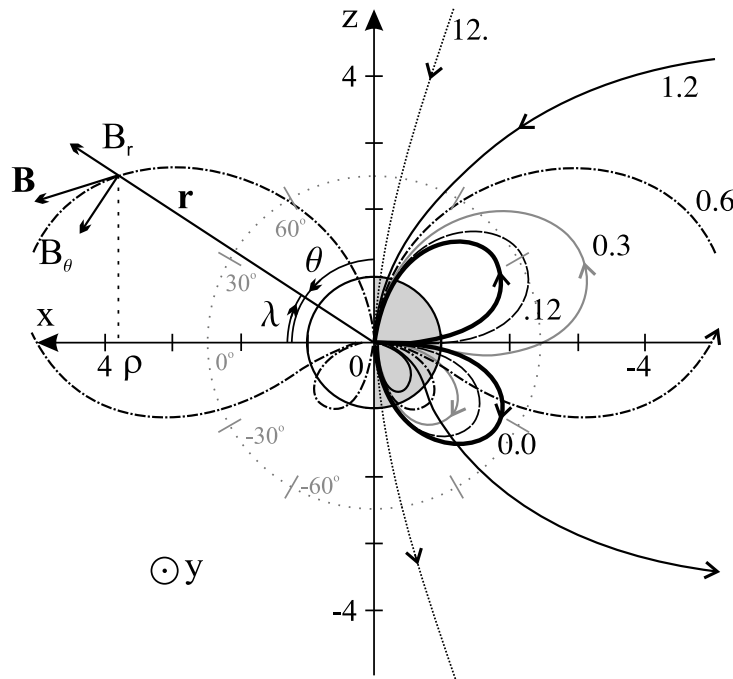


Рис. 1: Линии постоянных α (которые также являются силовыми линиями) для осесимметричного дипольно-квадрупольного магнитного поля с заданными весовыми коэффициентами $\kappa_g = g_1^0/g_2^0$ в системе координат меридиальной плоскости. Для всех изображенных силовых линий значение α равно $g_1^0 R_E^3/L$, где $L = 100 R_E$ — магнитная оболочка в дипольном поле.

В разделе 1.2 приведена классическая теория Штермера для магнитного диполя и ее развитие для магнитного квадруполя. Выявлены разрешенные и запрещенные области движения заряженных частиц, а также их области захвата, обеспечивающие устойчивое существование радиационных поясов.

В разделе 1.3 аналогичным образом исследована динамика заряженных частиц в дипольно-квадрольном поле. Получена формула для вертикальной жесткости геомагнитного обрезания pc/q , т. е. для минимальной энергии заряженной частицы, при которой она может достичь заданной точки (r, λ) (Рис. 2).

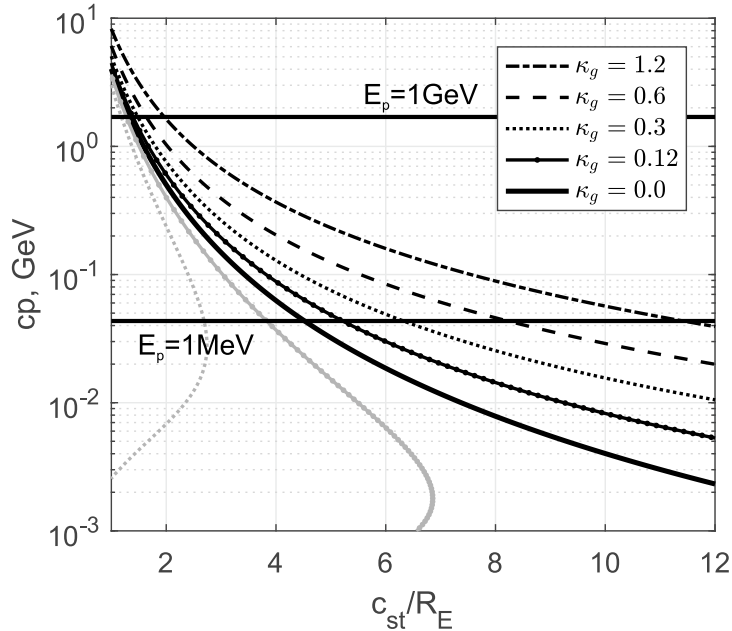


Рис. 2: Импульс частицы cp на метастабильной круговой орбите как функция радиуса Штермера $c_{st}^{(\mp)}$ для выбранных значений $\kappa_g = g_1^0/g_2^0 = 1.2, 0.6, 0.3, 0.12, 0$, ($g_2^0 = -0.025$ Гс – константа).

В разделе 1.4 приведены результаты теоретического исследования. 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, которая (наряду с магнитными полюсами) обеспечивает еще один путь проникновения заряженных частиц в ионосферу Земли, будет мигрировать с юга к экватору.

Ключевая роль в защите земной жизни от радиации принадлежит атмосфере. Поэтому в **Главе 2** оценена скорость диссипации атмосферы в процессе геомагнитной инверсии.

Согласно широко принятой концепции, магнитосфера защищает атмосферу планеты от эрозии солнечным ветром. Так атмосферы Марса и Венеры подвержены эрозии, поскольку межпланетное магнитное поле (ММП) легко достигает их ионосферы. Согласно Brain *et al.* (2013), современная магнитосфера Земли фокусирует поток энергии солнечного ветра, падающего на магнитопаузу, в небольшие авроральные зоны, увеличивая ионосферный отток тяжелых ионов (O^+), но мало влияет на отток легких

ионов (H^+). Поток энергии в этих зонах обычно достигает значений в 10 – 100 раз больше, чем в отсутствие магнитосферы.

Обсуждаются два возможных сценария атмосферной диссипации во время геомагнитной инверсии в зависимости от величины магнитного поля. Если собственное магнитное поле слабее или равно индуцированному, то ионосфера планеты напрямую подвержена воздействию солнечного ветра, подобно Марсу и Венере. Если же внутреннее магнитное поле сильнее, чем индуцированное, оно отклоняет солнечный ветер, предотвращая тем самым распыление (sputtering) и захват ионов (ion pickup) солнечным ветром, но способствует потере ионов из полярных шапок и из каспов, т. е. полярному и авроральному ветрам.

В разделе 2.1 оценены размеры магнитосферы и плазмосферы для осесимметричной квадрупольной конфигурации. При скорости солнечного ветра 500 км/с и плотности 2.5 частиц/см³ во время инверсии расстояние до подсолнечной точки квадрупольной магнитопаузы составит $\sim 3 R_E$, поэтому магнитное экранирование атмосферы Земли будет все еще эффективно.

При тех же параметрах солнечного ветра и при южном ММП с напряженностью 5 нТл ближайшее расстояние от плазмопаузы до оси квадрупольной конфигурации составит $1.3 R_E$. Поскольку во время инверсии вся квадрупольная плазмосфера находится внутри магнитосферы, то плазмосферные плюмы, (т. е. плазменные области, отрывающиеся от плазмосферы в виде шлейфов), образуются внутри магнитосферы с той же интенсивностью и регулярностью, что и в текущей конфигурации поля.

В разделе 2.2 рассмотрены два основных механизма ускорения ионов во время геомагнитной инверсии: классический полярный и авроральный ветры. Источниками их энергии являются ионизирующая солнечная радиация и энергия солнечного ветра, соответственно. Скорости потерь ионов полярного и аврорального ветров пропорциональны суммарной площади областей открытых силовых линий. Авроральный ветер также зависит от площади поперечного сечения взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы.

Оценены скорости потерь ионов O^+ и H^+ в дипольно-квадрупольном магнитном поле в процессе его инверсии. По мере того, как магнитный дипольный момент убывает во время инверсии, площадь полярных шапок и скорость выхода 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

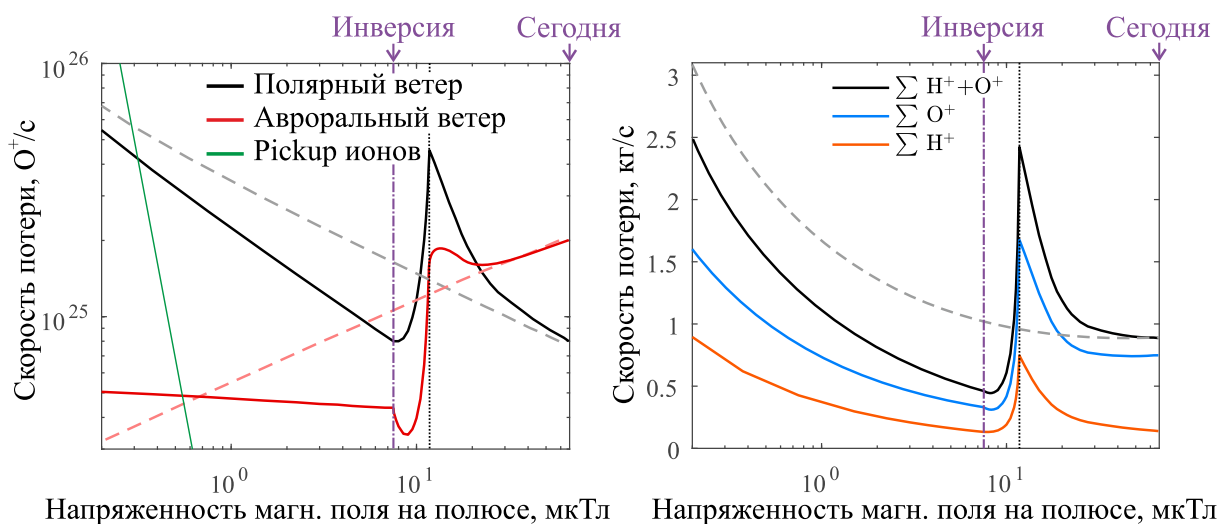


Рис. 3: Слева: скорости потерь ионов O^+ для полярных и авроральных ветров и захвата ионов; Справа: общая (полярная и авроральная) скорость потери ионов H^+ и O^+ (без ионного пикапа). Сплошные и пунктирные кривые соответствуют смешанной дипольно-квадрупольной конфигурации и чисто дипольной конфигурации, рассматриваемой Gunell *et al.* (2018). Вертикальная пунктирная линия показывает магнитное поле в момент инверсии (без дипольной составляющей).

напряженности квадрупольного поля (Рис. 3).

В разделе также рассмотрен сценарий, когда солнечный ветер находится в прямом контакте с атмосферой/ионосферой Земли, аналогично тому, как это было сделано для немагнитного Марса (Lundin & Dubinin, 1992). Оценка скорости потерь ионов основана на передаче импульса между солнечным ветром и планетарной плазмой (зеленая линия на Рис. 3). Показано, что при очень слабом магнитном поле Земли преобладают скорости потерь (pickup) ионов, захваченных солнечным ветром.

Раздел 2.3 подводит результаты исследования диссипации атмосферы в процессе магнитной инверсии. 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.

Во время инверсии магнитное поле Земли и, соответственно, защита от космического излучения ослабнут. В Главе 3 в рамках численной модели, оценена радиационная опасность для людей на Земле и на высоте ~ 400 км, соответствующей орбите МКС во время инверсии геомагнитного поля. Рассмотрено два сценария геомагнитной инверсии: при 10% дипольной

составляющей магнитного поля и при ее отсутствии, квадрупольная составляющая в обоих случаях неизменна.

В [разделе 3.1](#) рассмотрены потоки заряженных частиц ГКЛ и СКЛ, их геомагнитное обрезание и взаимодействие с атмосферой (образование каскадов и широких атмосферных ливней) в современной магнитосферной конфигурации. Установлено, что на Земле низкоэнергетичная часть спектра протонов (< 300 МэВ) поглощается атмосферой, поэтому СКЛ не оказывают существенного влияния на земной радиационный фон, в отличие от частиц ГКЛ, интенсивность которых изменятся в противофазе с солнечной активностью.

В [разделе 3.2](#) разработана численная модель нелинейной динамики заряженных частиц в магнитосфере планеты. При построение модели были использованы:

- сценарий инверсии геомагнитного поля с убывающей дипольной компонентной;
- замкнутая модель магнитосферы Земли;
- постоянные атмосферные свойства Земли.

Данная модель позволила в [разделе 3.3](#) провести сравнение потоков космических лучей (Рис. 4) и оценить величину радиационной опасности для людей на Земле и МКС в периоды доминирования дипольного или квадрупольного полей.

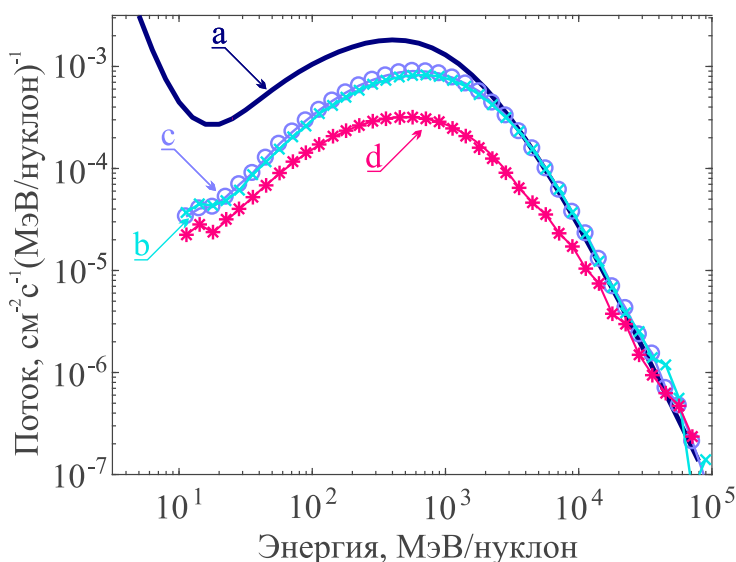
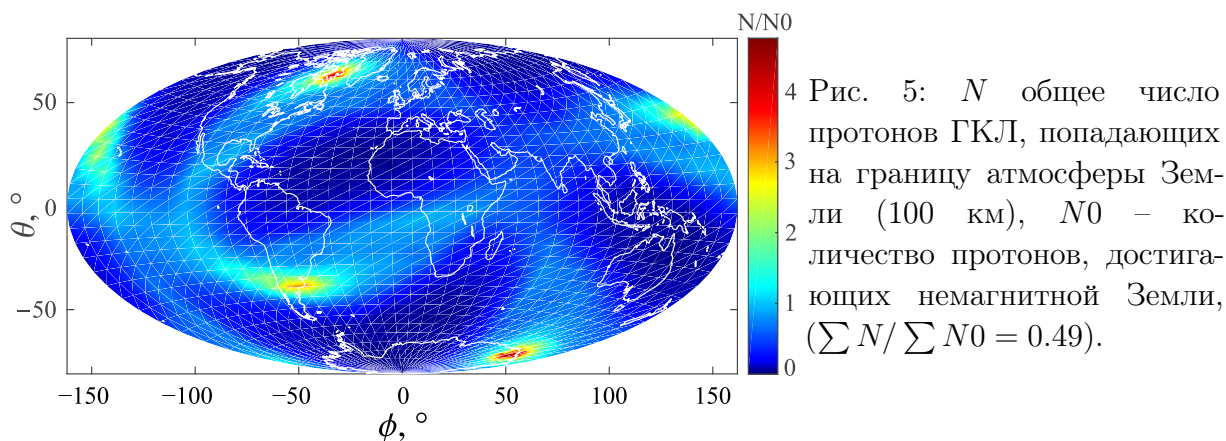


Рис. 4: Средние дифференциальные спектры протонов ГКЛ в минимуме солнечной активности на расстоянии $12.5 R_E$ от центра Земли за пределами магнитосферы (кривая a), на расстоянии 100 км над уровнем земли для геомагнитных инверсий (кривые b, c) и в 2015 г (кривая d).

На Рис. 5 показаны области, доступные для протонов ГКЛ на высоте

100 км над уровнем моря в момент инверсии (чисто квадрупольная конфигурация). Первичные космические лучи свободно достигают атмосферы планеты в облученных зонах, то есть в модели замкнутой магнитосферы их энергетические спектры в этих областях не меняются. Изменение конфигурации магнитного поля приведет к перераспределению областей повышенной радиации на поверхности Земли, которые в настоящее время расположены вокруг Северного и Южного магнитных полюсов.



В разделе 3.4 приведены основные результаты моделирования радиационной обстановки в процессе геомагнитной инверсии. Показано, что во время минимума солнечной активности (при условии постоянных атмосферных свойств) средние эффективные дозы радиации протонов ГКЛ должны увеличиться примерно в три раза по сравнению с уровнем 2015 года. Таблица 1 суммирует основные результаты моделирования радиационной обстановки на Земле в процессе инверсии магнитного поля. На орбите МКС максимальная радиация, вызванная частицами СКЛ,

Таблица 1: Мощность дозы радиации [в мЗв/день] на 100 км от поверхности Земли для трех конфигураций магнитного поля и его отсутствия в период минимума солнечной активности.

2015 поле	10% диполь + квадруполь	0% диполь + квадруполь	Без магн. поля
0.3	0.8	0.85	1.2

коррелирует с максимальной солнечной активностью. 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. Несомненно, в этом случае потребуется коррекция орбит космических аппаратов.

Глава 4 посвящена оценке радиационной обстановки на Европе — спутнике Юпитера.

В разделе 4.1 приведены спектры электронов и протонов радиационных поясов Юпитера на орбите Европы.

В разделе 4.2 описана численная модель нелинейной динамики заряженных частиц в дипольном поле Юпитера, (в отличие от используемого Paranicas *et al.* (2009); Podzolko *et al.* (2011); Nordheim *et al.* (2018) приближения ведущего центра) включающая в себя более реалистичное поле Юпитера, альфвеновские крылья, индуцированное и внутреннее магнитные поля Европы.

С ее помощью в разделе 4.3 уточнена и дополнена карта доз радиации на поверхности Европы в предположении электроно-протонного состава радиационных поясов Юпитера.

Для валидации модели проведено сравнение результатов моделирования и приближения ведущего центра. Показано, что электроны, движущиеся исключительно в осесимметричном магнитном диполе Юпитера, концентрируются на поверхности Европы в ограниченных областях (Рис. 6), которые соответствуют областям концентрации электронов в приближении ведущего центра. Так, согласно приближению ведущего центра, области высыпания электронов с энергией 5 МэВ и 30 МэВ очерчены синей и красной окружностями на задней и ведущей полусферах Европы, соответственно. Принимая во внимание ларморовское движение частиц, Podzolko *et al.* (2011) отметил, что на задней полусфере Европы, концентрация электронов на границе круга выше, чем в его центре, а на противоположной (ведущей) полусфере — наоборот, что также соответствует результатам прямого моделирования.

В разделе построены карты доз радиации электронов и протонов на поверхности Европы под слоем воды различной толщины для моделей магнитного поля возрастающей сложности.

Раздел 4.4 суммирует результаты проведенного моделирования. Показано, что области высыпания электронов на поверхность Европы в наклонном магнитном диполе Юпитера больше по размеру и концентрации частиц, чем области в осесимметричном магнитном диполе, используемом в приближении ведущего центра. Индуцированное поле снижает дозу радиации на поверхности Европы, увеличивая области их распространения. Крылья Альфвена не влияют на общую дозу радиации, но перераспределяют ее. А внутреннее магнитное поле Европы (если оно

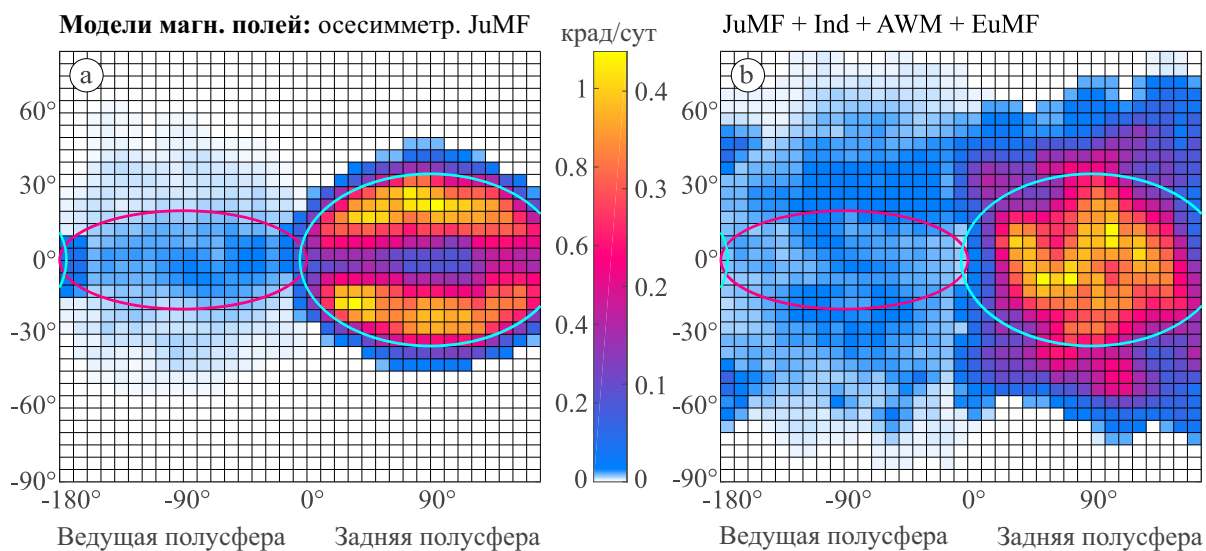


Рис. 6: Распределение радиации на поверхности Европы под слоем воды толщиной 2.5 г/см^2 для двух различных моделей магнитного поля: (а) осесимметричный магнитный диполь Юпитера, (соответствующий приближению ведущего центра); б) наклонное дипольное поле Юпитера + альфвеновские крылья + индуцированное и внутренние поля Европы.

есть) даже небольшой интенсивности уменьшает и перераспределяет радиацию. Получено, что индуцированное и внутреннее поля Европы снижают максимальную дозу на поверхности почти в 2 раза.

Как в рамках приближения ведущего центра, так и в рамках нашей модели более безопасными областями на поверхности Европы с точки зрения радиационных условий являются высокоширотные области и ведущее полушарие из-за отсутствия в них низкоэнергетических электронов. Проведенные исследования могут быть полезными для планируемых в ближайшем будущем миссий на Европу.

Наконец, все основные результаты диссертации резюмируются в **Заключении**.

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. В то же время, они предупреждают о радиационной опасности при нахождении людей в космосе в период геомагнитной инверсии.

Моделирование распределения заряженных частиц на поверхности Европы позволило уточнить и дополнить результаты, полученные с помощью приближения ведущего центра. Новая карта доз радиации на поверхности Европы отличается увеличенной областью поражения, но

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. ЦАРЕВА О.О., ПОПОВ В.Ю., МАЛОВА Х.В., ЗЕЛЕНЬКИЙ 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-Uspeski* **61** (2), 191-202. DOI: 10.3367/UFNe.2017.07.038190
2. 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
3. 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
4. ЦАРЕВА О.О., ПОПОВ В.Ю., МАЛОВА Х.В., ЗЕЛЕНЬКИЙ 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.
5. ЦАРЕВА, О. О., ЗЕЛЕНЬКИЙ, 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
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

Полный список работ включает также публикации в тезисах докладов российских и международных конференций, основными из которых можно выделить:

1. ЦАРЕВА, О. О., ПОПОВА, Е. П., ПОПОВ, В. Ю., МАЛОВА, Х. В. & ЗЕЛЕНЬКИЙ, Л. М. 2019 Оценка радиационной обстановки спутника Юпитера Европы. *Научная конференция Ломоносовские чтения, секция физики, подсекция Прикладная математика и математическое моделирование* стр. 180 – 184.
2. ЦАРЕВА, О. О., ПОПОВ, В. Ю., МАЛОВА, Х. В., ПОПОВА, Е. П., ЗЕЛЕНЬКИЙ, Л. М. & ПОДЗОЛКО, М. В. 2018 Моделирование взаимодействия галактических и солнечных космических лучей с магнитным полем Земли в процессе инверсии. *Научная конференция Ломоносовские чтения, секция физики, подсекция Прикладная математика и математическое моделирование* стр. 139 – 142.
3. ЦАРЕВА, О. О., ПОПОВ, В. Ю., МАЛОВА, Х. В. & ЗЕЛЕНЬКИЙ, Л. М. 2018 О возможных вариантах эволюции радиационных поясов Земли в процессе инверсии ее магнитного поля. *Тринадцатая ежегодная конференция Физика плазмы в солнечной системе.* стр. 162 – 162.
4. ЦАРЕВА, О. О., ПОПОВ, В. Ю., МАЛОВА, Х. В., ПОПОВА, Е. П., ЗЕЛЕНЬКИЙ, Л. М. & ПОДЗОЛКО, М. В. 2017 Радиационная опасность в момент инверсии магнитного поля Земли. *14-я Конференция молодых ученых Фундаментальные и прикладные космические исследования ИКИ РАН.* стр. 75 – 75.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я бы хотела выразить свою искреннюю благодарность моему научному руководителю Виктору Юрьевичу Попову за постоянную поддержку моей кандидатской диссертации и связанных с ней исследований. Большое спасибо моим коллегам и соавторам Хельми Витальевне Маловой и Льву Матвеевичу Зеленому за постановку целей и помощь в подготовке самой диссертации.

Искренне благодарю Елену Евгеньевну Григоренко за оказанную помощь в редактировании текста диссертации, а также за новые интересные и перспективные задачи, возникшие в результате обсуждения диссертации. Большую благодарность выражаю своим соавторам Эдуарду Михайловичу Дубинину и Елене Петровне Поповой за плодотворное сотрудничество

и содействие в подготовке публикаций, а также Виктору Владимировичу Бенгину и Michael Schulz за ценные советы и конструктивную критику. Я также очень признательна своим зарубежным коллегам Philippe Louarn, Gabriel Fruit, Christian Jacquey и Anatoly Tour за поддержку и многолетнее сотрудничество.

ЛИТЕРАТУРА

- BLANC, M., PRIETO-BALLESTEROS, O., ANDRÉ, N., GOMEZ-ELVIRA, J., JONES, G., STERKEN, V. & OTHERS 2020 Joint Europa Mission (JEM): a multi-scale study of Europa to characterize its habitability and search for extant life. *Planetary and Space Science* **193**, 104960.
- BRAIN, D. A., LEBLANC, F., LUHMANN, J. G., MOORE, T. E. & TIAN, F. 2013 *Planetary magnetic fields and climate evolution. In Comparative Climatology of Terrestrial Planets*. Univ. of Arizona, Tucson.
- CRAIN, I. K. 1971 Possible Direct Causal Relation Between Geomagnetic Reversals and Biological Extinctions. *Geological Society of America Bulletin* **82** (9), 2603.
- GLASSMEIER, K.-H., RICHTER, O., VOGT, J., MÖBUS, P. & SCHWALB, A. 2009a The Sun, geomagnetic polarity transitions, and possible biospheric effects: review and illustrating model. *International Journal of Astrobiology* **8** (3), 147–159.
- GLASSMEIER, K.-H., SOFFEL, H. & NEGENDANK, J. F. W. 2009b *Geomagnetic Field Variations*. Berlin: Springer-Verlag.
- GLASSMEIER, K. H. & VOGT, J. 2010 Magnetic polarity transitions and biospheric effects. *Space Sci. Rev.* **155**, 387–410.
- GLASSMEIER, K.-H., VOGT, J., STADELMANN, A. & BUCHERT, S. 2004 Concerning long-term geomagnetic variations and space climatology. *Annales Geophysicae* **22** (10), 3669–3677.
- GLATZMAIER, G. A. & ROBERTS, P. H. 1995 A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal. *Nature* **377** (6546), 203–209.
- GLATZMAIER, G. A. & ROBERTS, P. H. 1997 Simulating the geodynamo. *Contemporary Physics* **38** (4), 269–288.
- GUBBINS, D. 1994 Geomagnetic polarity reversals: A connection with secular variation and core-mantle interaction? *Reviews of Geophysics* **32** (1), 61–83, arXiv: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/93RG02602>.
- GUBBINS, D. & KELLY, P. 1995 On the analysis of paleomagnetic secular variation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **100** (B8), 14955–14964, arXiv: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/95JB00609>.

- GUNELL, H., MAGGIOLO, R., NILSSON, H., WIESER, G. S., SLAPAK, R., LINDKVIST, J., HAMRIN, M. & DE KEYSER, J. 2018 Why an intrinsic magnetic field does not protect a planet against atmospheric escape. *Astronomy and Astrophysics* **614** (L3).
- HANEDA, Y., OKADA, M., SUGANUMA, Y. & KITAMURA, T. 2020 A full sequence of the matuyama-Ibrunhes geomagnetic reversal in the chiba composite section, central japan. *Prog Earth Planet Sci* **7** (44).
- JACOBS, J. A. 1994 *Reversals of the Earth's magnetic field*. UK: 2nd edition, Cambridge Univ. Press.
- KARGEL, J. S., KAYE, J. Z., HEAD, J. W., MARION, G. M., SASSEN, R., CROWLEY, J. K., BALLESTEROS, O. P., GRANT, S. A. & HOGENBOOM, D. L. 2000 Europa's crust and ocean: Origin, composition, and the prospects for life. *Icarus* **148** (1), 226 – 265.
- KIDA, S. & KITAUCHI, H. 1998 Chaotic reversals of dipole moment of thermally driven magnetic field in a rotating spherical shell. *Journal of the Physical Society of Japan* **67** (8), 2950–2951.
- LEMAIRE, J. F. & SINGER, S. F. 2012 *What Happens When the Geomagnetic Field Reverses?*. (Washington, DC: American Geophysical Union).
- LONGAIR, M. S. 1981 *High energy astrophysics*. New York: Cambridge University Press.
- LUNDIN, R. & DUBININ, E. M. 1992 Phobos-2 results on the ionospheric plasma escape from Mars. *Advances in Space Research* **12**, 255–263.
- MCPHERRON, R. L. 2020 *Geomagnetic field*. Encyclopædia Britannica.
- MERRILL, R. T. & MCFADDEN, P. L. 1999 Geomagnetic polarity transitions. *Reviews of Geophysics* **37** (2), 201–226.
- NORDHEIM, T. A., HAND, K. & PARANICAS, C. 2018 Preservation of potential biosignatures in the shallow subsurface of europa. *Nature Astronomy* **2**.
- OLSON, P. & AMIT, H. 2006 Changes in Earth's dipole. *Naturwissenschaften* **93** (11), 519–542.
- OLSON, P., DRISCOLL, P. & AMIT, H. 2009 Dipole collapse and reversal precursors in a numerical dynamo. *Phys. Earth Planet. Inter.* **173**, 121–140.
- PARANICAS, C., COOPER, J. F., GARRETT, H. B., JOHNSON, R. E. & STURNER, S. J. 2009 *Europa's Radiation Environment and Its Effects on the Surface*, p. 529.
- PODZOLKO, M. V., GETSELEV, I. V., GUBAR, Y. I., VESELOVSKY, I. S. & SUKHANOV, A. A. 2011 Charged particles on the Earth-Jupiter-Europa spacecraft trajectory. *Advances in Space Research* **48**, 651–660.

- POPOVA, H. P. 2016a Current results on the asymptotics of dynamo models. *Physics Uspekhi* **59** (6), 513–530.
- POPOVA, H. P. 2016b Dynamical systems for modeling the evolution of the magnetic field of stars and earth. *J. of Physics: Conference Series* **681**, 012021.
- SHEYKO, A., FINLAY, C. & JACKSON, A. 2016 Magnetic reversals from planetary dynamo waves. *Nature* **539** (7630), 551–554.
- SIMPSON, J. F. 1966 Evolutionary Pulsations and Geomagnetic POLARITY1. *Geological Society of America Bulletin* **77** (2), 197.
- SMART, D. F., SHEA, M. A. & FLÜCKIGER, E. O. 2000 Magnetospheric models and trajectory computations. *Space Sci. Rev.* **93**, 305–333.
- SOLER-ARECHALDE, A., GOGUITCHAICHVILI, A., CARRANCHO, Á., SEDOV, S., CABALLERO-MIRANDA, C., ORTEGA, B., SOLÍS, B., MORALES CONTRERAS, J., URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. & BAUTISTA, F. 2015 A detailed paleomagnetic and rock-magnetic investigation of the Matuyama-Bruhnes geomagnetic reversal recorded in tephra-paleosol sequence of Tlaxcala(Central Mexico). *Frontiers in Earth Science* **3**, 11.
- STADELMANN, A., VOGT, J., GLASSMEIER, K.-H., KALLENRODE, M.-B. & VOIGT, G.-H. 2010 Cosmic ray and solar energetic particle flux in paleomagnetospheres. *Earth Planets Space* **62** (5), 333–345.
- STERN, D. P. 1976 Representation of magnetic fields in space. *Reviews of Geophysics* **14** (2), 199–214.
- STÖRMER, C. 1955 *The polar Aurora*. Oxford: Clarendon Press.
- THEBAULT, E., FINLAY, C. C. & TOH, H. 2015 International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space* **67**, 158.
- UFFEN, R. J. 1963 Influence of the Earth's Core on the Origin and Evolution of Life. *Nature* **198** (4876), 143–144.
- VOGT, J., ZIEGER, B., STADELMANN, A., GLASSMEIER, K.-H., GOMBOSI, T. I., HANSEN, K. C. & RIDLEY, A. J. 2004 Mhd simulations of quadrupolar paleomagnetospheres. *Journal of Geophysical Research* **109**, A12221.
- WILLIS, D. M. & YOUNG 1987 Equation for the field lines of an axisymmetric magnetic multipole. *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* **89**, 1011–1022.