

УДК 523.45

КАЛЛИСТО В МАГНИТОСФЕРЕ ЮПИТЕРА

© 2020 г. Е. С. Беленькая*

МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*e-mail: elena.belenkaya.msu@gmail.com

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

После доработки 29.10.2019 г.

Принята к публикации 31.10.2019 г.

Изучение галилеевых спутников позволяет уточнить структуру магнитосферного магнитного поля по наблюдениям их проекций вдоль магнитных силовых линий на атмосферу/ионосферу Юпитера, в которых возникают пятна полярных сияний. УФ сияния в проекциях на ионосферу Ио, Европы и Ганимеда существуют почти постоянно, в то время как наблюдение следа Каллисто затруднено. Одна из причин заключается в том, что проекция Каллисто лежит вблизи яркого главного овала Юпитера или внутри него. Другая причина состоит в том, что Каллисто не находится постоянно в доальвеновском потоке магнитосферной плазмы. Взаимодействие Каллисто с магнитосферной плазмой планеты – актуальная проблема, широко обсуждаемая в литературе, которая проливает свет на ключевые процессы, происходящие в системе Юпитера.

Ключевые слова: Каллисто, Юпитер, магнитосферная плазма, альвеновские крылья

DOI: 10.31857/S0320930X20020012

ВВЕДЕНИЕ

Пространство вокруг планеты, в котором ее магнитное поле и поле токовых систем, возникающих при обтекании планеты солнечным или звездным ветром, контролирует поведение плазмы, называется магнитосферой. Если у планеты нет собственного магнитного поля или оно очень слабое (как у Венеры и Марса), возникает индуцированная магнитосфера, в которой магнитное поле и скорость обтекающего потока возмущены. Магнитосферные токовые системы могут существовать постоянно (Alexeev и др., 1993, 2010; Alexeev, Belenkaya, 2005; Belenkaya, 2004; Belenkaya и др., 2006; 2007a; Baumjohann и др., 2010; Cowley, 2013; Fairfield, 1991; Olsen, Stolle, 2017; Siscoe и др., 2013) или временно, появляясь при резком изменении условий в магнитосфере (Alexeev и др., 2001; Clauer и др., 2001; Беленькая, 2006; Belenkaya и др., 2004; 2007b; Керко и др., 2015; Korth и др., 2017; Pulkkinen и др., 2006).

Многие планеты Солнечной системы обладают спутниками (спутники обнаружены даже у некоторых астероидов). Изучение взаимодействия спутников с магнитосферной плазмой или с солнечным ветром позволяет лучше понять процессы, происходящие в магнитосферах. Планеты-гиганты обладают большим числом спутников. У Сатурна мощная система колец, 53 спутника и еще несколько пока неподтвержденных. Особый интерес представляют галилеевы спутники Юпи-

тера – четыре наиболее крупных спутника из 79: Ио, Европа, Ганимед и Каллисто.

ГАЛИЛЕЕВЫ СПУТНИКИ

Юпитер – крупнейший газовый гигант в Солнечной системе, не имеющий (как и Сатурн) твердой поверхности. Он состоит, в основном, из водорода и гелия. Скорость вращения 9 ч 55 мин. В центре планеты ядро из металлического водорода. У Юпитера самое сильное планетарное магнитное поле в Солнечной системе с дипольным моментом, направленным на север под углом 9.6° к оси вращения и равным $\sim 4.3 \times 10^{-4}$ Тл R_J^3 ($R_J = 71492$ км – экваториальный радиус поверхности на Юпитере с давлением 1 бар). Магнитосфера Юпитера – самая большая в Солнечной системе, ее хвост заканчивается за орбитой Сатурна.

Данные, полученные на КА Galileo, позволили предположить, что под поверхностью Европы, расположенной на расстоянии $9.4 R_J$ от Юпитера, находится океан, содержащий большое количество жидкости. Было обнаружено, что Ганимед, вращающийся на расстоянии $15 R_J$ от Юпитера, самый крупный спутник в Солнечной системе (радиус 2634 км). Он оказался единственным, обладающим магнитным полем (Clarke и др., 2002; Kivelson, 2004). Ио – самый вулканически активный спутник в Солнечной системе. Его активность вызвана приливными силами. В окрестности Ио доминируют ионы O^+ и S^+ . Благодаря сво-

ей вулканической активности ближайший из галилеевых спутников Ио, расположенный на $5.9 R_J$, поставляет в магнитосферу нейтральное вещество, из которого образуется в среднем 1 T s^{-1} плазмы. Каллисто — самый удаленный из галилеевых спутников. Он расположен вне главных радиационных поясов Юпитера вблизи вращательного экватора планеты.

В результате быстрого вращения Юпитера и Сатурна ($\sim 10 \text{ ч}$) и благодаря источникам дополнительной внутримангнитосферной плазмы (Ио у Юпитера и Энцелада у Сатурна) под действием центробежной силы формируются магнитодиски в приэкваториальных магнитосферах этих планет. Магнитодиски создают мощное магнитное поле, увеличивающее магнитосферное поле и размер магнитосферы. В магнитосферах этих газовых гигантов наблюдается пересоединение с межпланетным магнитным полем (ММП).

Особый интерес представляет вопрос об обтекании крупных ближайших к Юпитеру галилеевых спутников магнитосферной плазмой, т.к. при этом реализуются условия, не наблюдаемые в солнечном ветре, но актуальные для многих близких к своим центральным звездам экзопланет. Особое место занимает Каллисто благодаря своему расположению и меняющимся условиям в окружающем его пространстве.

Взаимодействие спутников с магнитосферной плазмой Юпитера зависит как от их свойств, так и от свойств обтекающего потока плазмы. К свойствам спутников относится наличие или отсутствие магнитного поля, атмосферы/ионосферы или проводящего слоя на поверхности или внутри (Kivelson, 2004). Обычно свойства потока характеризуются звуковым (M_s) и альвеновским (M_A) числами Маха. Число Маха — это отношение массовой скорости потока относительно обтекаемого объекта к групповой скорости (звуковой или альвеновской). Если $M_s > 1$, почти перед всеми обтекаемыми препятствиями возникает головная ударная волна, исключение составляют объекты без атмосферы и магнитных полей. При $M_s < 1$ головная ударная волна перед препятствием не обрывается.

В отличие от сверхзвукового и сверхальвеновского солнечного ветра, обтекающего планеты, магнитосферная плазма Юпитера, в которую погружены галилеевы спутники, дозвуковая и доальвеновская или околосзвуковая и околосальвеновская, поэтому перед спутниками не возникает ударная волна, поток замедляется постепенно. Каллисто может оказаться в потоке с числами Маха > 1 , когда она пересекает магнитный экватор (Kivelson, 2004).

При взаимодействии потока доальвеновской юпитерианской плазмы с галилеевыми спутниками появляются альвеновские крылья (Drell и др., 1965) — волновые структуры, соединяющие спутники с Юпитером и являющиеся областями воз-

мущенного потока. Альвеновские крылья — это стоячие альвеновские волны в системе отсчета, связанной с обтекаемым объектом. При торможении замагниченной плазмы спутником меняются не только скорость, но и кривизна силовых линий, возникает перпендикулярный магнитному полю ток, замыкающийся продольными токами вдоль высокопроводящих магнитных силовых линий. Границы возмущенной области называются характеристиками (Neubauer, 1980). Продольные токи текут вдоль них: к спутнику в ближней к Юпитеру части, и от него — в дальней. Угол наклона возмущенных силовых линий $\alpha = \arctg(u/V_A) = \arctg(M_A)$, где u — скорость потока, а V_A — альвеновская скорость окружающей плазмы ($V_A = B/(\mu_0 p)^{1/2}$, где B — магнитное поле, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, p — массовая плотность плазмы). На спутнике продольные токи замыкаются через его проводящую поверхность, на Юпитере через ионосферу, где возникает светящееся пятно, созданное высыпавшимися ускоренными электронами в вытекающем сильном продольном токе. Такие пятна сияний от галилеевых спутников обычно наблюдаются экваториальнее главного полярного овала на ультрафиолетовых УФ-снимках Юпитера, полученных космическим телескопом (КТ) Hubble (Clarke и др., 2002). Однако Bonfond и др. (2012) представили необычные наблюдения, когда УФ-пятно от Ганимеда находилось внутри главного овала Юпитера (радиус овала $15^\circ\text{--}16^\circ$, ширина 1.5°).

Торможение магнитосферной плазмы препятствием, созданным спутником, приводит к генерации продольных токов $j_{\parallel} = -n_e e V_{e\parallel}$, компенсирующих скачок перпендикулярных токов на проводящей поверхности препятствия (e — заряд электрона, $V_{e\parallel}$ — продольная скорость, n_e — плотность). Из-за недостатка носителей тока возникает продольная разность потенциалов вблизи планеты (ускоряющий промежуток), как в земных полярных сияниях (Kivelson, 2004). Продольный ток переносится более быстрыми электронами. Свечения от галилеевых спутников Юпитера сопровождаются дециметровым и гектаметровым (100–1000 м) радиоизлучением.

В окрестности галилеевых спутников происходит процесс перезарядки, в результате которого появляются ионы с разными гирорадиусами. Отношение гирорадиусов pickup ионов к размеру галилеевых спутников приведено в (Kivelson, 2004). Для Ио оно равно 0.0014–0.0016, для Европы 0.010–0.012, для Ганимеда 0.01–0.08, для Каллисто 0.16–1.73. Как следует из этих данных, для Каллисто размер гирорадиусов заряженных частиц сравним с размером спутника или превышает его. В этом случае МГД подход неприменим.

Все галилеевы спутники, предположительно, имеют внутри проводящие области (соленые океаны, металлические ядра, магму), которые генерируют индуцированные квазидипольные маг-

нитные поля, влияющие на обтекающую плазму магнитосферы (Khurana и др., 1998; Neubauer и др., 1998; Sauger и др., 2018). Кроме того, они возбуждают альвеновские крылья, имеющие свои особенности в зависимости от характера препятствия.

Впервые альвеновские крылья от Ио наблюдал КА Voyager-1, зарегистрировавший возмущения в окрестности спутника (Ness и др., 1979; Neubauer, 1980; Acuna и др., 1981), а позже КА Galileo (Gurnett и др., 2001; Kivelson и др., 2001). Galileo измерил магнитное поле Ганимеда (~700 нТл на экваторе), диполь которого ориентирован на юг, как у Земли. Вокруг Ганимеда образуется миниатюрная магнитосфера внутри магнитосферы Юпитера. Поле Юпитера на орбите Ганимеда направлено на юг, что обеспечивает пересоединение в экваториальной магнитосфере Ганимеда. При этом полярные сияния возникают как на Ганимеде на границе между открытыми и замкнутыми магнитными силовыми линиями, так и в ионосфере Юпитера при пересечении с альвеновскими крыльями Ганимеда. Ганимед влияет на радиоизлучение на частотах 3.2–5.6 МГц (Menietti и др., 1998).

Постоянного магнитного поля у Европы и Каллисто нет, есть индуцированное, зависящее от изменяющегося во времени (в частности, из-за угла наклона диполя Юпитера к его оси вращения $\psi \sim 9.6^\circ$) поля юпитерианской магнитосферы (Kivelson и др., 1999), а также поле, возникающие из-за торможения и отклонения обтекающего потока при взаимодействии с ионосферой спутника. Вокруг этих спутников образуются индуцированные магнитосферы, исследованные КА Galileo (Neubauer, 1999). Kivelson (2004) отмечала, что альвеновские крылья Каллисто имеют сложную структуру, вероятно, связанную с тем, что различные облака pickup ионов создают свои альвеновские крылья. Свидетельством того, что альвеновские крылья Каллисто замыкаются в юпитерианской ионосфере, является зависимость части низкочастотного дециметрового радиоизлучения от орбитального периода Каллисто (Menietti и др., 2001).

КАЛЛИСТО В МАГНИТОСФЕРЕ ЮПИТЕРА

Каллисто — второй крупнейший спутник Юпитера и третий по размеру в Солнечной системе. Радиус Каллисто $R_C = 2410$ км (Lindkvist и др., 2015), поверхность каменистая, внутри спутника, предположительно содержится много льда (Kivelson и др., 2004). Расстояние Каллисто от центра Юпитера $26.93 R_J$. Орбитальный и вращательный периоды равны ~16.7 дням. Орбитальная скорость Каллисто ~8 км с⁻¹, скорость обтекающего потока магнитосферной плазмы ~175 км с⁻¹ согласно Neubauer (1998) и 130–280 км с⁻¹ по оценкам Kivelson и др. (2004). Neubauer (1998) оценил юпитерианское магнитосферное магнитное поле вблизи Каллисто как ~35 нТл, а Kivelson и др. (2004) как 4–42 нТл (поле растёт с увеличением

расстояния от токового слоя магнитодиска). Хотя это поле, главным образом, направлено на юг, оно периодически меняется из-за угла наклона диполя Юпитера к оси вращения (Cowley и др., 2017) и зависимости от местного времени (LT) тока диска (Khurana, 2001). Переменное магнитосферное поле индуцирует электрические токи в электропроводных слоях спутника, например, в подповерхностном соленом океане. Эти токи создают квазидипольное магнитное поле (Khurana и др., 1998; Neubauer, 1998; Kivelson и др., 1999; Zimmer и др., 2000). Собственное магнитное поле у Каллисто не обнаружено (Khurana и др., 1997; Zimmer и др., 2000).

Первые исследования Каллисто наземными телескопами проводились в шестидесятых годах прошлого века. Первые снимки Каллисто *in situ* получил КА Voyager-1 в 1979 г. Намного больше информации собрал КА Galileo, исследовавший Каллисто с 1996 по 2001 гг. Измеренные им возмущения магнитного поля вблизи Каллисто составляли ~7 нТл. Причиной этих возмущений мог быть и индуцированный проводящим слоем внутри спутника диполь и дополнительно взаимодействие Каллисто с магнитосферной плазмой. Ионная плотность магнитосферной плазмы вблизи Каллисто в долях юпитерианского хвоста оценивается как 0.01–0.5 см⁻³ (Saug и др., 2018; Kivelson и др., 2004). Neubauer (1998) отмечал, что в общем случае характерные значения плотности около Каллисто $n_0 = 1.1$ см⁻³ в токовом слое Юпитера, а вне токового слоя $n_0 = 0.55$ см⁻³.

После пролетов Galileo вокруг Каллисто для объяснения наблюдаемых возмущений магнитного поля вблизи спутника было предположено наличие соленого океана под поверхностью (Khurana и др., 1998; Kivelson и др., 1999). Lindkvist и др. (2015), используя это предположение, моделировали три пролета Galileo вокруг Каллисто: С3, С9 и С10, рассматривая ионы как частицы, а электроны как нейтрализующую жидкость (гибридный подход). Результаты моделирования оказались приемлемыми для двух пролетов С3 и С9, когда возмущение составляло ~7 и 10 нТл, но не объясняли возмущения при С10 (~20 нТл). По мнению Menietti и др. (1998), обнаруженная Galileo зависимость дециметрового радиоизлучения в диапазоне от 2 до 5.6 МГц от положения Каллисто на орбите свидетельствует о существовании альвеновских крыльев, связанных с Каллисто и возникающих при взаимодействии магнитосферы Юпитера с ионосферой Каллисто по аналогии с другими галилеевыми спутниками. Strobel и др. (2002) полагают, что вклады в магнитные возмущения от океана и от альвеновских крыльев сравнимы и составляют ~12 нТл. Будущая миссия JUICE, которая должна быть запущена в 2022 г., продолжит изучение Каллисто.

Neubauer (1998) считал, что когда Каллисто находится в плазменном слое, альвеновское число

Маха $M_A \sim 1$, а звуковое число Маха $M_s \sim 2.4$. По оценкам Lindkvist и др. (2015) в плазменном слое $M_A \sim 0.93$, в долях хвоста $M_A \sim 0.66$, а звуковое число Маха $M_s \sim 3$. Оба числа Маха могут варьироваться относительно этих значений. По данным Liuzzo и др. (2015) альвеновское число Маха равно 2.77 в токовом слое и 0.277 в долях хвоста, а магнитозвуковое число Маха всюду меньше 1. Когда Каллисто находится в до-альвеновском потоке, ее проводящей ионосферой должны генерироваться альвеновские крылья, как у трех других галилеевых спутников и у Энцепада.

Детальное описание двумерных структур, называемых альвеновскими крыльями, дано, например, в работах Drell и др. (1965), Neubauer (1980; 1998; 1999), Ляцкий и Мальцев (1983), Wright, Southwood (1987), Кропоткин (1989), Алексеев, Беленькая (1989), Alexeev, Belenkaia (1991), Belenkaia (2001). Проводящее препятствие (с магнитным полем или без него) в потоке замагниченной плазмы создает структуры, ограниченные токами вдоль характеристик. Если это препятствие – спутник Юпитера, эти токи замыкаются на юпитерианской ионосфере и на самом спутнике (на его атмосфере/ионосфере или/и в подповерхностном соленом океане). В ионосфере Юпитера в корнях магнитных трубок, связанных со спутниками, возникают пятна полярных сияний. Здесь мы рассмотрим, какие следствия вытекают из взаимодействия Каллисто с набегающим потоком магнитосферной плазмы Юпитера.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОТОКА МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ЮПИТЕРА С КАЛЛИСТО

Zimmer и др. (2000) для объяснения измеренных КА Galileo во время пролетов С3 и С9 магнитных возмущений на основе расчета электромагнитной индукции оценили глубину предполагаемого подповерхностного океана Каллисто и получили значение ~ 170 км. Russell (2005) сомневался в существовании океана у Каллисто, он полагал, что атмосфера/ионосфера Каллисто взаимодействует с юпитерианской магнитосферной плазмой подобно тому, как это происходит у Венеры.

Каллисто обладает тонкой атмосферой/ионосферой, непосредственно взаимодействующей с обтекающей ее коротирующей плазмой магнитосферы (Liuzzo и др., 2015; Saug и др., 2018). Атмосфера Каллисто состоит, главным образом, из O_2 , CO_2 и H_2O . Hartkorn и др. (2017) построили трехмерную модель атмосферы/ионосферы Каллисто, плотность в которой оказалась порядка ионосферной плотности вокруг других галилеевых спутников (см. также Gurnett и др. (2000)). Liuzzo и др. (2015) отмечали, что ионосфера Каллисто могла возникнуть из ее атмосферы благодаря фотоионизации, соударениям с электронами и в процессе перезарядки с магнитосферной плаз-

мой, а взаимодействие Каллисто с магнитосферой отличается от других галилеевых спутников тем, что радиус ионов в ее окрестности сравним с размером спутника. Авторы утверждали, что когда Каллисто находится в юпитерианском плазменном слое, магнитные возмущения более чем в 2 раза превышают фоновое поле. Дело в том, что когда Каллисто находится в магнитосферном токовом слое, взаимодействие ее ионосферы с магнитосферой Юпитера дает намного более сильный эффект, чем индукционный от подповерхностного океана (Liuzzo и др., 2015). С удалением от токового слоя роль этого возмущения уменьшается.

Это взаимодействие зависит от числа Маха, определяющего структуру возмущенной области вокруг препятствия. Если число Маха в обтекающем потоке < 1 , возникают альвеновские крылья, генерируемые проводящими ионосферами спутников, и соответствующие пятна сияний могут наблюдаться в их пересечении с ионосферой Юпитера. Интенсивность УФ H_2 сияний от Ио достигают иногда сотен кР, а от Ганимеда несколько десятков кР (Bhattacharyya и др., 2018). Сияния от Европы, обычно слабее, чем от Ганимеда, но иногда оказываются сравнимыми с ними. В то время как УФ-сияния от трех галилеевых спутников (Ио, Европы и Ганимеда) видны, практически, постоянно (Clarke, 1996), подобное свечение от Каллисто удалось выделить впервые только в 2018 г. при обработке снимков, полученных на КТ Hubble в 2007 г. (Bhattacharyya, 2018). Bonfond и др. (2017) показали, что взаимодействие Ио, Европы и Ганимеда с коротирующей магнитосферной плазмой, приводящее к возбуждению сияний в корнях их магнитных трубок, может быть описано в рамках единого универсального процесса. Для Каллисто возникают свои особенности.

Bhattacharyya и др. (2018) и Saug и др. (2018) отмечали, что в соответствии с предыдущими наблюдениями возле Каллисто магнитное число M_A близко к 1, а иногда и > 1 ($M_A = 0.02 - 1.85$). При $M_A > 1$ возникает другой тип возмущенной области вокруг спутника – индуцированная магнитосфера немагнитного объекта в потоке замагниченной плазмы. При таких условиях нельзя ожидать появления сияний в корнях магнитной трубки Каллисто. В сверхальвеновском и сверхзвуковом потоке возникают ударная волна перед спутником, хвост за ним и вытянутая вдоль потока магнитоплазма (как в магнитосфере Венеры). Такая ситуация, когда $M_A > 1$, может возникнуть, если Каллисто находится в центре плазменного/токового слоя (Kivelson и др., 2004), однако даже там значение M_A может измениться, например, в зависимости от скорости поступления плазмы от Ио.

В периоды, когда $M_A < 1$ вблизи Каллисто, она может генерировать альвеновские крылья в потоке замагниченной плазмы, однако, их трудно на-

блюдать по следующим причинам. Во-первых, $M_A < 1$ не всегда. Во-вторых, как отмечали Bhattacharyya и др. (2018), площадь ионосферного пятна Каллисто намного меньше, чем, например, у Ганимеда, поскольку у Каллисто нет магнитного поля, которое увеличивает размер магнитосферы спутника, а следовательно, и поперечного сечения альвеновского крыла. В третьих, ионосферный след от Каллисто расположен очень близко от яркого главного овала Юпитера, и его там трудно различить (Bhattacharyya и др., 2018).

Теоретически исследовали альвеновские крылья Каллисто, в частности, Khurana и др. (1997, 1998), Kivelson и др. (1999), Neubauer (1998, 1999). Расчеты Kivelson и др. (1999) показали, что плотность ионосферы Каллисто слишком мала, чтобы объяснить наблюдаемые магнитные возмущения в окрестности спутника. Поэтому авторы предположили, что необходимая для создания таких возмущений проводимость может быть обеспечена подповерхностным океаном. Позже Hartkorn и др. (2017) пришли к выводу, что плотность атмосферы/ионосферы Каллисто такая же, как у других галилеевых спутников, следовательно, альвеновские крылья с сильными продольными токами вдоль характеристик могут хотя бы временно возникать, создавая сияния в корнях магнитных трубок Каллисто. Это альтернативный процесс, дополняющий влияние предполагаемого подповерхностного океана.

Bhattacharyya и др. (2018) использовали специальный метод наложения для обработки УФ снимков КТ Hubble, чтобы извлечь из них довольно слабые пятна сияний от Каллисто. Подбирались специальные дни, наиболее подходящие для выделения этих пятен из свечения главных овалов. Для проектирования на Юпитер использовалась модель магнитного поля VIP4 (Connerney и др., 1998). Bhattacharyya и др. (2018) отметили ограничения, связанные с этой моделью. 24.05.2007 и 26.05.2007 пятна от корней трубок Каллисто были обнаружены в южном полушарии Юпитера. Авторы отмечали, что когда Каллисто находилась в токовом слое (24 мая), ее свечение было ярче, чем когда она была вне его (26 мая), вследствие того, что в последнем случае взаимодействие с потоком магнитосферной плазмы было слабее (в непосредственной близости от спутника была меньше плотность плазмы).

АЛЬВЕНОВСКИЕ КРЫЛЬЯ КАЛЛИСТО

Каллисто — единственный из галилеевых спутников, вблизи которого ионный гирорадиус зависит от положения относительно плазменного слоя Юпитера и от стохастических эффектов в магнитосфере (Saug и др., 2018). Ионный гирорадиус вблизи Каллисто по оценкам Neubauer (1998) порядка 775 км, а Kivelson и др. (2004) — 530 км для тепловых ионов, но для pickup ионов он может быть больше размера спутника (Connerney

и др., 1998; Bhattacharyya и др., 2018). Hartkorn и др. (2017) показали, что O_2 доминирует в атмосфере/ионосфере Каллисто. По мнению Kivelson и др. (2004), вблизи Каллисто pickup ионы кислорода имеют гирорадиусы ~ 400 км, однако, Liuzzo и др. (2015) для O_2^+ дают значение $6.61 R_C$ в токовом слое и $0.661 R_C$ — вне его, что тоже сравнимо с размером препятствия. Таким образом, у Каллисто не выполняются необходимые условия применимости МГД: ионный ларморовский радиус меньше перпендикулярного магнитному полю размера препятствия, генерирующего альвеновские крылья, поэтому при решении задач о возмущениях в набегающем потоке необходим кинетический подход.

Liuzzo и др. (2015) в гибридной модели, в которой ионы рассматривались как частицы, а электроны как жидкость, используя кинетический подход, получили значения плотности плазмы возле Каллисто, соответствующие найденным по волновым измерениям Galileo во время пролета C10 $\sim 100\text{--}400 \text{ см}^{-3}$ (Gurnett и др., 2000). Это означает, что прямое взаимодействие ионосферы спутника с магнитосферой планеты может быть достаточно эффективным. Как было отмечено, расчеты Lindkvist и др. (2015) для пролетов Galileo C3, C9 и C10 в предположении, что источником возмущений магнитного поля является только проводящий подповерхностный океан, дали хорошее согласие с наблюдениями для C3 и C9, но не для C10, из чего следовало, что для пролета C10 взаимодействие ионосферы Каллисто с магнитосферной плазмой Юпитера тоже должно быть учтено. При пролете C10 расстояние Каллисто от центральной плоскости юпитерианского токового слоя было наименьшим для этих трех пролетов: по данным Liuzzo и др. (2015) это расстояние составило для C3 $3.24 R_J$, для C9 — $3.52 R_J$, для C10 — $2.45 R_J$. При пролете C10 плотность плазмы ($\sim 400 \text{ см}^{-3}$) была больше, чем при двух других пролетах. Чем ближе к центру токового слоя Каллисто, тем меньше вклад в магнитные возмущения токов, индуцируемых в океане, по сравнению с альвеновскими крыльями (Liuzzo и др., 2015).

Liuzzo и др. (2015) на примере пролета Galileo C10 17.09.1997 показали, что в непосредственной близости от Каллисто главную роль в магнитных возмущениях играет квазидипольное индуцированное поле, созданное благодаря проводимости подповерхностного океана, а на больших расстояниях ($> 2 R_C$) — альвеновские крылья. Генерация альвеновских крыльев вызвана торможением и отклонением набегающего потока магнитосферной плазмы из-за его нагружения ионосферными ионами Каллисто, гирорадиус которых может значительно превышать размер этого спутника Юпитера. В результате возникает сильная асимметрия в возмущенной области с большим пиком величины магнитного поля в лобовой стороне и

сдвиговыми течениями между легкими и тяжелыми ионами в тыльной стороне.

Для исследования возмущений вблизи Каллисто при пролете Galileo C10 Liuzzo и др. (2017) использовали Adaptive Ion-Kinetic Electron-Fluid hybrid (AIKEF) модель. Было использовано кинетическое описание поведения ионов в окрестности Каллисто, т.к. там гирорадиусы магнитосферных и ионосферных pickup ионов спутника могут на порядок превышать его радиус. При этом ионы рассматривались как макрочастицы с отношением заряда к массе как у настоящих ионов, а электроны как безмассовая нейтрализующая заряд жидкость (Liuzzo и др., 2015). Уравнения движения решались для каждой отдельной макрочастицы:

$$dx_i/dt = v_i, \quad (1)$$

$$dv_i/dt = (q_i/m_i)[\mathbf{E} + v_i \times \mathbf{B}], \quad (2)$$

где x_i и v_i определяют положение и скорость индивидуальной макрочастицы с зарядом q_i и массой m_i , а \mathbf{E} и \mathbf{B} — электрическое и магнитное поля. Динамика электронов определялась решением модифицированного уравнения Навье-Стокса:

$$-en_e[\mathbf{E} + u_e \times \mathbf{B}] - \nabla P_e + n_e \eta j = 0, \quad (3)$$

где n_e и u_e — плотность и массовая скорость электронной жидкости, e — заряд электрона, η — удельное сопротивление, j — плотность тока. Электронное давление P_e предполагалось адиабатическим

$$P_e = P_0 (n_e/n_{e0})^\kappa, \quad (4)$$

где P_0 и n_{e0} — электронное давление и плотность в невозмущенном потоке магнитосферной набегающей плазмы. Поскольку в присутствии магнитного поля уменьшается число степеней свободы движения электронов, полагали $\kappa = 2$. Из условия квазинейтральности следует, что плотность электронов равна сумме плотностей всех типов ионов (предполагалось, что в окрестности Каллисто существуют только однозарядные ионы, т.е. $q_i = e$). Из закона Ампера следует, что

$$j = [\nabla \times \mathbf{B}]/\mu_0, \quad (5)$$

и по определению

$$j = -en_e u_e + e \sum_i n_i u_i, \quad (6)$$

здесь u_i — массовая скорость ионов. Электрическое поле записывается в виде (Liuzzo и др., 2015):

$$\mathbf{E} = -[u_i \times \mathbf{B}] + [(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}]/en_e \mu_0 - \nabla P_e/en_e + (\eta/\mu_0)[\nabla \times \mathbf{B}]. \quad (7)$$

Закон Фарадея описывает временную эволюцию магнитного поля:

$$\partial \mathbf{B}/\partial t = -[\nabla \times \mathbf{E}]. \quad (8)$$

При решении системы уравнений (1)–(8) скорость набегающего потока считалась равной $u_0 = 271.5 \text{ км с}^{-1}$, $M_A = 0.808$, магнитозвуковое число Маха $M_{MS} = 0.802$ (все параметры находились

внутри диапазонов, указанных в работе Kivelson и др. (2004)). В альвеновских крыльях, полученных для пролета C10, драпирующиеся силовые линии вблизи Каллисто были наклонены под углом $\sim 40^\circ$ к фоновому магнитосферному полю \mathbf{B}_0 . Ударная волна не образовывалась перед Каллисто. Оба альвеновских крыла приходили к Юпитеру, пересекая его ионосферу в северном и южном полушариях (вне зоны расчета Liuzzo и др. (2015)). Результаты вычислений хорошо описывали наблюдения во время пролета Galileo C10.

Liuzzo и др. (2017) показали, что для пролетов C23 и C30, когда Каллисто была на расстоянии $0.87 R_J$ и $\pm 0 R_J$ от токового слоя, магнитный эффект от подповерхностного океана был незаметен, основной вклад в магнитные возмущения давали альвеновские крылья. При пролете C23 возникали асимметричные альвеновские крылья в северном и южном полупространствах. 25 мая 2001 г. был последний облет Каллисто Galileo (C30). В это время КА ближе всего подошел к Каллисто. При этом Каллисто находилась в центре токового слоя Юпитера, в магнитном экваторе. Магнитные возмущения целиком определялись альвеновскими крыльями (Liuzzo и др., 2017). Модуль возмущенного магнитного поля был $\sim 20 \text{ нТл}$ (Liuzzo и др., 2017, фиг. 6).

Таким образом, если $M_A > 1$ вблизи Каллисто, образуется магнитосфера типа венерианской, как предсказывал Russell (2005), если $M_A < 1$ — возможна генерация альвеновских крыльев, которые наблюдали Bhattacharyya и др. (2018). Два независимых источника возмущений магнитного поля — индукционный диполь и альвеновские крылья могут давать различные вклады в суммарное возмущение.

Для 24.05.2007, когда наблюдался наиболее яркий след от Каллисто, Bhattacharyya и др. (2018) рассчитали разность потенциалов, создаваемую при торможении магнитосферной юпитерианской плазмы каждым из галилеевых спутников: Ио — 374 кВ, Европа — 154 кВ, Ганимед — 89 кВ, Каллисто — 51 кВ. Отсюда следует, что пятно сияний в корне трубки Каллисто слабее свечений от других галилеевых спутников.

ДИСКУССИЯ: ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ ОТ КАЛЛИСТО И ТЕОРИЯ ГЕНЕРАЦИИ ГЛАВНЫХ ОВАЛОВ ЮПИТЕРА

Недавние наблюдения сияний, связанных с Каллисто, подтверждают идею о том, что в субальвеновском потоке замагниченной плазмы на расстоянии $26.93 R_J$ от центра Юпитера могут возбуждаться альвеновские крылья, в пересечении которых с юпитерианской ионосферой возникают сияния. Этот факт можно рассматривать в связи с концепцией генерации сияний главного овала Юпитера. По существующим представлениям в обоих случаях энергия ускоренных электронов,

вызывающих сияния, берется из разности электрических потенциалов, возникающей при торможении вращающейся плазмы (явление униполярной индукции).

Автоматическая межпланетная станция НАСА Juno, запущенная 05.08.2011, в августе 2016 г. передала первые данные о Юпитере. Миссия Juno, в процессе которой КА подошел к Юпитеру ближе всех остальных космических аппаратов, работавших там раньше, и стал искусственным спутником этой планеты, изучая ее полярные области, принесла много новой информации. В частности, были обнаружены H_3^+ инфракрасные (ИК) сияния от Ио, Европы, Ганимеда.

До интерпретации данных Juno, приведенных в работах Connerney и др. (2017a; 2017b) и Mauk и др. (2018), считалось, что крупномасштабное нарушение твердотельного вращения плазмы в экваториальной магнитосфере из-за радиального разлета (в соответствии с законом сохранения импульса) является причиной возникновения сильных продольных токов с плотностью ~ 1 мкА м⁻² (Cowley, Bunce, 2001), вытекающих из ионосферы и вызывающих сияния в главных овалах Юпитера (Hill, 2001; Cowley, Bunce, 2001; Southwood, Kivelson, 2001; Nichols, Cowley, 2004; Sauer и др., 2018). Эту идею высказал V.M. Vasylunas в 1999 г. на конференции, посвященной магнитосферам внешних планет (MOP) в Париже. Cowley и Bunce (2001) отмечали, что для таких токов необходима продольная разность потенциалов ~ 100 кВ, энергия высыпающихся электронов в соответствии с наблюдаемым спектром эмиссии должна быть ~ 100 кэВ, пик потока энергии в ионосфере, переносимой высыпающимися ускоренными электронами $\sim 0.1-1$ Вт м⁻². Этого достаточно для возбуждения УФ-сияний яркостью 1–10 МР с эффективностью преобразования 20% (Prange и др., 1998; Cowley, Bunce, 2001; Cowley и др., 2017). Наблюдаемая яркость главных овалов в УФ- и видимом диапазонах ≥ 100 кР (Prange и др., 1998; Vasavada и др., 1999) с узким максимумом в несколько МР.

Cowley и Bunce (2001) использовали следующую схему расчета поля и токов в системе Юпитера. Рассматривалось осесимметричное магнитное поле в цилиндрической системе координат (ρ , ϕ , z). Ротор азимутальной компоненты магнитного поля B_ϕ дает плотность продольного тока, текущего между ионосферой Юпитера и плазменным слоем в экваториальной магнитосфере, $\rho B_\phi = \text{const}$ вдоль силовых линий. Полоидальное поле с компонентами B_ρ и B_z описывается векторным потенциалом \mathbf{A} : $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$. Функция потока для такого поля $F = \rho A_\phi$ постоянна на силовой линии, т.е. $(\mathbf{B} \cdot \nabla)F = 0$ (Cowley, Bunce, 2001). Проектирование между ионосферой и экваториальной плоскостью определяется уравнением: $F_i(\theta_i) = F_e(\rho_e)$ (Cowley, Bunce, 2001), где индекс “i” обозначает ионосферу, а “e” – экваториальную магнитосферу,

θ_i – магнитная коширота. При решении задачи выделялись три скорости: $\Omega_j \approx 1.76 \times 10^{-4}$ rad s⁻¹ – скорость вращения Юпитера; ω – скорость плазмы на поверхности магнитных силовых линий с данным значением F , $\omega < \Omega_j$ (субкоротация); Ω_j^* – угловая скорость вращения нейтралов в педерсеновском слое ионосферы планеты (Cowley, Bunce, 2001). Из условия непрерывности тока в системе магнитосфера-ионосфера, текущего вдоль магнитных силовых линий с данным значением F и растекающимся по двум ионосферным полушариям планеты и в экваториальной магнитосфере, авторы получили выражение:

$$\rho_e i_{\rho e} = 2\rho_i i_{\rho i}, \quad (9)$$

где $i_{\rho e}$ – радиальный ток в экваториальной магнитосфере (А м⁻¹), проинтегрированный поперек плазменного слоя; $i_{\rho i}$ – ионосферный педерсеновский ток, проинтегрированный по высоте (направлен к экватору). Условие $\text{div}\mathbf{j} = 0$ определяет ток j_z , текущий к северу и к югу от токового слоя: $j_z = -(1/2\rho_e)d(\rho_e i_{\rho e})/d\rho_e$ (Cowley, Bunce, 2001). При условии, что между ионосферой Юпитера и экваториальной магнитосферой поперечных токов нет, полный продольный ток, втекающий в токовый слой на единицу азимутального радиуса равен (Cowley, Bunce, 2001):

$$I_{||} = 4\Sigma_p^*(\Omega_j - \omega)F_e. \quad (10)$$

Здесь Σ_p^* – эффективная педерсеновская проводимость ионосферы, которая возникает из-за проскальзывания нейтральной атмосферы благодаря столкновениям ионов с нейтралами.

Cowley и Bunce (2001) показали, что продольные токи, связанные с сияниями в главном овале, переносятся высыпающимися электронами, ускоренными продольной разностью потенциалов. Такие энергичные авроральные электроны производят радиоизлучение на частоте, близкой к локальной электронной циклотронной частоте (~ 100 кГц на вершине ускоряющего промежутка и ~ 20 МГц в авроральной ионосфере). Эти оценки, как и рассчитанная интенсивность сияний в овале (1–10 МР), согласуются с наблюдениями.

У Сатурна другой механизм генерации сияний: его полярный овал расположен вблизи границы между открытыми и замкнутыми силовыми линиями (Cowley, Bunce, 2003; Cowley и др., 2008; Belenkaya и др., 2007a; Meredith и др., 2014). Таким образом, УФ-сияния обусловлены взаимодействием магнитосферы Сатурна с солнечным ветром.

После первых пролетов КА Juno вокруг Юпитера в качестве его искусственного спутника концепция механизма генерации сияний в главном юпитерианском полярном овале стала широко обсуждаться и пересматриваться (см., например, Connerney и др., 2017a; 2017b; Mauk и др., 2018). Juno одновременно измеряла частицы в авро-

ральных областях и получала УФ- и ИК-снимки полярных сияний (Connerney и др., 2017a). Connerney и др. (2017a) отмечали, что вблизи планеты измеренное КА Juno магнитное поле значительно отличалось от предсказанного существующими магнитосферными моделями.

Connerney и др., (2017a; 2017b) и Mauk и др. (2018), интерпретируя результаты измерений Juno на траектории Juno Perijove 1 (PJ1), утверждали, что никаких магнитных возмущений не было зарегистрировано при прохождении Juno через полярный овал. Таким образом, авторы делали вывод о том, что не были обнаружены авроральные продольные токи, в то время как по существующей теории главный полярный овал ассоциируется с сильными вытекающими продольными токами (Cowley и др., 2017). В то же время Connerney и др. (2017a) наблюдали на расстоянии $6 R_J$ от центра планеты локальную интенсификацию электронов с питч-углами 0° и 180° при пересечении Juno силовых линий главных овалов.

Cowley и др. (2017) рассчитали в осесимметричной модели магнитосферного поля Юпитера с использованием VIP4 модели Connerney и др. (1981) азимутальные возмущения магнитного поля вдоль траектории PJ1 и получили соответствующие вытекающие из области главного овала на ионосфере Юпитера продольные токи, проектирующиеся в магнитодиск от 15 до $50 R_J$ и разделяющие области твердотельного вращения и субкоротации. По данным Voyager-1 отставание от твердотельного вращения в экваториальной магнитосфере Юпитера происходит от ~ 16 до $30 R_J$ (McNutt и др., 1981, фигура 9). Модельный педерсеновский ионосферный ток, проинтегрированный по азимуту, достигал ~ 54 МА, плотность распределенного по высоким широтам внутри овала втекающего тока была $\sim 55\text{--}80$ нА м $^{-2}$, плотность вытекающего из ионосферы тока в зоне овала была ~ 400 нА м $^{-2}$. Эти токи создают азимутальное магнитное поле B_ϕ (в северном полупространстве отрицательное, в южном положительное), достигающее 620 нТл. Для этого пролета Juno был рассчитан ускоряющий промежуток с разностью потенциалов 80 кВ и максимальный поток энергии высыпавшихся электронов ~ 35 мВт м $^{-2}$, достаточный для возбуждения УФ-сияний интенсивностью ~ 350 кР. Эти значения, включая кошироту и толщину овала, сопоставимы с данными УФ-снимков. По оценкам Cowley и др. (2017) для траектории PJ1 ускоряющий электронный промежуток находился на высоте от 3 до $6 R_J$.

КА Juno обнаружил вытекающие из двух полярных шапок Юпитера электронные продольные пучки. Это означает, что полярные шапки заполнены втекающими продольными токами. Cowley и др. (2017) подчеркивали, что в соответствии с принятой парадигмой генерации сияний главных овалов, существовавшей до работ Connerney и др. (2017a, 2017b) и Mauk и др. (2018), втекающие распре-

ленные продольные токи должны пронизывать ионосферу в области высокоширотной проекции хвоста и внешней магнитосферы.

Структура магнитных силовых линий с корнями в полярных шапках сильно зависит от направления ММП (Belenkaya, 2004). Детальное описание параболической модели магнитного поля магнитосферы Юпитера, используемой в работе Belenkaya (2004), дано в Alexeev и Belenkaya (2005). Эта модель включает поле планеты, магнитодиска, токовой системы хвоста, токов экранировки на магнитопаузе, а также частично проникающее в магнитосферу ММП. Таким образом, анализируя проектирование с приэкваториальных областей вдоль магнитных силовых линий с корнями в высокоширотной ионосфере, желателно учитывать направление соответствующего ММП (если оно известно).

Альфвеновский Мах в окрестности Каллисто близок к 1, согласно Neubauer (1998) среднее значение $M_A \sim 0.94$. Так как проекция Каллисто на ионосферу Юпитера попадает почти на главный овал, это означает, что проекция овала на экваториальную магнитосферу расположена вблизи Каллисто, а, следовательно, вблизи зоны, где $M_A \sim 1$. Расстояние от центра планеты до места, где $M_A = 1$, называется альвеновским радиусом. На альвеновском радиусе плотности магнитной и кинетической энергий плазмы равны. В юпитерианской экваториальной магнитосфере на этом расстоянии происходит радиальный разлет плазмы, и ее кинетическая энергия начинает преобладать над магнитной: магнитное поле, следуя за плазмой, вытягивается в структуру магнитодиска. На альвеновском радиусе из-за роста радиальной скорости уменьшается азимутальная составляющая по закону сохранения импульса, следовательно, нарушается твердотельное вращение, что приводит к генерации сильных продольных токов, связанных с возбуждением полярных сияний в главном овале (Cowley, Bunce, 2001, Hill, 2001). Таким образом, вытекающие из главного овала Юпитера продольные токи генерируются в экваториальной магнитосфере на альвеновском радиусе (Belenkaya, Khodachenko, 2012; Belenkaya и др., 2015). Недавние наблюдения сияний от Каллисто дают косвенное подтверждение (или, как минимум, не противоречат) существовавшей ранее концепции генерации главных полярных овалов Юпитера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каллисто — галилеевский спутник, находящийся в экваториальной магнитосфере Юпитера вблизи альвеновского радиуса ($M_A \sim 1$). Условия в магнитосфере в этом месте особенно изменчивы, и альвеновское число Маха колеблется вокруг 1. Положение Каллисто определяет особый интерес к этому объекту: он является маркером альвеновского радиуса в экваториальной магнитосфере

ре Юпитера. В периоды, когда $M_A < 1$ вблизи Каллисто, могут возбуждаться альфеновские крылья в потоке замагниченной магнитосферной плазмы.

Большие галилеевы спутники, находящиеся ближе к Юпитеру (Ио, Европа, Ганимед), где $M_A < 1$, имеют яркие пятна УФ-сияний, почти постоянно присутствующие на юпитерианской ионосфере в корнях их альфеновских крыльев. Аналогичное пятно от Каллисто было обнаружено впервые Bhattacharya и др. (2018) в результате применения специальной методики выделения слабого сигнала в специально выбранное время. Наблюдать свечение от Каллисто трудно, поскольку оно слабое, расположено очень близко от яркого главного аврорального овала Юпитера и возникает только, когда альфеновское число Маха в окрестности спутника становится меньше 1. Поскольку M_A возрастает с увеличением расстояния от Юпитера, луны, расположенные дальше, чем Каллисто, находятся в потоке плазмы с $M_A > 1$ и не могут генерировать альфеновские крылья.

Близость корня трубки Каллисто к главному овалу Юпитера служит косвенным подтверждением (или, по крайней мере, не противоречит) существующей теории генерации сияний в главном авроральном овале, основанной на представлении о том, что сияния вызваны ускоренными электронами вытекающих из ионосферы продольных токов. Эти токи возникают из-за нарушения твердотельного вращения плазмы в экваториальной магнитосфере (явление униполярной индукции) на альфеновском радиусе за счет радиального разлета плазмы под действием центробежной силы. Если существующая теория верна, то продольные токи главного аврорального овала возникают там, где $M_A \sim 1$. Поскольку там же находится Каллисто, а ее проекция на ионосферу Юпитера попадает почти в главный овал, это является косвенным подтверждением рассматриваемой концепции механизма возбуждения сияний в полярном овале Юпитера.

Исследование галилеевых спутников Юпитера, включая такой сложный объект как Каллисто, дает ключ к пониманию процессов, происходящих при взаимодействии со звездным ветром близких к их центральным звездам экзопланет.

Работа поддержана Министерством Науки и Высшего Образования Российской Федерации (грант RFMEFI61619X0119), автор выражает благодарность инфраструктуре VESPA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев И.И., Бельнская Е.С. Нелинейные альфеновские возмущения, возникающие в потоке замагниченной плазмы над проводящим телом // Геомагнетизм и Аэронаука. 1989. Т. 29. № 6. С. 902–909.
- Бельнская Е.С. Переходные токовые системы в магнитосферах Земли и Сатурна // Геомагнетизм и Аэронаука. 2006. Т. 46. № 5. С. 588–595.
- Кропоткин А.П. Альфеновские волны, генерируемые движущимся в ионосфере источником // Геомагнетизм и Аэронаука. 1989. Т. 29. № 3. С. 452–457.
- Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Acuna M.H., Neubauer F.M., Ness N.F. Standing Alfvén wave current system at Io: Voyager 1 observations // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 8513–8521.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S. Alfvén wings in the vicinity of a conducting body in the magnetized plasma // J. Atmos. Terr. Phys. 1991. V. 53. № 11/12. P. 1099–1101.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S. Modeling of the Jovian Magnetosphere // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 809–826.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Lyutov Yu.G. Electric fields and field-aligned current generation in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № A3. P. 4041–4051. <https://doi.org/10.1029/92JA01520>
- Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Feldstein Ya.I., Gromova L.I. The model description of magnetospheric magnetic field in the course of magnetic storm on January 9–12, 1997 // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № A11. P. 25683–25694.
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Slavin J.A., Korth H., Anderson B.J., Baker D.N., Boardsen S.A., Johnson C.L., Purucker M.E., Sarantos M., Solomon S.C. Mercury's magnetospheric magnetic field after the first two MESSENGER flybys // Icarus. 2010. V. 209. № 1. P. 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.01.024>
- Baumjohann W., Blanc M., Fedorov A., Glassmeier K.-H. Current systems in planetary magnetospheres and ionospheres // Space Sci Rev. 2010. V. 152. P. 99–134. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9629-z>
- Belenkaya E.S. Two-dimensional non-linear Alfvén wings generated by the electrodynamic interaction between Callisto and the Jovian magnetosphere // Astrophys. and Space Sci. 2001. V. 277. № 1/2. P. 289–292.
- Belenkaya E. The Jovian magnetospheric magnetic and electric fields: Effects of the interplanetary magnetic field // Planet. Space Sci. 2004. V. 52. P. 499–511.
- Belenkaya E., Khodachenko M. Accretion and current discs controlled by strong magnetic field // Int. J. Astron. Astrophys. 2012. V. 2. P. 81–96. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2012.22012> (<http://www.SciRP.org/journal/ijaa>).
- Belenkaya E., Alexeev I., Clauer C.R. Field-aligned current distribution in the transition current system // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. № A11207. <https://doi.org/10.1029/2004JA010484>
- Belenkaya E.S., Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Blokhina M.S. Definition of Saturn's magnetospheric model parameters for the Pioneer 11 flyby // Ann. Geophys. 2006. V. 24. № 3. P. 1145–1156.
- Belenkaya E.S., Alexeev I.I., Blokhina M.S., Cowley S.W.H., Badman S.V., Kalegaev V.V., Grigoryan M.S. IMF dependence of the open-closed field line boundary in Saturn's ionosphere, and its relation to the UV auroral oval observed by the Hubble Space Telescope // Ann. Geophys. 2007a. V. 25. P. 1215–1226. www.ann-geophys.net/25/1215/2007/
- Belenkaya E., Alexeev I., Clauer C.R. Magnetic field of the transition current system: Dawn-dusk asymmetry // Ann. Geophys. 2007b. V. 25. № 8. P. 1899–1911. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-1899-2007>
- Belenkaya E.S., Khodachenko M.L., Alexeev I.I. Alfvén radius — a key parameter for astrophysical magneto-

- spheres, in: Helmut Lammer and Maxim Khodachenko (Eds.) *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments* // *Astrophys. Space Sci.* 2015. Library, Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. V. 411. P. 239–252.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-09749-7>
- Bhattacharyya D., Clarke J.T., Montgomery J., Bonfond B., Gerard J.-C., Grodent D.* Evidence for auroral emissions from Callisto's footprint in HST UV images // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2018. V. 123. P. 364–373.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024791>
- Bonfond B., Grodent D., Gérard J.-C., Stallard T., Clarke J.T., Yoneda M., Radioti A., Gustin J.* Auroral evidence of Io's control over the magnetosphere of Jupiter // *Geophys. Res. Lett.* 2012 // V. 39. № L01105.
<https://doi.org/10.1029/2011GL050253>
- Bonfond B., Grodent D., Badman S.V., Saur J., Gérard J.C., Radioti A.* Similarity of the Jovian satellite footprints: Spots multiplicity and dynamics // *Icarus*. 2017. V. 292. P. 208–217.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.01.009>
- Clarke J.T., Ballester G.E., Trauger J., Evans R., Connerney J.E.P., Stapelfeldt K., Crisp D., Feldman P.D., Burrows C.J., Casertano S., Gallagher III J.S., Griffiths R.E., Hester J.J., Hoessel J.G., Holtzman J.A., Krist J.E., Meadows V., Mould J.R., Scowen P.A., Watson A.M., Westphal J.A.* Far-ultraviolet imaging of Jupiter's aurora and the Io "footprint" // *Science*. 1996. V. 274. № 5286. P. 404–409.
<https://doi.org/10.1126/science.274.5286.404>
- Clarke J.T., Ajello J., Ballester G., Ben Jaffel L., Connerney J., Gérard J.C., Gladstone J.R., Grodent D., Trauger P.W., Waite J.H.* Ultraviolet emissions from the magnetic footprints of Io, Ganymede, and Europa on Jupiter // *Nature*. 2002. V. 415. № 6875. P. 997–1000.
<https://doi.org/10.1038/415997a>
- Clauer C.R., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Baker J.B.* Special features of the September 24–27, 1998 storm during high solar wind dynamic pressure and northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № All. P. 25695–25711.
- Connerney J.E.P., Acuña M.H., Ness N.F.* Modeling the Jovian current sheet and inner magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. P. 8370–8384.
<https://doi.org/10.1029/JA086iA10p08370>
- Connerney J.E.P., Acuna M.H., Ness N.F., Satoh T.* New models of Jupiter's magnetic field constrained by the Io flux tube footprint // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 11929–11939.
<https://doi.org/10.1029/97JA03726>
- Connerney J.E.P., Adriani A., Allegrini F., Bagenal F., Bolton S.J., Bonfond B., Cowley S.W.H., Gerard J.C., Gladstone G.R., Grodent D., Hospodarsky G., Jorgensen J.L., Kurth W.S., Levin S.M., Mauk B., McComas D.J., Mura A., Paranicas C., Smith E.J., Thorne R.M., Valek P., Waite J.* Jupiter's magnetosphere and aurorae observed by the Juno spacecraft during its first polar orbits // *Science*. 2017a. V. 356. № 6340. P. 826–832.
<https://doi.org/10.1126/science.aam5928>
- Connerney J.E.P., Benn M., Bjarno J.B., Denver T., Espley J., Jorgensen J.L., Jorgensen P.S., Lawton P., Malinnikova A., Merayo J.M., Murphy S., Odom J., Oliverson R., Schnurr R., Sheppard D., Smith E.J.* The Juno magnetic field investigation // *Space Sci. Rev.* 2017b. V. 213. № 1–4. P. 39–138.
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0334-z>
- Cowley S.W.H.*, *Magnetosphere-Ionosphere Interactions: A Tutorial Review* in: *Geophysical Monograph Series*. 2013. V. 118 / Ed. Shin-ichi Ohtani, Ryoichi Fujii, Michael Hesse, Robert L. Lysak // *American Geophys. Union*. Washington DC. P. 91–106.
<https://doi.org/10.1029/GM118>
- Cowley S.W.H., Bunce E.J.* Origin of the main auroral oval in Jupiter's coupled magnetosphere-ionosphere system // *Planet. and Space Sci.* 2001. V. 49. P. 1067–1088.
- Cowley S.W.H., Bunce E.J.* Corotation-driven magnetosphere-ionosphere coupling currents in Saturn's magnetosphere and their relation to the auroras // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21. № 8. P. 1691–1707.
- Cowley S.W.H., Arridge C.S., Bunce E.J., Clarke J.T., Coates A.J., Dougherty M.K., Gerard J.-C., Grodent D., Nichols J.D., Talboys D.L.* Auroral current systems in Saturn's magnetosphere: comparison of theoretical models with Cassini and HST observations // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 9. P. 2613–2630.
<https://doi.org/10.5194/angeo-26-2613-2008>
- Cowley S.W.H., Provan G., Bunce E.J., Nichols J.D.* Magnetosphere-ionosphere coupling at Jupiter: Expectations for Juno Perijove 1 from a steady state axisymmetric physical model // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 4497–4505.
<https://doi.org/10.1002/2017GL073129>
- Drell S.D., Foley H.M., Ruderman M.A.* Drag and propulsion of large satellites in the ionosphere: An Alfvén propulsion engine in space // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. № 13. P. 3131–3145.
- Fairfield D.H.* An evolution of the Tsyganenko magnetic field model // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № A2. P. 1481–1494.
- Gurnett D.A., Persoon A.M., Kurth W.S., Roux A., Bolton S.J.* Plasma densities in the vicinity of Callisto from Galileo plasma wave observations // *Geophys. Res. Letts.* 2000. V. 27. P. 1867–1872.
- Gurnett D.A., Persoon A.M., Kurth W.S., Roux A., Bolton S.J.* Electron densities near Io from Galileo plasma wave observations // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 26225–26232.
- Hartkorn O., Saur J., Strobel D.* Structure and density of Callisto's atmosphere from a fluid-kinetic model of its ionosphere: Comparison with HST and Galileo observations // *Icarus*. 2017. V. 282. P. 237–259.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.09.020>
- Hill T.W.* The jovian auroral oval // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 8101–8107.
<https://doi.org/10.1029/2000JA000302>
- Керко Л., McPherron R.L., Amm O., Apatenkov S., Baumjohann W., Birn J., Lester M., Nakamura R., Pulkkinen T.I., Sergeev V.* Substorm Current Wedge Revisited // *Space, Sci. Rev.* 2015. V. 190. № 1–4. P. 1–46.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0124-9>
- Khurana K.K.* Influence of solar wind on Jupiter's magnetosphere deduced from currents in the equatorial plane // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 25999–26016.
- Khurana K.K., Kivelson M.G., Russel C.T., Walke R.J., Southwood D.V.* Absence of an internal magnetic field at Callisto // *Nature*. 1997. V. 387. № 6630. P. 262–264.
- Khurana K.K., Kivelson M.G., Stevenson D.J., Schubert G., Russell C.T., Walker R.J., Polanskey C.* Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto // *Nature*. 1998. V. 395. № 6704. P. 777–780.
- Kivelson M.G.* Moon–magnetosphere interactions: a tutorial // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 2061–2077.
- Kivelson M.G., Khurana K.K., Stevenson D.J., Bennett L., Joy S., Russell C.T., Walker R.J., Zimmer C., Polanskey C.*

- Europa and Callisto: Induced or intrinsic fields in a periodically varying plasma environment // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № A3. P. 4609–4625.
- Kivelson M.G., Khurana K.K., Russell C.T., Volwerk M., Joy S.P., Walker R.J., Zimmer C., Linker J.A.* Magnetized or unmagnetized: Ambiguity persists following Galileo's encounters with Io in 1999 and 2000 // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 26121–26135.
- Kivelson M.G., Bagenal F., Kurth W.S., Neubauer F.M., Paranicas C., Saur J.* Magnetospheric interactions with satellites // Bagenal, F., Dowling, T.E., McKinnon, W.B. (Eds), *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, 2004. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., P. 513–536.
- Korth H., Johnson C.L., Philpott L., Tsyganenko N.A., Anderson B.J.* A Dynamic Model of Mercury's Magnetospheric Magnetic Field // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. № 20. P. 10147–10154.
<https://doi.org/10.1002/2017GL074699>
- Lindkvist J., Holmstrom M., Khurana K.K., Fatemi S., Barabash S.* Callisto plasma interactions: Hybrid modeling including induction by a subsurface ocean // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2015. V. 120. P. 4877–4889.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021212>
- Liuzzo L., Feyerabend M., Simon S., Morschmann U.* The impact of Callisto's atmosphere on its plasma interaction with the Jovian magnetosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2015. V. 120 P. 9401–9427.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021792>
- Liuzzo L., Simon S., Feyerabend M., Motschmann U.* Magnetic signatures of plasma interaction and induction at Callisto: The Galileo C21, C22, C23, and C30 flybys // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2017. V. 122. P. 7364–7386.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024303>
- Mauk B.H., Haggerty D.K., Paranicas C., Clark, G., Kollmann P., Rymer A.M., Peachey J.M., Bolton S.J., Levin S.M., Adriani A., Allegrini F., Bagenal F., Bonfond B., Connerney J.E.P., Ebert R.W., Gladstone G.R., Kurth W.S., McComas D.J., Ranquist D., Valek P.* Diverse electron and ion acceleration characteristics observed over Jupiter's main aurora // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 1277–1285.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076901>
- McNutt R.L., Jr., Belcher J.W., Bridge H.S.* Positive ion observations in the middle magnetosphere of Jupiter // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86. № A10, P. 8319–8342.
- Menietti J.D., Gurnett D.A., Kurth W.S., Groene J.B.* Control of Jovian radio emission by Ganymede // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 23. P. 4281–4284.
- Menietti J.D., Gurnett D.A., Christopher I.* Control of Jovian radio emission by Callisto // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3047–3050.
<https://doi.org/10.1029/2001GL012965>
- Meredith C.J., Alexeev I.I., Badman S.V., Belenkaya E.S., Cowley S.W.H., Dougherty M.K., Kalegaev V.V., Lewis G.R., Nichols J.D.* Saturn's dayside ultraviolet auroras: Evidence for morphological dependence on the direction of the upstream interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. № 3. P. 1994–2008.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019598>
- Neubauer F.M.*, Nonlinear standing Alfvén wave current system at Io – Theory // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 1171–1178.
- Neubauer F.M.*, The sub-Alfvénic interaction of the Galilean satellites with the Jovian magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103(E9). P. 19843–19866.
- Neubauer F.M.* Alfvén wings and electromagnetic induction in the interiors: Europa and Callisto // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 28671–28684.
- Ness N.F., Acuna M.H., Lepping R.P., Burlaga L.F., Behannon K.W., Neubauer F.M.* Magnetic field studies at Jupiter by Voyager 1: Preliminary results // *Science.* 1979. V. 204. P. 982–987.
- Nichols J.D., Cowley S.W.H.* Magnetosphere-ionosphere coupling currents in Jupiter's middle magnetosphere: Effect of precipitation-induced enhancement of the ionospheric Pedersen conductivity // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 1799–1827.
- Olsen N., Stolle C.* Magnetic Signatures of Ionospheric and Magnetospheric Current Systems During Geomagnetic Quiet Conditions – An Overview // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 206. № 1–4. P. 5–25.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0279-7>
- Pulkkinen T.I., Ganushkina N.Y., Tanskanen E.I., Kubyshkina M., Reeves G.D., Thomsen M.F., Russell C.T., Singer H.J., Slavin J.A., Gjerloev J.* Magnetospheric current systems during stormtime sawtooth events // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № A11S17.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011627>
- Prange R., Rego D., Pallier L., Connerney J.E.P., Zarka P., Queinnee J.* Detailed study of FUV jovian auroral features with the post-COSTAR HST faint object camera // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 20195–20215.
- Russell C.T.* Interaction of the Galilean moons with their plasma environments // *Planet. Space Sci.* 2005. V. 53. P. 473–485.
- Saur J., Chane E., Hartkorn O.* Modeling magnetospheric fields in the Jupiter system, in: Hemann Luhr, Johannes Wicht, Stuart A. Gilder, Matthias Holschneider (Eds.) *Magnetic fields in the solar system: Planets, moons and solar wind interactions* // *Astrophys. and Space Sci. Library.* 2018. P. 153–181.
- Siscoe G.L., Crooker N.U., Erickson G.M., Sonnerup B.U., Siebert K.D., Weimer D.R., White W.W., Maynard N.C.* Global Geometry of Magnetospheric Currents Inferred From MHD Simulations / *Geophysical Monograph Series, V. 118/Eds Shin-ichi Ohtani, Ryoichi Fujii, Michael Hesse, Robert L. Lysak* // *American Geophysical Union, Washington DC.* 2013. P. 41–52.
<https://doi.org/10.1029/GM118>
- Southwood D.J., Kivelson M.G.* A new perspective concerning the influence of the solar wind on the Jovian magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № A4. P. 6123–6130.
<https://doi.org/10.1029/2000JA000236>
- Strobel D.F., Saur J., Feldman P.D., McGrath M.A.* Hubble Space Telescope space telescope imaging spectrograph search for an atmosphere on Callisto: A Jovian unipolar inductor // *Astrophys. J.* 2002. V. 581. № 1. P. L51–L54.
<https://doi.org/10.1086/345803>
- Vasavada A.R., Bouchez A.H., Ingersoll A.P., Little B., Anger C.D.* Jupiter's visible aurora and Io footprint // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 27133–27142.
- Zimmer C., Khurana K., Kivelson M.* Subsurface oceans on Europa and Callisto: Constraints from Galileo magnetometer observations // *Icarus.* 2000. V. 147 № 2. P. 329–347.
<https://doi.org/10.1006/icar.2000.6456>
- Wright A.N., Southwood D.J.* Stationary Alfvénic structures // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 1167–1175.