

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СКАЧКА ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА МЕЖДУ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ И МАГНИТОПАУЗОЙ ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ СПУТНИКОВЫМ И НАЗЕМНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2022 г. В. В. Сафаргалеев*

Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: Vladimir.safargaleev@pgia.ru

Поступила в редакцию 03.03.2022 г.

После доработки 18.05.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Распространение неоднородностей солнечного ветра через переходную область между фронтом головной ударной волны и дневной магнитопаузой является важным звеном в цепочке солнечно-земных связей. В работе проанализирована уникальная ситуация, когда во время скачка давления солнечного ветра вблизи головной ударной волны находились два спутника THEMIS, а удачное расположение наземной магнитометрической аппаратуры позволило определить момент удара солнечного ветра по магнитопаузе с большей точностью, чем это делалось ранее. На основе измерений проведена оценка времени распространения SI в магнитослое. Полученная величина (~1 мин) согласуется с модельными расчетами, но оказывается в 2–3 раза меньше, чем полученная ранее другими авторами также из спутниковых и наземных наблюдений. Определена скорость распространения солнечного ветра в магнитослое (~280 км/с), скорость смещения к Земле фронта головной ударной волны (~80 км/с) и толщина магнитослоя в месте нахождения спутников (2.6–3.9 R_E).

DOI: 10.31857/S0016794022060128

1. ВВЕДЕНИЕ

Важным этапом на пути к прогнозированию космической погоды является корректное отождествление внутримангнитосферных возмущений с вариациями параметров межпланетной среды. Методику отождествления проще отработать на случаях изолированных возмущений большой амплитуды, какими являются, среди прочих, скачки динамического давления солнечного ветра (SI), называемые в литературе внезапными импульсами (*sudden impulses*, SI). Давление меняется скачком на фронте межпланетной ударной волны (МУВ), считающейся одним из наиболее геоэффективных явлений в околоземном космическом пространстве. Для отождествления внутримангнитосферного возмущения с МУВ (далее мы будем употреблять оба термина, МУВ и SI) необходимо знать момент подхода фронта SI к дневной магнитопаузе (далее момент T_0).

Наиболее распространенной является ситуация, когда в распоряжении исследователя есть данные только одного спутника, осуществляющего мониторинг солнечного ветра в точке Лагранжа. Для определения T_0 в этом случае требуется рассчи-

тать время распространения возмущения от спутника до дневной магнитопаузы, которое складывается из времени распространения в солнечном ветре от спутника до подсолнечной точки на фронте околоземной головной ударной волны, T_{CB} , и времени прохождения возмущения через переходную область (магнитослой), T_{MC} . Такое разделение является логичным, поскольку до фронта ударной волны SI распространяется в условно “невозмущенном” солнечном ветре, то есть не искаженном натеканием на препятствие в виде магнитосферы. Если первое слагаемое достаточно просто оценить, исходя из параметров солнечного ветра на спутнике (см., например, [King and Papitashvili, 2004]) и положения подсолнечной точки, определяемой, например, по методике Farris and Russel [1994], то оценка другого слагаемого, а именно, времени прохождения возмущения от ударной волны до магнитопаузы, T_{MC} требует знания не только положения магнитопаузы (можно оценить, например, по методике Shue et al. [1997]), но и параметров магнитослоя.

Пересчет вариаций межпланетной среды на подсолнечную точку на фронте головной ударной волны для определения T_{CB} может быть произ-

веден при помощи сервиса OMNI (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>). Уместно здесь отметить статистические исследования Ridley [2000], показавшие, что, в зависимости от степени удаленности от линии Солнце–Земля спутника WIND, данные которого используются для пересчета, неопределенность оценки T_{CB} лежит в пределах 8–25 мин.

Информация о процессах в переходной области, включая и интересующий нас вопрос о времени распространения от головной ударной волны до магнитопаузы (T_{MC}), берется, преимущественно, из теоретических модельных расчетов, например, работ [Samsonov et al., 2006; Andreevová, K., 2009; Koval et al., 2006a] и ссылки в них. Принимая во внимание сложность и слабую изученность этой среды, к результатам моделирования следует относиться с осторожностью и при благоприятном стечении обстоятельств проверить на реальных измерениях.

Оптимальной для нахождения T_0 по реальным измерениям является ситуация, когда во время SI один из действующих на данный момент спутников оказывается в непосредственной близости от подсолнечной точки на магнитопаузе. Насколько известно автору, в литературе таких случаев не описано. С такой же (небольшой) вероятностью может реализоваться ситуация, когда спутник находится у подсолнечной точки фронта головной ударной волны. Для определения момента T_0 в этом случае, как и со спутником в точке Лагранжа, потребуется знать время прохождения SI через магнитослой, T_{MC} . Таким образом, оценка этого параметра представляет самостоятельный интерес.

В работе Koval et al. [2006a] оценка T_{MC} осуществлялась следующим образом. Сначала по данным нескольких спутников в солнечном ветре рассчитывалось время прихода МУВ к подсолнечной точке на головной ударной волне. Затем это время вычиталось из времени регистрации МУВ на спутнике INTERBALL-1, находящемся где-то в переходной области. В работе не уточнялось, насколько близко к магнитопаузе располагался спутник, поскольку задачей исследования было сравнение результатов модельных расчетов с *in situ* наблюдениями. В работе проанализированы 4 случая нахождения INTERBALL-1 в магнитослое. Как можно заключить из рис. 5 в работе [Koval et al., 2006a]), время распространения SI от расчетного положения фронта ударной волны до спутника составило 1.5–4.5 мин. В силу вышеуказанной причины, эту величину нельзя считать временем T_{MC} . В работе [Koval et al., 2006b] проанализирована ситуация, когда в магнитослое спутник GEOTAIL располагался вблизи магнитопаузы, но не у подсолнечной точки, куда приходит удар фронта МУВ, а у вечернего фланга магнитопаузы, далеко от подсолнечной точки

(см. рис. 3 в этой работе). Такое положение спутника дает завышенное значение T_{MC} . При этом также следует помнить о неопределенности расчета времени распространения SI до ударной волны [Ridley, 2000].

В работе [Villante et al., 2004] было исследовано 20 случаев SI, зарегистрированных в межпланетной среде на спутнике WIND. Сначала авторы также рассчитали время подхода фронта возмущения к головной ударной волне, а затем, руководствуясь наземными признаками внезапного удара по магнитопаузе, оценили время распространения возмущения от ударной волны через магнитослой и магнитосферу до земной поверхности как 5 мин. При предполагаемом времени распространения возмущения от магнитопаузы до наземного наблюдателя 1–2 мин [Farrugia et al., 1989], время распространения SI в переходной области составило 3–4 мин, что дает среднее значение скорости движения SI в переходной области в 3–4 раза меньше скорости МУВ в солнечном ветре и согласуется с результатами мультиспутниковых измерений в магнитослое [Zastenker et al., 2002]. За “наземные признаки” принимались пульсации в авроральных широтах, которые Farrugia et al. [1989] связывали с волновой активностью на магнитопаузе, инициированной SI.

Предложенный Farrugia et al. [1989] наземный признак удара фронта МУВ по магнитопаузе не дает точной оценки момента удара, так как возбуждаемые SI пульсации диапазона Pc5 не имеют отчетливого начала и к тому же могут быть не ионосферным проявлением волн на магнитопаузе, а резонансными колебаниями магнитосферной полости. Последнее затрудняет определение времени распространения колебаний от магнитопаузы до наземного наблюдателя. Используемая оценка этого времени (1–2 мин в работах [Farrugia et al., 1989, Samsonov et al., 2007]) основана на предположении, что инициируемое SI волновое возмущение распространяется внутри магнитосферы как вдоль, так и поперек геомагнитного поля с альвеновской скоростью.

Наземным индикатором внезапного сжатия магнитосферы во время SI традиционно считается ступенчатое изменение X-компоненты геомагнитного поля на экваториальных станциях – так называемый главный импульс. В высоких широтах главному импульсу зачастую предшествует кратковременный импульс противоположной полярности – предварительный импульс, PI, которого нет в спутниковых данных (см., например, [Araki, 1977]). В работе [Safargaleev et al., 2010] был экспериментально показан, что предварительный импульс тесно связан с увеличением риометрического поглощения ионосферы и вспышкой сияний в дневные часы, то есть, с усилением потока высыпавшихся частиц, инициа-

Таблица 1.

№	Код	Название	Геомагнитная широта, (°)	Геомагнитная долгота, (°)	MLT, ч	Δt , с
1	2	3	4	5	6	7
1	LYR	Longyearbyen	75.07	108.19	UT+2.8	10
2	HOR	Hornsund	74.71	106.11	UT+2.7	10
3	BJN	Bear Island	72.00	105.18	UT+2.7	10
4	BAV	Баренцбург	75.03	105.17	UT+2.7	0.025
5	LOZ	Ловозеро	64.91	113.17	UT+3.2	0.025
6	SPG	Красное озеро	57.29	114.57	UT+3.3	0.025
7	ABG	Alibag	~14	~145	~UT+5	60

рованным ударом по магнитопаузе. Поскольку скорость высыпающихся частиц значительно больше скорости волн, можно считать, что информация об ударе по магнитопаузе доходит до наземного наблюдателя практически мгновенно, и метод определения T_0 по предварительному импульсу (или по усилению риометрического поглощения) выглядит более привлекательным. Еще большей точности в определении T_0 можно достичь, если в качестве “наземного признака” удара по магнитопаузе использовать широкополосный всплеск на спектрограммах индукционных магнитометров, также по времени связанный с усилением высыпаний [Safargaleev et al., 2010; Пархомов и др., 2018]. Временное разрешение этих данных составляет сотые доли секунды. Природа всплеска пока остается неясной [Пархомов и др., 2018].

Описанный выше метод определения T_0 работает при условии, что пункты наблюдения (магнитометры и риометры) находятся в непосредственной близости от подножия силовых трубок, из которых происходят инициированные ударом высыпания. В работе [Safargaleev et al., 2010] эта область отождествляется с пятном дневных электронных и протонных сияний, регистрируемых спутниками POLAR или IMAGE в авроральных/субавроральных широтах вблизи местного полудня (с небольшим сдвигом в утренние часы). По мере сжатия магнитосферы пятно расширяется вдоль азимута, достигая утренне-вечернего меридиана через несколько минут после появления. Такая динамика высыпаний приводит к несовпадению начала PI и бухты риометрического поглощения везде, кроме околополуденных часов, что было продемонстрировано в работе [Пархомов и др., 2018] для пунктов наблюдения в вечернем секторе.

Данный метод дает более точное значение T_0 по сравнению с примененным в работе [Farrugia et al., 1989]. Если найти ситуацию, когда в нужный момент времени у подсолнечной точки на

фронте головной ударной волны находится спутник, измеряющий параметры межпланетной среды с хорошим временным разрешением (точнее, сравнимым с временным разрешением наземной аппаратуры), время прохождения SI через магнитослой можно определить из реальных измерений, не прибегая к модельным расчетам. Данная задача и явилась задачей настоящего исследования.

Цель работы формулируется следующим образом. По данным скандинавской сети магнитометров IMAGE, двух индукционных магнитометров Полярного геофизического института в авроральной зоне (Ловозеро, Кольский полуостров) и в высоких широтах (Баренцбург, арх. Шпицберген), а также индукционного магнитометра СПбФ ИЗМИРАН в субавроральной зоне (Ленинградская область) определить момент удара по дневной магнитопаузе (момент T_0) неоднородности солнечного ветра в виде фронта межпланетной ударной волны (скачка давления, SI) по изложенной выше методике. Зная T_0 , по данным спутников миссии THEMIS (*Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms*, включает пять спутников: THA, THB, THC, THD, THE), находящихся во время SI в переходной области вблизи подсолнечной точки на фронте головной ударной волны, оценить время распространения SI через переходную область.

2. МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

Геомагнитные координаты всех задействованных в исследовании магнитных станций приведены в табл. 1 с указанием местного времени (столбец 6) и временного разрешения данных (столбец 7). Широта и долгота всех станций — северная и восточная, соответственно. Пересчет географических координат в геомагнитные, а также местное время, рассчитывались при помощи сервиса VITMO (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>).

Первые три обсерватории в Таблице являются высокоширотной частью скандинавской сети

магнетометров IMAGE. По этим данным определялось начало предварительного импульса. Согласно статистике [Newell and Meng, 1992], силовые линии геомагнитного поля, у подножия которых располагаются, по крайней мере LYR и HOR, проходят в полуденные часы через примыкающий к дневной магнитопаузе низкоширотный пограничный слой (*low latitude boundary layer*, LLBL) и, следовательно, в первую очередь подвержены удару фронта MVB по магнитопаузе. Проверить данное утверждение для обсуждаемого ниже случая не представляется возможным, так как начиная с 2015 г., данные спутников DMSP, по которым получена вышеупомянутая статистика, в прямом доступе в виде спектрограмм отсутствуют.

Используемый метод определения момента удара фронта неоднородности по магнитопаузе, T_0 , подразумевает [Safargaleev et al., 2010], что станции 1–3 в этот момент находятся в окрестности полуденного меридиана. Поэтому нам пришлось существенно ограничить поиск событий SI временным интервалом 7–11 UT (± 2 ч относительно местного полдня). Традиционно считается, что о факте внезапного сжатия магнитосферы солнечным ветром свидетельствует быстрое, в течение нескольких минут, усиление X -компоненты на магнитограмме какой-либо из экваториальных станций. Необходимым условием дальнейшего отбора было наличие на станциях сети IMAGE предварительного импульса с отчетливым началом и/или всплеск УНЧ-активности (полоса 0–2 Гц) в данных индукционных магнетометров.

Для интервала, удовлетворяющего изложенным выше требованиям, при помощи сервиса 4D Orbit Viewer (<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/tipsod/>) определялись координаты спутников THEMIS в межпланетной среде и оценивалось примерное их положение относительно магнитопаузы и фронта головной ударной волны. Согласно [Safargaleev et al., 2002], распределение инициированных SI пульсаций в диапазоне единиц герц имеет максимум около 10 MLT. Ранее аналогичный вывод был получен для геомагнитных пульсаций $Pc3$, источник которых также предполагался в солнечном ветре [Гульельми и Троицкая, 1973]. Основываясь на этих двух экспериментальных результатах и оставляя за рамками работы обсуждение причин сдвига максимума MLT-распределения пульсаций в предполуденный сектор как не принципиальный для исследования вопрос, для дальнейшего рассмотрения отбирались те события, когда какой-либо из спутников THEMIS находился в магнитослое у фронта ударной волны вблизи подсолнечной точки с предполуденной стороны. Меняя давление солнечного ветра (например, с использованием данных спутника WIND), в рамках указанного выше сервиса можно оценить, как

смещается магнитопауза и фронт ударной волны в результате SI.

Находящиеся в свободном доступе данные спутников THEMIS имеют временное разрешение несколько секунд, что заметно выше временного разрешения спутника GEOTAIL, который также иногда выходит за пределы магнитосферы. По этой причине мы не стали подключать GEOTAIL к поиску благоприятных событий.

Нами были просмотрены данные за период с 2006 г. по июнь 2021. Из-за жесткого критерия отбора, только одно событие удовлетворило предъявляемым требованиям. В следующем разделе будет представлен анализ этого события.

3. ВРЕМЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ В ВИДЕ СКАЧКА ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, SI, ЧЕРЕЗ ПЕРЕХОДНУЮ ОБЛАСТЬ

3.1. Общая характеристика явления SI (рис. 1)

11 января 2021 года спутник WIND, проводящий измерения глубоко в солнечном ветре, зафиксировал в 08:10:30 UT быстрое усиление динамического давления с 1.4 до 5.8 нПа, а также увеличение скорости потока плазмы по направлению к Земле с 280 до 330 км/с (рис. 1а).

Спустя ~80 мин неоднородность солнечного ветра достигла Земли. Геомагнитное поле отреагировало на внезапное сжатие традиционным образом. На магнитограмме экваториальной ст. АВГ (нижняя панель на рис. 1б) X -компонента поля увеличилась примерно на 20 нТл. Вариация имела форму, близкую к ступеньке. На высокоширотных станциях LYR, HOR и BJN (рис. 1б, верхняя панель) также произошло быстрое усиление X -компоненты, но здесь оно имело форму одиночного импульса длительностью ~10 мин (BJN) или последовательности из трех импульсов, напоминающей цуг затухающих пульсаций с периодом ~7 мин (пульсации $Pc5$). Данной вариации на всех трех станциях предшествовал кратковременный (~2 мин) импульс противоположной полярности с отчетливым началом — предварительный импульс (*preliminary impulse*, PI). Импульс отсутствует на магнитограмме экваториальной ст. АВГ и в данных спутника WIND. Для нашей задачи важно наличие предварительного импульса.

В меньшей степени традиционным является отклик на SI в частотном диапазоне 0–2 Гц. Пример отклика демонстрируется спектрограммой obs. LOZ на рис. 1в. Отклик можно увидеть также на спектрограммах цепочки индукционных магнетометров obs. Sodankylä, Финляндия (<https://www.sgo.fi/Data/Pulsation/pulData.php>). Отклик в целом имеет сложную форму, но для нашей задачи важно наличие всплеска в полосе 0–0.25 Гц, являющегося началом отклика.

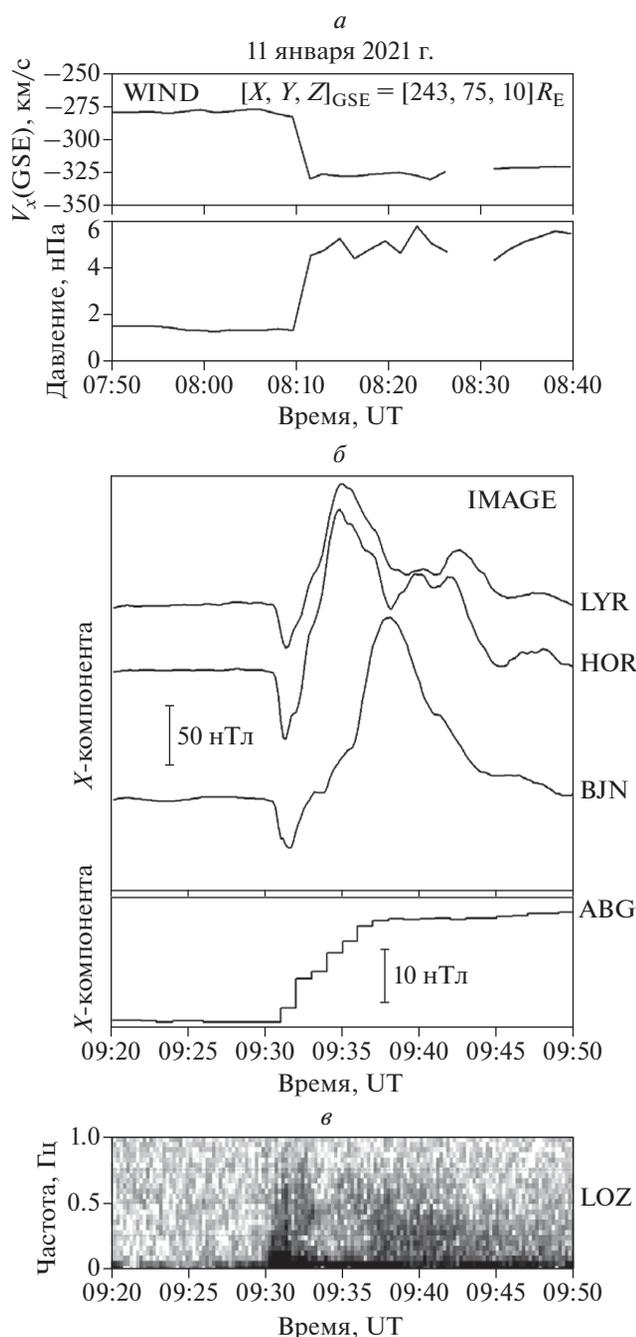


Рис. 1. (а) Внезапное усиление плазменного давления и скорости солнечного ветра (SI). (б) Отклик на SI в авральной зоне (сеть магнитометров IMSAGE) и на экваториальной ст. ABG. (в) Отклик на SI в КНЧ-диапазоне на авральной ст. LOZ (темные места на спектрограмме соответствуют более интенсивному сигналу).

3.2. Момент удара фронта неоднородности по магнитопаузе (рис. 2)

Более быстрым переносчиком информации, чем распространяющиеся вдоль силовых линий

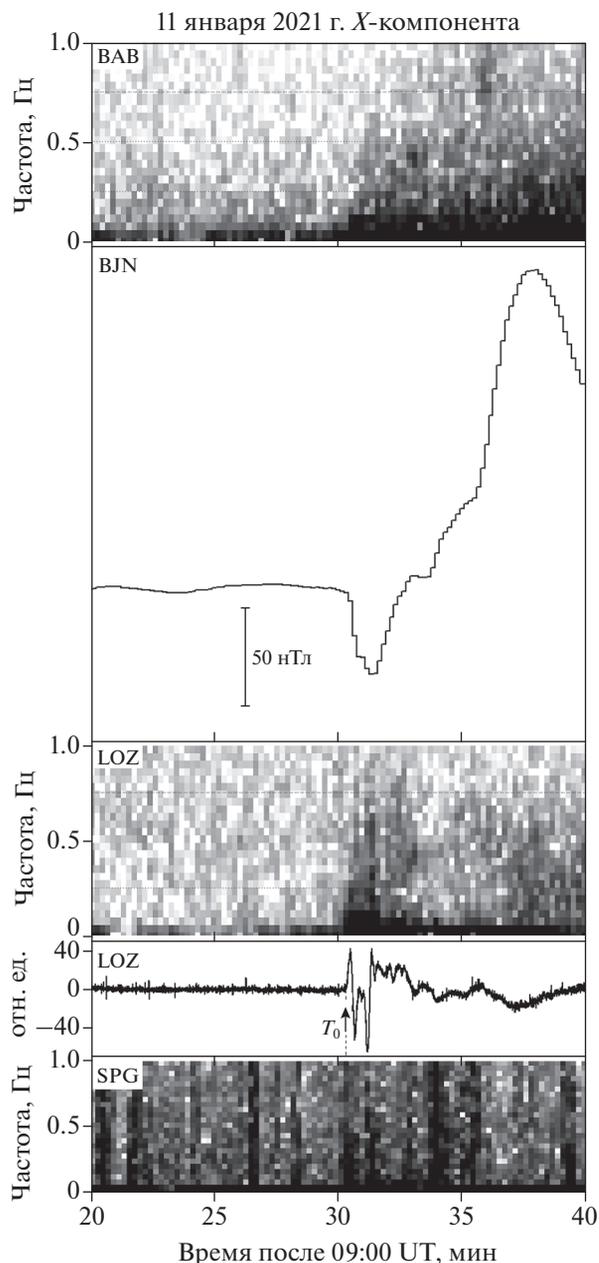


Рис. 2. Начало кратковременного отрицательного импульса (PI) на станции BJN совпадает с началом всплеска в УНЧ-диапазоне как в авральной зоне (LOZ), так и в высоких и субавральных широтах (BAB и SPG, соответственно). Вертикальной штриховой линией с черной стрелкой на осциллограмме LOZ отмечено начало УНЧ-всплеска, инициированного ударом SI по магнитопаузе (момент T_0).

МГД-волны, являются высыпаящиеся электроны. Усиление высыпаний может быть обнаружено оптической аппаратурой, радаром или риометрами. Высыпания меняют ионосферную проводимость и, как следствие, ионосферные токи, что фиксируется наземной магнитной аппаратурой. В работе [Safargaleev et al., 2010] для магнит-

ных и риометрических измерений в окрестности полуденного меридиана было показано (см. рис. 5*b* процитированной работе), что во время SI начало бухты в риометрическом поглощении совпадает с началом предварительного импульса, а также с первым всплеском активности в УНЧ-диапазоне (см. также [Пархомов и др., 2018]). Это дает основание использовать PI и/или УНЧ-отклик как инструмент для диагностики удара фронта МУВ по магнитопаузе в тех ситуациях, когда отсутствуют риометрические измерения.

На рисунке 2 представлена магнитограмма ст. B1N с временной разверткой, позволяющей соотнести начало PI с началом УНЧ-отклика на спектрограммах индукционных магнитометров и на осциллограмме LOZ. Видно, что в пределах временного разрешения данных IMAGE эти начала совпадают. Учитывая, что временное разрешение данных THEMIS (~3 с) выше, чем данных IMAGE и спектрограмм, для повышения точности последующих оценок за момент удара фронта МУВ по магнитопаузе примем момент $T_0 = 09:30:15$ UT, обозначенный на осциллограмме LOZ вертикальной штриховой линией с черной стрелкой.

Сгенерированному SI возмущению типа волны сжатия требуется еще какое-то время, чтобы в экваториальной плоскости магнитосферы пройти от магнитопаузы до того места, где эта волна инициирует высыпание из-за, например, развития электронно-циклотронной неустойчивости. Из рисунка 1*b* видно, что амплитуда PI максимальна на ст. HOR. Значит, ст. HOR находится у подножия силовых линий, проходящих в экваториальной плоскости магнитосферы через область, из которой инициируются высыпания, ответственные за генерацию PI. Согласно статистической картине расположения ионосферных проекции магнитосферных доменов [Newell and Meng, 1992], ст. HOR может находиться на границе между LLBL и пограничным плазменным слоем (*boundary plasma sheet*, BPS). При сделанных выше предположениях относительно локации HOR, путь, который в экваториальной плоскости магнитосферы проходит волна сжатия до того, как стимулирует высыпания, сравним с толщиной LLBL. Этот параметр даже при заданных параметрах межпланетной среды, определяющих конфигурацию дневной магнитосферы, не известен. Предположим, что он $\sim 1R_E$. При скорости распространения волны сжатия $V_A = 1000$ км/с, время распространения до области стимуляции высыпаний ~ 6 с, что сравнимо с временным разрешением данных IMAGE. Если для определения T_0 есть возможность использовать данные индукционных магнитометров, обладающие большим временным разрешением, эту поправку следует учитывать.

3.3. Измерения в переходной области (рис. 3)

Положение спутников TNE и THD относительно друг друга и, предположительно, относительно фронта головной ударной волны (УВ) и магнитопаузы (МП) показано на рис. 3*a* для двух значений давления солнечного ветра – 2 и 5 нПа, то есть до и после прохождения через спутники фронта МУВ. Здесь же показана примерная ориентация фронта МУВ в плоскости XY (жирная линия), рассчитанная по данным спутников THB и THC, находящимся в солнечном ветре. Отметим, что такая ориентация, возможно, является наиболее часто реализуемой для событий SI, поскольку может обеспечить статистический сдвиг в предполуденные часы максимума появления геомагнитных пульсаций $Pc1$, генерируемых ударом фронта МУВ по магнитопаузе.

Координаты спутников, а также положение и форма МП и УВ получены при помощи сервиса 4D Orbit Viewer, значения давления взяты по измерениям на спутнике WIND (рис. 1*c*, нижняя панель). В исследуемый момент времени спутники занимали следующие позиции THD $[X Y Z]_{GSE} = [12.703 -3.016 2.185]R_E$; TNE $[X Y Z]_{GSE} = [12.438 -3.012 2.373]R_E$. Заметим, что по оси Y спутники находились примерно на одном расстоянии от линии Солнце–Земля. Поэтому скорости распространения фронтов межпланетной и головной ударных волн, рассчитанные далее по времени запаздывания сигнала на спутнике TNE, можно считать X-компонентами скорости в системе GSE.

Перед тем, как спутники TNE и THD зафиксировали прохождения МУВ, скорость ионов по направлению к Земле составляла ~ 50 км/с, что примерно в 5 раз меньше V_x -компоненты скорости солнечного ветра на спутнике WIND (рис. 1*a*). Значительное уменьшение скорости ветра в переходной области согласуется, в целом, с результатами измерений других авторов и результатами численного моделирования, и объяснимо с физической точки зрения: вблизи линии Солнце–Земля эта компонента скорости уменьшается из-за наличия препятствия в виде магнитосферы. Таким образом, малое значение скорости свидетельствует в пользу того, что спутники TNE и THD находятся в переходной области, как и предсказывает сервис 4D Orbit Viewer.

Оба спутника сдвинуты от линии Солнце–Земля на утреннюю сторону. Согласно работе [Safargaleev et al., 2002], распределение инициированных SI пульсаций в диапазоне единиц герц имеет максимум около 10 MLT, что косвенно указывает на то, что контакт фронта неоднородности с магнитопаузой статистически приходится на предполуденный временной сектор. С этой точки зрения, положение спутников нельзя считать неудачным.

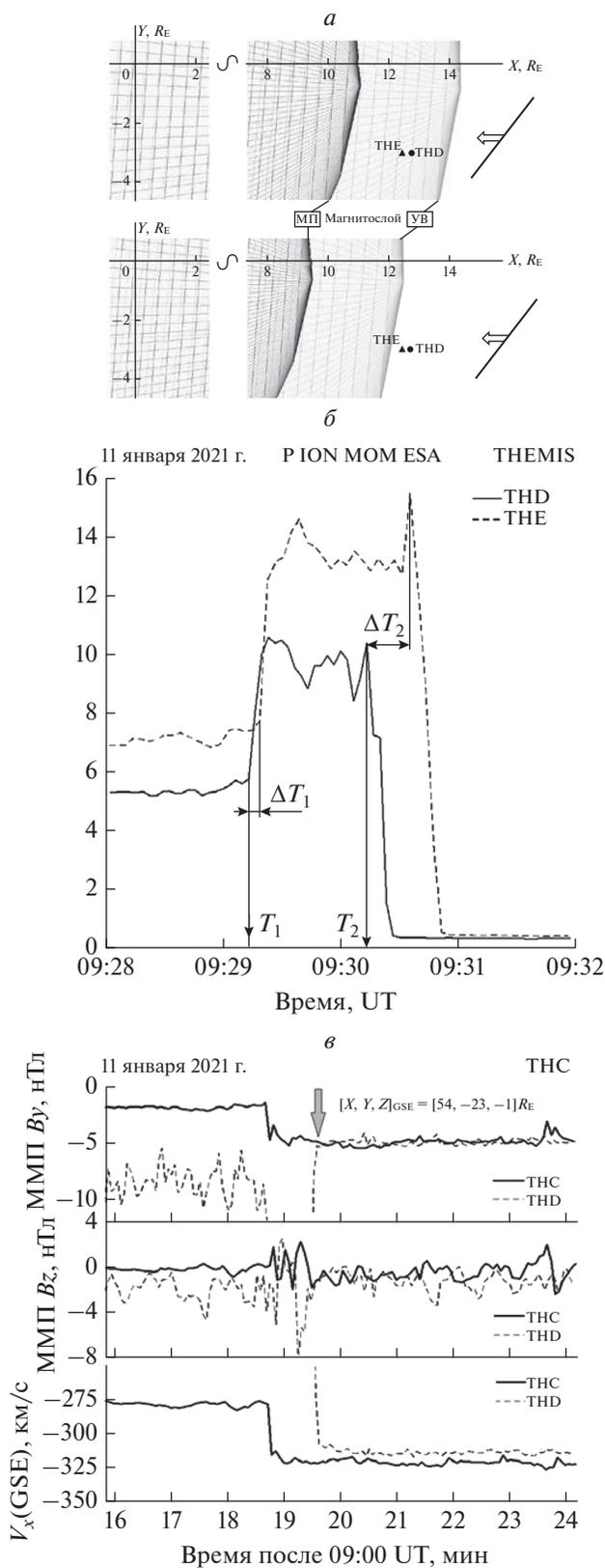


Рис. 3. (а) Положение спутников THEMIS относительно магнитопаузы и фронта ударной волны до (верхняя панель) и после (нижняя панель) прохода через спутники фронта SI. Примерная ориентация фронта показана жирной линией. (б) Вариация полного давления ионов на спутниках THEMIS, обусловленная прохождением через спутник фронта SI (момент T_1) и выходом спутников в солнечный ветер (момент T_2). Пояснения в тексте. (в) Сравнение интенсивности параметров межпланетной среды на спутниках THC и THD. Для облегчения сравнения, вариации параметров на спутнике THD (штриховая кривая) сдвинуты по времени таким образом, чтобы совместить начало SI на THC и THD.

Фронт МУВ прошел через спутник ТНД в момент $T_1 = 09:29:13$ UT (вертикальная черная стрелка на рис. 3б). Спутник ТНЕ находится дальше от головной ударной волны, поэтому прохождение SI было зафиксировано на нем с запаздыванием $\Delta T_1 \sim 6$ с. При расстоянии между спутниками $\Delta X_{D,E} \sim 1700$ км, запаздывание в 6 с соответствует скорости распространения МУВ $V_{xSI} \sim 280$ км/с, что на 50 км/с меньше скорости SI на спутнике WIND (рис. 1а). То, что SI распространяется в переходной области медленнее, чем в солнечном ветре, отмечалось ранее в ряде работ, например, [Koval et al., 2006a].

Время распространения SI от спутника ТНД до магнитопаузы рассчитывается как $T_0 - T_1$ и составляет в нашем случае 72 с. Чтобы оценить время распространения SI через весь магнитослой, нужно оценить временную добавку, обусловленную распространением SI от фронта ударной волны до спутника ТНД. Хотя нам известна скорость SI в магнитослое, расстояние ТНД до фронта ударной волны остается неизвестным параметром. До момента подхода SI к головной ударной волне, сервис 4D Orbit Viewer предлагает следующую модельную оценку этого расстояния $\Delta X_{yB,D} \sim 1.2R_E \sim 7680$ км. При рассчитанной выше скорости распространения SI в магнитослое $V_{xSI} \sim 280$ км/с, искомая временная добавка составляет 27 с. Ниже мы оценим эту добавку иным образом.

На рисунке 3б в моменты времени $T_2 = 09:30:30$ UT (серая вертикальная стрелка) и $T_2 + \Delta T_2$ ($\Delta T_2 \sim 22$ с) давление на обоих спутниках быстро уменьшается и становится существенно меньше, чем до момента T_1 , когда оба спутника находились в магнитослое. Принимая во внимание схему на рис. 3а, мы полагаем, что ослабление давления обусловлено выходом спутников в солнечный ветер из-за смещения фронта головной ударной волны к Земле. На рисунке 3в сравниваются параметры межпланетной среды на спутнике ТНС, находящемся в солнечном ветре значительно ближе к головной ударной волне, чем спутник WIND. Здесь время, обозначенное на горизонтальной оси, относится к измерениям на спутнике ТНС (жирная кривая), изначально находившемся в солнечном ветре. Прохождение фронта МУВ через этот спутник зафиксировано в $\sim 09:19$ UT (примерно на 10 мин раньше, чем на ТНД). Для удобства сравнения, измерения на спутнике ТНД (штриховая линия) сдвинуты таким образом, чтобы совместить начало SI на обоих спутниках. Видно, что после момента времени, отмеченного серой стрелкой (\sim момент T_2 на рис. 3), исследуемые параметры среды (V_y и V_x) отличаются по величине гораздо меньше, чем до этого момента. Величина V_z на обоих спутниках испытывает вариации около нулевого значения. Так как спутник ТНС продолжает при этом оставаться

в солнечном ветре, мы полагаем, что после момента T_2 , ТНД и ТНЕ действительно оказались в солнечном ветре где-то перед фронтом головной ударной волны. Иначе говоря, в момент T_2 фронт головной ударной волны прошел сначала через спутник ТНД, а потом, с задержкой $\Delta T_2 \sim 22$ с, через спутник ТНЕ. К этому времени расстояние между спутниками $\Delta X_{D,E}$ практически не изменилось, так что скорость движения фронта головной ударной волны $V_{xVB} \sim 80$ км/с.

Для расчета положения подсолнечной точки головной ударной волны в он-лайн сервисе OMNI используется следующее выражение из работы [Farris and Russel, 1994]:

$$Rt = Rmp * [1.0 + 1.1 * ((2/3) * Mms^{**2} + 2) / ((8/3) * Mms^{**2} - 1)], \quad (1)$$

где Rt и Rmp расстояние от Земли до подсолнечной точки на головной ударной волне и магнитопаузы, соответственно, Mms — магнитозвуковое число Маха. Согласно этому выражению, положение ударной волны определяется положением магнитопаузы и параметрами набегающего потока солнечного ветра (второе слагаемое в квадратных скобках). В исследуемом случае база OMNI дает следующие значения параметра набегающего потока: $Mms = 6$ перед фронтом МУВ и $Mms = 6.5$ за фронтом МУВ. При этих значениях выражение (1) дает $Rt = Rmp * [1.0 + 0.307]$ перед фронтом МУВ и $Rt = Rmp * [1.0 + 0.303]$ за фронтом МУВ. Видно, что изменение положения подсолнечной точки на фронте головной ударной волны определяется преимущественно изменением положения магнитопаузы, в то время как изменение параметров солнечного ветра дают вклад только в третьем знаке после запятой. Для рассматриваемого случая это может означать, что заметное смещение ударной волны к Земле начнется вместе со смещением магнитопаузы, то есть в момент T_0 . Отметим, что это предположение не согласуется с результатами моделирования [Samsonov et al., 2006], показывающими, что фронт головной ударной волны начинает двигаться сразу же после взаимодействия с SI. Возможно, это имело место и в рассматриваемом случае, но смещение было вызвано вторым слагаемым в выражении (1) и, следовательно, было невелико до тех пор, пока не началось смещение магнитопаузы.

Учитывая вышесказанное, поправку на время распространения SI от фронта ударной волны до спутника ТНД можно оценить по следующей формуле:

$$\Delta t' = (T_2 - T_0 + 6 \text{ с}) / (V_{xVB} / V_{xSI}), \quad (2)$$

где $T_2 = 09:30:30$ UT — момент прохождения фронта головной ударной волны через ТНД (см. рис. 3б), $T_0 = 09:30:15$ UT — 6 с — момент удара SI по магнитопаузы (см. рис. 2, нижняя панель) с по-

правкой на время распространения SI внутри магнитосферы от магнитопаузы до области стимуляции высыпаний, $V_{xyb} \sim 80$ км/с – скорость фронта головной ударной волны, $V_{xSI} \sim 280$ км/с – скорость распространения SI в магнитослое. При приведенных выше значениях, поправка, рассчитанная по формуле (2), составляет 6 с, что примерно в два раза больше временного разрешения данных спутника THD и в 5 раз меньше, чем дает сервис 4D Orbit Viewer (через расстояние THD до фронта ударной волны).

Обобщим результаты раздела следующим образом. Мы оценили время распространения SI через магнитослой, T_{MC} . Это время составляет ~ 1 мин и складывается из времени распространения возмущения от фронта головной ударной волны до ближайшего к фронту спутника THD и далее от спутника до магнитопаузы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [Samsonov et al., 2006], без указания источника информации, указано, что время распространения МУВ через подсолнечную область магнитослоя составляет примерно одну минуту, что согласуется с нашей оценкой. При этом не понятно, о каких исследованиях – модельных расчетах или спутниковых измерениях – идет речь. В работе [Villante et al., 2004] было исследовано 20 случаев SI по схожему с нашим методу. Время распространения SI через переходную область составило 3–4 мин. Столь заметное расхождение с нашей оценкой обусловлено, вероятнее всего, следующими двумя факторами. (1) Момент прихода МУВ к ударной волне рассчитывался исходя из измерений на удаленном спутнике WIND, в то время как в исследованной нами ситуации спутник THD находился в непосредственной близости от головной ударной волны. (2) В качестве первого наземного отклика на SI в работе [Villante et al., 2004] принимались геомагнитные пульсации, являющиеся, по мнению авторов, ионосферным признаком волн на магнитопаузе. В нашем случае первым наземным признаком удара по магнитопаузе были реакция ионосферных токов на инициированные SI высыпания – предварительный импульс, и связанный с ним по времени всплеск активности в УНЧ-диапазоне. Оба признака имеют отчетливые начала, временное разрешение данных высокое (частота опроса индукционных магнитометров составляет 40 Гц), скорость высыпающихся частиц во много раз больше скорости волн, что не требует учета времени распространения волны вдоль геомагнитной силовой линии от области взаимодействия до наземного наблюдателя.

Из рисунка 3в видно, что на фронте МУВ в солнечном ветре (данные спутника TNS на средней панели) Bz -компонента ММП менялась не-

значительно, причем в сторону положительных значений. Это означает, что полученную в работе оценку нельзя использовать для изучения отклика магнитосферы на такую геоэффективную вариацию солнечного ветра, как резкий поворот Bz на юг. Согласно модельным расчетам [Samsonov et al., 2017], время прохождения возмущения в виде смены ориентации Bz через магнитослой составляет 14 мин.

Полученные нами оценки позволяют оценить протяженность магнитослоя вдоль линии, на которой расположены спутники THD и TNE. МГД-модель [Koval et al., 2005] предполагает, что скорость распространения фронта возмущения в магнитослое уменьшается от головной ударной волны к магнитопаузе, однако авторы не смогли подтвердить это экспериментально. Предположим, что $V_{xSI} \sim 280$ км/с является постоянной величиной. Для значения времени распространения SI через переходную область, $T_{MC} \sim 1$ мин, получим толщину этой области ~ 16800 км ($\sim 2.6R_E$). В предположении равнозамедленного движения фронта SI, когда у магнитопаузы $V_{xSI} \sim 0$ км/с, получим толщину слоя $3.9R_E$. Отметим, что сервис 4D Orbit Viewer дает для этого параметра промежуточную величину $3.4R_E$.

Удачное расположение спутников THD и TNE не только относительно друг друга, но и по отношению к фронту головной ударной волны, позволило оценить скорость смещения фронта по направлению к Земле. В предположении, что фронт смещается не в результате непосредственного воздействия на него скачка давления, а следует смещению магнитопаузы, эта скорость составила $V_{xyb} \sim 80$ км/с.

Привлечение к анализу (а именно, к определению момента удара SI по магнитопаузе) данных среднеширотного индукционного магнитометра ИЗМИРАН показало, что область применения данного метода не ограничивается участком авроральной зоны вблизи сети IMAGE. Отметим также работу [Пархомов и др., 2018], где отмечается, что инициированный SI всплеск в диапазоне единиц герц может быть зарегистрирован и на станциях, находящихся в момент удара в вечернем секторе.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Время распространения возмущения солнечного через переходную область между фронтом ударной волны и дневной магнитопаузой является важным параметром для исследований солнечно-земных связей. Традиционно это время оценивается путем численного моделирования. Принимая во внимание слабую изученность переходной области, к результатам моделирования следует относиться с осторожностью и, при воз-

возможности, провести экспериментальную проверку по реальным измерениям, что и было сделано в данной работе.

В работе проанализирован уникальный случай, когда во время скачка давления солнечного ветра (SI) у подсолнечной точки ударной волны находились два спутника THEMIS, а удачное расположение наземной магнитометрической аппаратуры позволило определить момент удара фронта неоднородности по методике, ранее предложенной в работе [Safargaleev et al., 2010]. Время распространения SI в магнитослое составило для рассматриваемого события ~1 мин, что согласуется с модельными расчетами, но оказывается в 2–3 раза меньше, чем оценка, сделанная ранее [Villante et al., 2004], также с привлечением данных наземных наблюдений. Определена скорость распространения SI в магнитослое (~280 км/с) и скорость смещения к Земле фронта ударной волны (~80 км/с). Сделана оценка толщины переходной области (2.6–3.9 R_E).

БЛАГОДАРНОСТИ

Данные спутников THEMIS и WIND взяты из базы данных CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>). Провайдеры данных THEMIS V. Angelopoulos, U. Auster, K.H. Glassmeier, W. Baumjohann C.W. Carlson и J. McFadden (UCB, TUBS, IWF, NASA NAS5-02099). Провайдер данных WIND K. Ogilvie (NASA GSFC). Мы благодарны FMI/GEO и другим институтам, которые поддерживают сеть магнитометров IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/www/index.php?>). Результаты, представленные в этой статье, основаны на данных, собранных в AVG. Мы благодарим Индийский институт геомагнетизма за поддержку его деятельности и INTERMAGNET за продвижение высоких стандартов практики магнитных обсерваторий (www.intermagnet.org). Он-лайн процедура 4D Orbit Viewer доступна по адресу (<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/tipsod/>). Геомагнитные координаты и местное время определялись он-лайн на сайте виртуальной обс. VITMO (https://cohoweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html). Спектрограммы индукционных магнитометров ПГИ размещены на сайте ПГИ (<http://aurora.pgia.ru:8071/?p=0>). Данные индукционных магнитометров предоставлены Ю.В. Федоренко (ПГИ) и П.Е. Терещенко (СПбФ ИЗМИРАН). ВС благодарит А.В. Сафаргалева (ООО ЛСР) за помощь в работе и штат обсерватории Ловозеро за самоотверженный труд по поддержке наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Гильельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 208 с. 1973.

– Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г., Торо Райта, Цэгмэд Б., Хомутов С.Ю., Пашинин А.Ю., Чиликин В.Э., Мочалов А.А. Два типа отклика магнитосферы в геомагнитных пульсациях PSc на взаимодействие с межпланетными ударными волнами // Солнечно-земная физика. Т. 4. № 3. С. 68–83. 2018. <https://doi.org/10.12737/szf-43201808>

– *Andréová K.* The study of instabilities in the solar wind and magnetosheath and their interaction with the Earth's magnetosphere // *Planetary and Space Science*. V. 57. P. 888–890. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.12.005>

– *Araki T.* Global structure of geomagnetic sudden commencements // *Planet. Space Sci.* V. 25. № 4. P. 373–384. 1977. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(77\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(77)90053-8)

– *Farris M.H., Russell C.T.* Determining the standoff distance of the bow shock: Mach number dependence and use of models // *J. Geophys. Res.* V. 99. № 9. P. 17681–17689. 1994. <https://doi.org/10.1029/94JA01020>

– *Farrugia C.J., Freeman M.P., Cowley W.H., Southwood D.J., Lockwood M., Etemadi H.* Pressure driven magnetopause motions and attendant response on the ground // *Planet. Space Sci.* V. 37. № 5. P. 589–607. 1989. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90099-8)

– *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *J. Geophys. Res.* V. 110. № 2. A02104. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004JA010649>

– *Koval A., Šafránková J., Němeček Z., Přeč L.* Deformation of interplanetary shock fronts in the magnetosheath // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. № 15. L15101. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005GL023009>

– *Koval A., Šafránková J., Němeček Z., Přeč L.* Propagation of interplanetary shocks through the solar wind and magnetosheath // *Advances in Space Research*. V. 38. № 3. P. 552–558. 2006a. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.023>

– *Koval A., Šafránková J., Němeček Z., Samsonov A.A., Přeč L., Richardson J. D., Hayosh M.* Interplanetary shock in the magnetosheath: Comparison of experimental data with MHD modeling // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. № 11. L11102. 2006b. <https://doi.org/10.1029/2006GL025707>

– *Newell P.T., Meng C.-I.* Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics // *Geophys. Res. Lett.* V. 19. № 6. P. 609–612. 1992. <https://doi.org/10.1029/92GL00404>

– *Ridley A.J.* Estimations of the uncertainty in timing the relationship between magnetospheric and solar wind processes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 62. № 9. P. 757–771. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00057-2)

– *Safargaleev V., Kozlovsky A., Honary F., Voronin A.* Geomagnetic disturbances on ground associated with particle precipitation during SC // *Ann. Geophys.* V. 28. № 1. P. 247–265. 2010. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-247-2010>

- *Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A., Vasilyev A.* Burst of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure // *Ann. Geophys.* V.20. № 11. P. 1751–1761. 2002.
<https://doi.org/10.5194/angeo-20-1751-2002>
- *Samsonov A.A., Nemeček Z., Šafránková J.* Numerical MHD modeling of propagation of interplanetary shock through the magnetosheath // *J. Geophys. Res.* V. 111. № 82. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011537>
- *Samsonov A.A., Sibeck D.G., Imber J.* MHD simulation for the interaction of an interplanetary shock with the Earth's magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 112. № 12. A12220. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012627>
- *Samsonov A.A., Sibeck D.G., Dmitrieva N.P., Semenov V.S.* What Happens Before a Southward IMF Turning Reaches the Magnetopause? // *Geophys. Res. Lett.* V. 44. № 18. P. 9159–9166. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017GL075020>
- *Shue J.-H., Chao J.K., Fu H.C., Russell C.T., Song P., Khurana K.K., Singer H.J.* A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape // *J. Geophys. Res.* V. 102. № 5. P. 9497–9511. 1997.
<https://doi.org/10.1029/97JA00196>
- *Villante U., Lepidi S., Francia P., Bruno T.* Some aspects of the interaction of interplanetary shocks with the Earth's magnetosphere: an estimate of the propagation time through the magnetosheath // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 66. № 5. P. 337–341. 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.01.003>
- *Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Nemecek Z., Safrankova J., Paularena K.I., Richardson J.D., Lepping R.P., Mukai T.* 2002. Multispacecraft measurements of plasma and magnetic field variations in the magnetosheath: comparison with Spreiter models and motion of the structures // *Planet. Space Sci.* V. 50. № 5–6. P. 601–612. 2002.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00039-9)