

УДК 523.9-337

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕЗАПНОГО НАЧАЛА МАГНИТНОЙ БУРИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С СЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2024 г. Ю. С. Загайнова¹, *, С. В. Громов¹, Л. И. Громова¹, В. Г. Файнштейн²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск, Россия

*e-mail: yuliazagaynova@mail.ru

Поступила в редакцию 19.12.2023 г.

После доработки 21.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

В работе мы представляем результаты исследования регистрации внезапного начала (SC) и главного импульса (MI) магнитной бури как функций географических координат магнитных обсерваторий и Всемирного времени, используя для анализа современные данные с секундным временным разрешением. Анализ проведен для двух событий, в которых межпланетная ударная волна, воздействующая на магнитосферу, связана с межпланетными корональными выбросами массы с источниками в разных полусферах Солнца. Предложен авторский подход к определению моментов времени регистрации SC и MI. Сделан вывод, что время регистрации SC и MI может отличаться на несколько секунд до более одной минуты на магнитных обсерваториях, расположенных на разных географических широтах и долготах. Для исследуемых событий на графиках регистрации SC и MI как функций географических координат магнитных обсерваторий и Всемирного времени обнаружены тренды, согласно которым, в среднем, чем выше широта станции, тем позже регистрируются SC и MI на станции.

DOI: 10.31857/S0016794024030034, EDN: SMZUVV

1. ВВЕДЕНИЕ

Воздействие на магнитосферу Земли межпланетных ударных волн (МУВ), связанных с корональными выбросами массы (КВМ), сопровождается большим разнообразием физических явлений от магнитопаузы и до поверхности Земли. Одним из наиболее ярких и интересных физических явлений, возникающих при этом, является внезапное возмущение магнитного поля, регистрируемое в околоземном пространстве и наземными магнитными обсерваториями. Изменение параметров возмущенной магнитосферы фиксируется сетью наземных магнитных обсерваторий, расположенных на различных географических широтах и долготах Земли, как изменения интенсивности горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля и характеризуется вариацией магнитного поля, получившей название Dst -индекс, использующийся как идентификатор магнитных бурь. Внезапное и резкое увеличение динамического давления на магнитопаузу (внешнюю границу магнитосферы) вслед-

ствие воздействия на нее МУВ является причиной резкого изменения интенсивности горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, которое происходит по всей поверхности Земли на всех рассматриваемых магнитных обсерваториях, в связи с чем, оно и получило название “внезапного начала” магнитной бури [Акасофу, Чепмен, 1975; Nishida, 1978].

Внезапное изменение магнитного поля Земли, которое сопровождается магнитной бурей, отождествляется по заметным изменением величины индексов геомагнитной активности Dst и Kp , обозначают SC (*sudden commencement*; см. Curto et al., 2007a) или в более ранних работах – SSC (*storm sudden commencement*). Однако магнитные бури малой интенсивности могут и не иметь четко выраженного внезапного начала. Регистрация отклика геомагнитного поля в результате воздействия МУВ на магнитосферу показала, что резкий скачок H -компоненты геомагнитного поля может быть как положительным, так и отрицательным. Внезапное отрицательное изменение со-

временем H -компоненты геомагнитного поля во время предварительной фазы магнитной бури наблюдается, например, на ночной стороне магнитосферы [Sun et al., 2011].

На основе отчетов магнитных обсерваторий по результатам морфологического осмотра их магнитограмм составляются предварительные списки времён регистрации внезапного начала магнитной бури SC каждой из обсерваторий. Окончательное время внезапного начала магнитной бури определяют в формате “часы:минуты” на основе визуального осмотра магнитограмм с 1-мин временным разрешением пяти низкоширотных (приэкваториальных) магнитных обсерваторий, например, – Honolulu (сокращенно – HON), San Juan (SJG), Tamanrasset (TAM), Alibag (ABG), Kanoya (KNY) (см. сайт https://isgi.unistra.fr/events_sc.php международной службы геомагнитных индексов – *International Service of Geomagnetic Indices*, созданной МАГА – Международной Ассоциацией Геомагнетизма и Аэронауки).

На протяжении десятилетий создавались и уточнялись списки SC. Так, например, был составлен и проанализирован список SC за 100 лет [Mayaud, 1975]. Отметим также создание международной службы SRMV (*International Service of Rapid Magnetic Variations*), составившей, в частности, наиболее точные списки SC-событий [Curto, et al., 2007a].

Именно благодаря систематическим наблюдениям SC-событий удалось установить, что внезапное изменение во времени H -компоненты геомагнитного поля во время предварительной фазы магнитной бури имеет глобальный характер. Отклик на воздействие МУВ на магнитосферу в той или иной степени проявляется во всей магнитосфере, в том числе, и на всей поверхности Земли. В работе [Araki, 1994] была предложена физическая модель, которая может объяснить глобальную структуру геомагнитного внезапного начала SC. Lam and Rodger [2001] на примере одного события 22 ноября 1997 г. протестировали физическую модель SC, предложенную в работе [Araki, 1994], и пришли к выводу, что эта модель неплохо согласуется с наблюдениями на высоких широтах, и хуже – на низких широтах.

При анализе данных с минутным временным разрешением ограничиваются определением момента регистрации SC в виде внезапного роста горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, которое на магнитограммах различимо в виде ступеньки. По этой причине на магнитограммах с 1-мин временным разрешением момент регистрации SC определяется однозначно и отражается в виде резкого скачка в индексе гео-

магнитной бури $SYM-H$, который соответствует одноминутному аналогу индекса Dst . В действительности, по данным с более высоким, чем 1 минута, временным разрешением, изменение геомагнитного поля происходит не мгновенно: горизонтальная H -компонента магнитного поля достигает максимального значения за некоторое время, т.е. не в виде ступеньки, и имеет заметные суточные вариации [Акасофу, Чепмен, 1975]. Кроме этого, при анализе данных, например, с 1-с (секундным) временным разрешением необходимо уже учитывать особенности, так называемой, “тонкой структуры SC”, поскольку в этом случае SC во времени характеризуется уже как процесс конечной длительности (горизонтальная H -компонента геомагнитного поля часто нарастает по экспоненциальному закону в течение определенного промежутка времени) с четко различимыми структурными элементами. Если нанести на один график данные с 1-мин и 1-с временным разрешением одной магнитной обсерватории, то становятся видно, что они отличаются.

Так, на рис. 1 для сравнения показаны примеры вариации магнитного поля на низкоширотной обсерватории HON для SC-событий от 22 июня 2015 г. в 18:33 UT и 16 июля 2017 г. в 05:59 UT, построенные по минутным и секундным данным. Для построения зависимости интенсивности H -компоненты поля от времени был выделен временной интервал в пределах $\sim \pm 15$ минут от общепринятого времени начала SC в 18:33 UT и 05:59 UT для

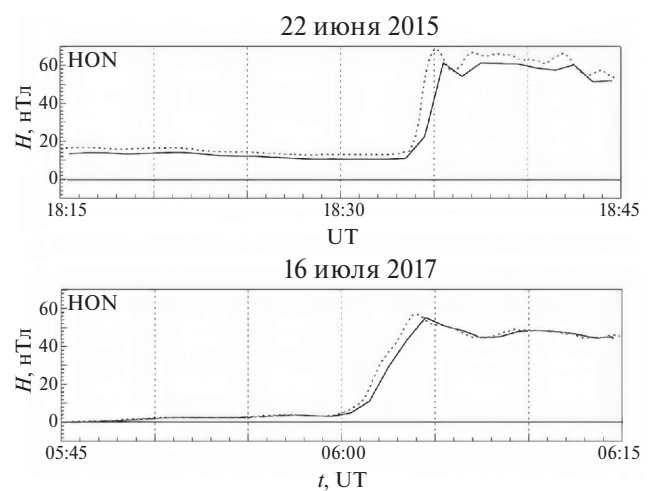


Рис. 1. Примеры данных наблюдений H -компоненты геомагнитного поля на низкоширотной станции Голулу (HON) с минутным (тонкая сплошная линия) и секундным (пунктирная линия) разрешением для оценки начала SSC: на верхней панели – для события от 22 июня 2015 г. в 18:33 UT, на нижней панели – 16 июля 2017 г. в 05:59 UT.

рассматриваемых событий, соответственно. На графиках заметны отличия зависимостей интенсивности H -компоненты поля от времени по данным с разным временным разрешением, т.е. и моменты регистрации SC могут различаться при анализе данных с разным временным разрешением.

К основным элементам тонкой структуры SC относят уже упоминавшийся резкий скачок горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, называемый главным импульсом MI (*main impulse*), выяснение свойств и физической природы которого по многим причинам имеет важное значение. Во-первых, MI является конечным звеном в цепочке физических процессов в магнитосфере вследствие воздействия на нее МУВ. Следовательно, MI могут использоваться для выяснения деталей и физики этих процессов. Во-вторых, MI может быть причиной геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), нарушающих работу наземного электрического энергооборудования. Так, например, разрушение трансформатора энергосистемы Новой Зеландии совпало с SC [Beland, Small, 2004]. Для случаев анализа данных, например, высокоширотных магнитных станций и/или на полуденной линии, MI предшествует импульс поля обратного знака, который называется предварительным обратным импульсом и обозначается PRI (*preliminary recovery impulse*) или PI. В более ранних работах для предварительного обратного импульса было принято обозначение SSC*. В некоторых работах в тонкую структуру SC включают также колебания в диапазоне частот до нескольких герц, которые могут предшествовать PI и MI [Parkhomov, 1985; Пархомов и др., 2017].

Nishimura et al. [2016] проанализировали эволюцию токовой системы в магнитосфере в период воздействия на магнитосферу импульса давления солнечного ветра, опираясь на магнитометрические наблюдения и наблюдения северного сияния. Сделан вывод, что основной импульс MI вызван крупномасштабными вихревыми токовыми системами в ионосфере, которые образованы ионосферными токами, текущими по/против часовой стрелки на утренней/вечерней стороне. Эти токи, в свою очередь, образованы нестационарными продольными токами, втекающими в ионосферу на утренней освещенной Солнцем стороне Земли и вытекающими из нее на вечерней. Сделан вывод, что более слабый предварительный импульс PI обусловлен двух-вихревым ионосферным током, создаваемым продольными токами, один из ко-

торых течет в ионосферу на вечерней стороне, другой – вверх из нее – на утренней стороне.

Достаточно полно физический механизм генерации основного импульса MI был установлен с использованием численных расчетов [см. Samsonov et al., 2010; Sun et al., 2015 и цитируемую там литературу]. В работе [Sun et al., 2015] на основе глобального МГД моделирования связь между изменением MI, регистрируемым наземными магнитными станциями, и откликом магнитосферы на воздействие МУВ описывают следующим образом: возмущения скорости вблизи флангов магнитопаузы вызывают уменьшение магнитного поля, в результате чего возникает динамо, которое усиливает транзитные продольные токи. Эти токи дополнительно генерируют пару вихрей ионосферного тока, что приводит к вариациям MI, наблюдаемым на Земле.

Однако измеряемое на магнитной обсерватории время начала MI на магнитограммах не является моментом регистрации SC. Регистрируемое во время начала MI магнитное поле является комбинацией уже сформировавшихся полей от различных токовых систем на этапе резкого возмущения магнитосферы. Для точного определения момента регистрации SC на конкретно взятой станции необходимо определить момент времени начала плавного увеличения амплитуды геомагнитного поля до измеряемого значения, соответствующего началу MI. В итоге, время регистрации дошедшего геомагнитного возмущения до каждой из магнитных обсерваторий может различаться. Это обуславливает зависимость времени регистрации SC (или SC*) от геомагнитной широты, описанные еще в ранних публикациях на эту тему [Акасофу, Чепмен, 1975].

В настоящей работе мы сопоставляем регистрацию отдельно как SC, так и MI в виде функций географических координат магнитных обсерваторий и Всемирного времени. Вопрос одновременности регистрации SC-событий разными геомагнитными станциями на Земле рассматривался во многих работах. Так, например, этому вопросу в монографии [Акасофу, Чепмен, 1975] уделено особое внимание. Отмечено, что несколькими исследователями был сделан вывод, что начало регистрации SC происходит на несколько минут раньше в высоких широтах по сравнению с низкими (см. также [Sato, 1961; Williams, 1960; Wilson and Sugiura, 1961; Yamamoto and Maeda, 1960]).

Высказывались разные причины, почему SC регистрируется разными обсерваториями неодновременно. Во-первых, оценка моментов регистрации SC разными станциями в течение дли-

тельного времени производилась с большой погрешностью. В частности, было показано, что распределение времен внезапных начал не может быть найдено точно на низких широтах [Gerard, 1959]. В целом погрешность оценки одновременности регистрации SC разными станциями в значительной степени была обусловлена недостаточным временным разрешением измерения вариаций геомагнитного поля (примерно 1 мин), погрешности привязки данных к Всемирному времени (UT) (*universal time*) и определения момента резкого начала возрастания геомагнитного поля. Кроме возможных инструментальных погрешностей, в том числе, связанных с привязкой к UT, которые устранены при современном уровне наблюдений, было выдвинуто предположение, что одна из причин – степень одновременности регистрации SC разными обсерваториями зависит от ориентации МУВ в пространстве [Wang et al., 2006; Selvakumaran et al., 2017]. Проводя анализ наблюдений магнитных обсерваторий на предмет выявления первых станций, реагирующих на приход МУВ (т.е., находя их местоположение относительно земного экватора), необходимо также учитывать склонение Солнца.

В настоящее время вариации геомагнитного поля на многих магнитных обсерваториях измеряются с 1-с разрешением с исключением инструментальных погрешностей, которые были присущи данным наблюдений прошлых десятилетий. Это создало основу для проведения более точного сравнительного анализа свойств SC, зарегистрированных на разных обсерваториях. Цель данной работы: с использованием современных данных с 1-с временным разрешением перепроверить зависимость моментов регистрации SC от широты/долготы с более надежной привязкой к UT, чем это делалось во время первых исследований магнитных бурь с внезапным началом. Оценена степень неодновременности регистрации начала SC на геомагнитных станциях, расположенных на различных широтах и долготах на Земле. Мы предполагаем, что полученные при этом сведения могут быть использованы для уточнения современных механизмов генерации внезапного начала геомагнитной бури. В этой работе мы также рассматриваем вопрос, как возникновение КВМ с источниками в разных полусферах Солнца отражается на моменте регистрации SC на разных станциях в зависимости от их географических координат и UT. Кроме того, проверяется предположение, что КВМ с источниками формирования в разных полусферах Солнца обеспечат воздействие на магнитосферу

связанных с ними МУВ, распространяющихся под разными углами к линии “Солнце – Земля”.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

По данным каталога межпланетных КВМ (МКВМ) “List of Richardson/Cane ICMEs” (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) были отобраны два SC-события, в которых МУВ, воздействующая на магнитосферу, связана с достигшим орбиты Земли МКВМ, отождествленным вблизи Солнца с КВМ по данным наблюдений коронографов LASCO C2 и C3 [Brueckner et al., 1995] на борту космического аппарата SOHO [Domingo, Fleck and Poland, 1995].

Дополнительно по данным каталога “SOHO/LASCO HALO CME catalog” (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/) отобраны МКВМ отождествлены с КВМ типа “гало” с источниками в разных полусферах Солнца (Северной и Южной) на относительно небольших удалениях от солнечного экватора и от центра солнечного диска (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/), для которых линейная проекционная скорость больше 1200 км/с. Такие КВМ с большей вероятностью могут достичь Земли и во многих случаях связаны с ударной волной уже вблизи Солнца. Мы проверили наличие МУВ перед МКВМ по данным каталога межпланетных ударных волн “ACE Lists of Disturbances and Transients” (http://www.ssg.sr.unh.edu/mag/ace/ACELists/obs_list.html) и данных OMNIWeb Service (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) с минутным разрешением, где МУВ выделяется как резкий скачок основных магнитогидродинамических параметров солнечного ветра: плотности, температуры и направленной скорости плазмы, а также межпланетного магнитного поля [Hundhausen, 1972].

Приведем сведения об отобранных для анализа КВМ. КВМ-1 впервые наблюдался в поле зрения коронографа LASCO C2 21 июня 2015 в 02:36 UT. Его источник располагался в Северном полушарии Солнца и имел координаты N12E16 (фактически, это координаты связанной с КВМ солнечной вспышки), здесь N и E обозначают северную широту и восточную долготу источника КВМ. Линейная проекционная скорость КВМ в плоскости неба коронографов LASCO составила $V_{lin} = 1366$ км/с, полученная из расчетов скорость КВМ в трехмерном пространстве $V_{3D} = 1740$ км/с. Подробно об определении параметров КВМ, приведенных в каталоге гало КВМ по данным LASCO, см. в [Gopalswamy et al., 2010]. Скорость исследуемого межпланетного КВМ на орбите Земли $V_{МКВМ} = 610$ км/с. Гало КВМ-2 впервые был зарегистрирован коронографом LASCO C2

14 июля 2017 в 01:25 UT. Этот КВМ возник в Южном полушарии Солнца, координаты источника КВМ S06W29 (здесь S и W обозначают южную широту и западную долготу), линейная проекционная скорость $V_{lin} = 1200$ км/с в поле зрения коронографов LASCO, $V_{3D} = 1422$ км/с, скорость межпланетного КВМ на орбите Земли $V_{МКВМ} = 520$ км/с.

Добавим, что для анализа мы специально отобрали SC-события, при наблюдении которых на Земле склонение Солнца принимало близкие значения. Так, для SC-события от 22 июня 2015 г. склонение Солнца составило $\delta = 23.429^\circ$, а для события от 16 июля 2017 г. — $\delta = 21.249^\circ$. Это позволяет исключить вклад угла наклона линии “Солнце–Земля” к плоскости земного экватора на этапе интерпретации результатов анализа данных.

Согласно каталогу SC, представляемому уже упомянутой международной службой геомагнитных индексов ISGI, при взаимодействии с магнитосферой Земли МУВ, связанных с отобранными МКВМ, были зарегистрированы SC-события от 22 июня 2015 г. в 18:33 UT и 16 июля 2017 г. в 05:59 UT. Кроме этого мы использовали информацию о времени регистрации МУВ, МКВМ, границы области ударно-сжатой плазмы за фронтом ударной волны (SHEATH) и передней границы магнитного облака (MC) из каталога [Ермолаев и др., 2009], находящегося в свободном доступе на сайте (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>). Дополнительно использовали данные Гарвардско-Смитсоновского центра по астрофизике, приведенные на сайте (www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data), об ориентации нормали к фронту МУВ относительно линии “Солнце–Земля”. Для одного из исследуемых нами SC-событий от 22 июня 2015 г. указано, что нормаль к фронту МУВ имеет малый угол наклона к линии “Солнце–Земля”: средние углы $\theta = -4.901^\circ$, $\varphi = 186.201^\circ$. В данном случае ориентация нормали к фронту МУВ почти совпадает с направлением “Солнце–Земля”. При этом распространение МКВМ осуществлялось, преимущественно, в Северной части гелиосферы, что согласуется с информацией об источнике формирования КВМ в Северном полушарии Солнца недалеко от солнечного экватора. Для события от 16 июля 2017 г. такой информации на сайте Гарвардско-Смитсоновского центра не приводится. Однако, поскольку источник формирования КВМ, связанного с исследуемым SC-событием, находился вблизи экватора в Южном полушарии Солнца, то, по аналогии с событием от 22 июня 2015 г. и согласно результатам работы [Fainshtein, Ivanov, 2010] об отклонении траектории движения КВМ

к солнечному экватору, можно предположить, что нормаль к фронту МУВ в этом случае также имела малый угол наклона к линии “Солнце–Земля”, но со стороны Южной части гелиосферы.

Дополнительную информацию об исследуемых в работе SC-событиях мы находили по магнитным данным с высокочувствительных магнитометров с 1мин и 1с временным разрешением, предоставляемых сетью INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>). Регистрация SC определяется по резкому увеличению горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, которое происходит на всей Земле и регистрируется всеми наземными магнитными обсерваториями, зарегистрированными в сети INTERMAGNET. При этом нарастание геомагнитного поля начинается внезапно, но время возрастания величины поля может отличаться и зависит от местного времени наблюдения, его амплитуда также может быть различной и зависит от условий в солнечном ветре [Акасофу, Чепмен, 1975]. Информация по времени регистрации SC усредняется по данным приэкваториальных магнитных станций и фиксируется в каталоге SC сети INTERMAGNET в формате “часы:минуты” UT.

Отметим, что в сети INTERMAGNET всего используются данные от 154 магнитных станций, проводящих наблюдения с 1-мин временным разрешением, однако для каждого SC-события доступно разное их количество. Кроме этого часть магнитных станций из этого списка предоставляют 1-с данные, общее число которых также различно для каждого отдельно рассматриваемого SC-события. Так, например, для события от 16 июля 2017 г. данные с 1-мин временным разрешением в сети INTERMAGNET есть для 132 магнитных станций, а 1-с данные предоставляют только 68 магнитных станций: PAF, BOX, WIC, SBA, BDV, TAM, HLP, UPS, HER, STA, KNY, NUR, HRN, PEG, PHU, GUA, MBO, DLT, LYC, KOU, AMS, LRM, CYG, ASP, KAK, BSL, MAW, MMB, PPT, CKI, GNG, LZH, HBK, HON, BEL, DRV, FRD, SJG, BRD, BOU, API, FRN, CZT, EBR, OTT, TUC, VIC, KDU, IPM, STJ, MEA, NEW, FCC, IQA, BLC, CSY, CNB, CBV, EYR, MCQ, YKC, AVK, SIT, BRW, RES, CMO, CLF, DED. Для события от 22 июня 2015 г. данные с 1-с временным разрешением предоставляют только 56 магнитных станций: KOU, TAM, GUA, SJG, API, FCC, HON, NUR, UPS, CLF, CYG, PEG, KNY, PAF, AMS, MMB, PPT, KDU, FRD, EYR, BEL, LRM, OTT, BDV, ASP, STJ, KAK, TUC, MCQ, STA, BOU, CZT, IPM, GNG, EBR, CNB, NEW, FRN, MEA, HLP, DRV, YKC, SIT, MAW, BLC,

ABK, HRN, CBV, LYC, SBA, SHU, DED, CMO, BRW, IQA, RES.

Для двух отобранных нами для анализа SC-событий мы обработали общедоступные в сети INTERMAGNET данные магнитных обсерваторий как Северного, так и Южного полушарий Земли с секундным временным разрешением. В процессе анализа данные с секундным временным разрешением сопоставлялись с данными с минутным временным разрешением. Для каждого исследуемого SC-события из данных наблюдений H -компоненты геомагнитного поля для магнитной станции, для которой доступны 1-мин и 1-с данные, выделялся временной диапазон в пределах ± 5 мин от момента регистрации SC, определенного по 1 мин данным. Напомним, для события от 22 июня 2015 г. за время начала SC принято время в 18:33 UT, а для события от 16 июля 2017 г. – 05:59 UT. Исследуемые SC-события связаны с геомагнитными бурями класса G4 и G2, соответственно. В качестве примера на рис. 1 показаны вариации магнитного поля на низкоширотной обс. Гонолулу (HON) для двух отобранных SC-событий от 22 июня 2015 г. и 16 июля 2017 г., построенные по минутным и по секундным данным. Такая же обработка была выполнена для каждой магнитной обсерватории, где доступны данные с секундным временным разрешением для отобранных нами SC-событий. Далее в работе проводился анализ только 1-с данных наблюдений выделенного временного диапазона для каждой магнитной обсерватории.

Ниже обсуждается, как начало регистрации SC и MI зависят от географической широты и долготы магнитных станций. Для этого по 1-с данным наблюдений вариаций H -компоненты геомагнитного поля от UT мы определяли время начала регистрации SC и MI. Значения географической широты и долготы магнитных станций доступны в сети INTERMAGNET. Отрицательные значения широты φ присвоили данным наблюдений станций Южного полушария Земли, положительные значения – Северного полушария Земли. Дополнительно нас интересовало, насколько далеко каждая из станций отстоит от “полуденной долготы”, т.е. географической долготы на освещенном Солнцем полушарии Земли, где в момент начала SC наблюдался полдень. Используя значения географической долготы каждой станции и время начала SC в UT, определялась долгота λ положения магнитной станции относительно “полуденной долготы”, на которой в момент прихода к Земле МКВМ наблюдался полдень по местному времени $t = 12:00$ LT. Так, если станция располагалась на момент начала SC

на “полуденной долготы”, то $\lambda = 0^\circ$. При этом, если станция находилась восточнее “полуденной долготы”, то λ принимает значения $(-180^\circ; 0^\circ)$, где значения $\lambda = (-180^\circ; -90^\circ)$ соответствуют положению станции на неосвещенной Солнцем полушарии Земли. Соответственно, если магнитная станция на момент начала SC расположена западнее “полуденной долготы”, то $\lambda = (0^\circ; 180^\circ)$, где значения $\lambda = (90^\circ; 180^\circ)$ также следует относить к станциям, расположенным на ночной стороне Земли.

Поскольку в работе обсуждаются численные зависимости регистрации SC как функции географической широты/долготы и Всемирного времени, обсудим более подробно используемую нами методику определения времени начала регистрации SC и MI из данных наблюдений с 1-с временным разрешением H -компоненты геомагнитного поля $H(t)$ на примере анализа данных наблюдений $H(t)$ двух магнитных обсерваторий в SC-событии от 22 июня 2015 г. – Martin de Vivies Amsterdam Island (AMS) и Hornsund (HRN) (см. рис. 2 и рис. 3). Данные геомагнитных наблюдений станцией HRN в этом случае отличаются от AMS тем, что MI предшествует более слабое возмущение H -компоненты магнитного поля обратного знака, называемое предварительным импульсом PI.

Для определения моментов начала регистрации магнитными станциями SC и MI производилась предварительная нормировка данных $H(t)$. На первом ее этапе вычиталась фоновая составляющая. Для этого на исходных данных $H(t)$ выделялся диапазон значений в пределах ± 5 мин от

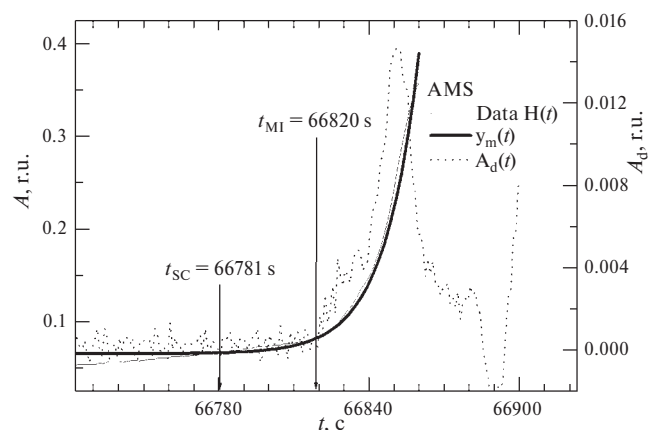


Рис. 2. Зависимость нормированной горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля $H_n(t)$, аппроксимирующей функции $y_m(t)$ и частной производной $A_d(t)$ от $H_n(t)$ от времени для станции AMS. Указаны моменты времени начала регистрации SC t_{SC} и MI t_{MI}

времени начала SC по данным с 1-мин разрешением. Затем на выделенном интервале времени до момента начала SC определялось минимальное значение, которое вычиталось из исходных данных. На следующем этапе выполнялась нормировка $H(t)$ на выделенном интервале в каждый момент времени t на максимальное значение H_{\max} . В некоторых случаях при высоком уровне шумов на выделенном интервале исходных данных $H(t)$ производилось их сглаживание методом скользящего среднего по трем точкам. Полученную в результате нормированную функцию обозначим $H_n(t)$. Определение моментов начала регистрации MI выполнялось по кривой численной производной времени от $H_n(t)$ после нормировки — $H_d(t)$. Время начала регистрации MI t_{MI} мы определяли, как момент начала роста (или минимума) производной по времени $H_d(t)$ (см. рис. 2).

Начало регистрации SC магнитной обсерватории определялось как начало медленного роста значений горизонтальной H -компоненты магнитного поля Земли. Этот момент времени мы выбрали в качестве времени t_{SC} начала регистрации SC на магнитной станции. При этом начало регистрации SC находили как визуально, так и из анализа численных производных по времени $H_d(t)$. Для некоторых станций, где на временных масштабах $\sim \pm 2$ мин от момента начала MI нет четко выраженных экстремумов и/или выраженных участков подъема/спада значений горизонтальной компоненты геомагнитного поля (эле-

ментов тонкой структуры SC), но при этом H -компонента поля отчетливо принимает минимальное значение, SC находили визуально как момент начала роста значений H -компоненты поля. Часто для отдельных станций между началом регистрации SC и MI располагался небольшой экстремум H -компоненты поля (для станции AMS на рис. 2 этот экстремум выражен очень слабо). В таком случае начало регистрации SC определяли по минимуму $H_d(t)$. В том случае, когда t_{SC} визуально или путем анализа $H_d(t)$ однозначно выделить не удавалось, мы аппроксимировали $H_n(t)$ на малых временных масштабах $\pm(1-2)$ мин от момента начала MI аналитическими экспоненциальными функциями вида $y_m(t) = y_0 + A \cdot \exp((t-t_0)/\tau)$. Параметры аппроксимирующей функции подбирались так, чтобы обеспечить наилучшее согласие между поведением в зависимости от времени этой функции и измеряемой зависимости $H_n(t)$. Так, например, для станции AMS (жирная линия на рис. 2) параметры $y_m(t)$ составили $y_0 = 0.067$, $A = 0.12946$, $x_0 = 66846$ с, $\tau = 13$ с, при этом коэффициент корреляции составил $r^2 = 0.42$. На рис. 2 видно, что в момент времени $t < t_{MI}$ функция $y_m(t)$ пересекает $H_n(t)$. Это время мы определили как начало регистрации SC на исследуемой магнитной станции.

Как было сказано выше, для некоторых магнитных обсерваторий (речь идет, прежде всего, о высокоширотных станциях) в исследуемых SC-событиях основному импульсу предшествовал предварительный обратный импульс PI. Рассмотрим пример такого события по данным наблюдений магнитной станции HRN (см. рис. 3). Момент времени t_{SC} на рис. 3 определен как начало небольшого роста $H_n(t)$ непосредственно перед началом резкого спада интенсивности горизонтальной H -компоненты поля. Момент начала регистрации PI находился по скачку производной $H_d(t)$. Момент начала регистрации MI магнитной станцией определен как момент начала последующего резкого нарастания значений $H_n(t)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 и рис. 5 показаны условия в межпланетном магнитном поле (ММП) и в солнечном ветре, а также геомагнитная активность на Земле, выраженная индексом $SYM-H$, связанная с появлением SC от 22 июня 2015 г. и 16 июля 2017 г., соответственно. Момент времени регистрации МУВ, а также области ударно-сжатой плазмы за фронтом ударной волны (SHEATH) и передняя граница магнитного облака (MC), отмеченные на рисунках стрелками, указаны согласно классификации событий в солнечном ветре в каталоге [Ермолаев и др., 2009]. MC для SC-события от 22 июня

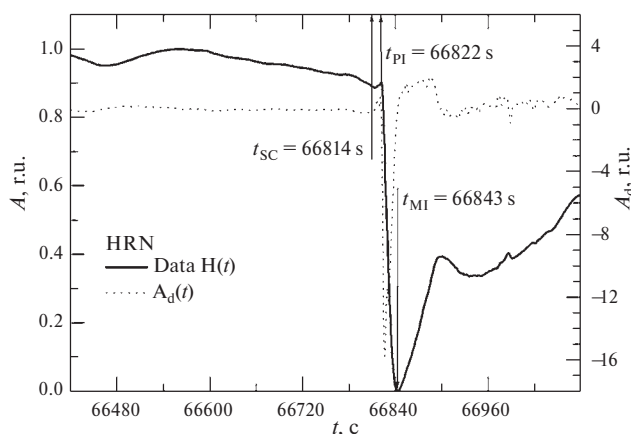


Рис. 3. Пример SC-события, включающего предварительный обратный импульс PI, по данным наблюдений магнитной обсерватории HRN. Приведена зависимость нормированной горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля $H_n(t)$ и частной производной $A_d(t)$ от $H_n(t)$. Указаны моменты времени начала регистрации SC t_{SC} , предварительного обратного импульса PI t_{PI} и главного импульса MI t_{MI} .

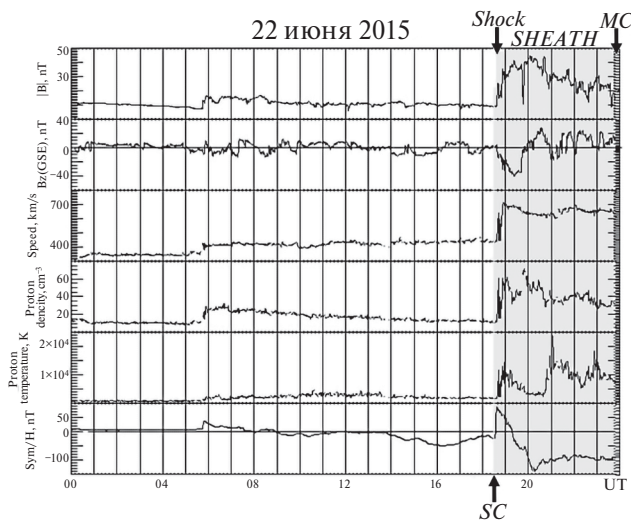


Рис. 4. Условия в межпланетном магнитном поле (ММП) и в солнечном ветре, а также геомагнитная активность на Земле для 22 июня 2015 г. Сверху вниз: вариации модуля поля $|B|$ и B_z (GSE) компоненты поля, солнечного ветра (скорости V , плотности N_p протонов, протонной температуры T) и индекса буревой активности на Земле SYM/H (одноминутного аналога индекса Dst). Стрелкой показан момент, когда наблюдались SSC (SI) вызванной приходом к Земле межпланетной ударной волны КВМ с источником формирования в Северном полушарии Солнца 21 июня 2015 г. 02:36 UT.

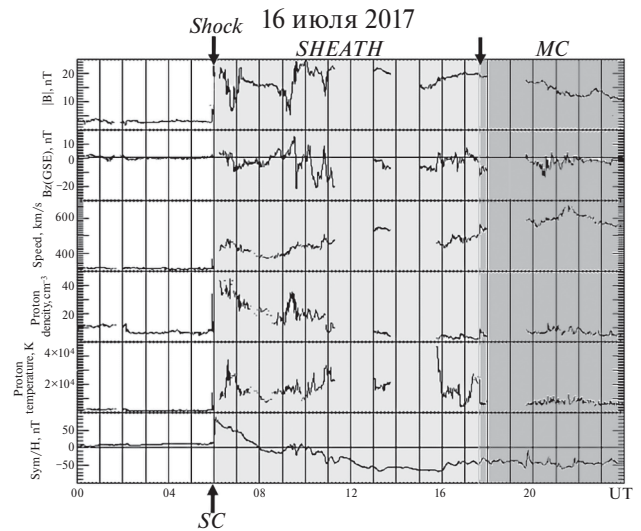


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для 16 июля 2017 г., когда на земной поверхности наблюдались SSC, вызванные приходом межпланетной ударной волны КВМ с источником формирования в Южном полушарии Солнца 14 июля 2017 г. в 01:25 UT.

2015 г. начинается с началом новых суток, поэтому на рис. 4 его передняя граница указана условно.

Внезапное начало бури SC отражено резким скачком в индексе буревой активности $SYM-H$ (см. панель $SYM-H$ на рис. 4 и рис. 5). Заметим, что в событии 22 июня 2015 г. примерно в 05:48 UT была зарегистрирована еще одна МУВ, которой соответствовало SC небольшой амплитуды и которое не сопровождалось заметным геомагнитным возмущением. МУВ, наблюдавшаяся в 05:48 UT, не связана ни с одним наблюдавшимся КВМ, который мог бы быть ее источником, поэтому в нашей работе это событие не рассматривалось.

В исследуемых случаях амплитуда индекса $SYM-H$ достигала $\sim 80-90$ нТл, что соответствует высокому уровню плотности солнечного ветра N_p за фронтом МУВ в первом случае близкому к 60 см^{-3} , а во втором — к 45 см^{-3} . Отметим, что в обоих случаях импульс динамического давления, связанный с МУВ, был обусловлен, главным образом, относительно сильным увеличением плотности на её фронте.

Для выбранных событий были проанализированы данные с 1-с временным разрешением для

58 станций для события от 22 июня 2015 г. и 68 станций для события от 16 июля 2017 г., представленные в сети INTERMAGNET. По этим данным для каждой обсерватории было определено время начала SC, PI (если PI был зарегистрирован) и MI. С использованием полученных данных построены графики регистрации SC и MI как функций и географических координат регистрирующих их станций и Всемирного времени.

Сравним особенности регистрации SC и MI, связанные с приходом МКВМ, с источниками формирования в Северном и Южном полушариях Солнца, на рисунках 6–9, где ϕ — геомагнитная широта станции, λ — геомагнитная долгота, пересчитанная относительно “полуденной” долготы.

На рис. 6 для SC-события от 22 июня 2015 г. показана связь геомагнитной широты станции (a) и долготы λ (b) с моментами начала регистрации SC-события станциями, указанных на шкале UT. На рис. 7 аналогичные зависимости построены для моментов начала регистрации MI. На рисунках 8–9 показано тоже, что и на рисунках 6–7, но для SC-события от 16 июля 2017 г.

Во время SC-события от 22 июня 2015 г., инициированного в результате прихода к Земле МУВ, связанной с КВМ от 21 июня 2015 г. с источником в Северном полушарии Солнца, первой отреагировала станция в Северном полушарии Земли — Koukou (KOU, широта/долгота — $(5^\circ/307^\circ)$) в 18:32:50 UT, расположенная на момент наблю-

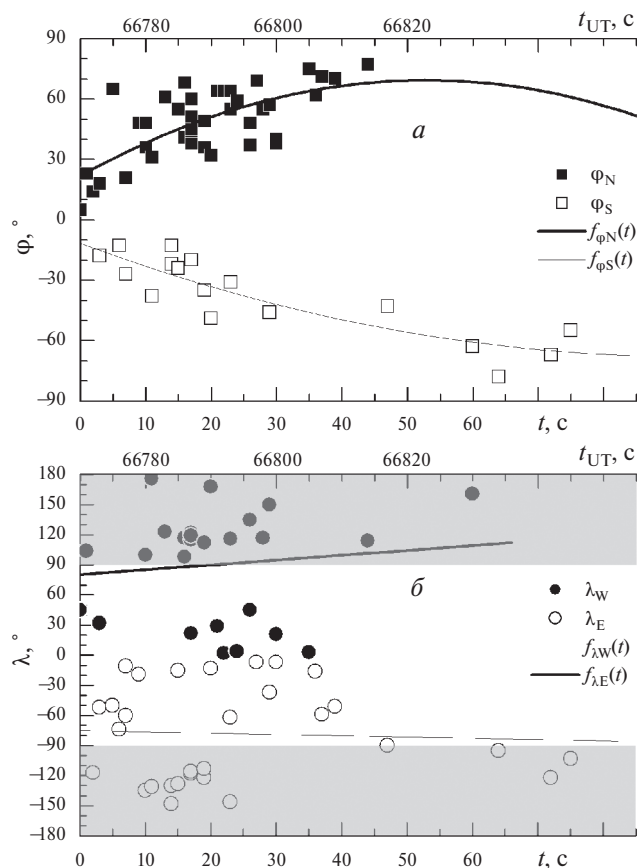


Рис. 6. Регистрация SC (а) – как функция географической широты φ и долготы относительной “полуденной линии” λ ; (б) – географической широты φ (а) – Всемирного времени (t – время в секундах, отсчитываемое от начала регистрации на первой станции из списка КОУ; t_{UT} – Всемирное время в секундах от начала сут) для события от 22 июня 2015 г. (КВМ от 21 июня 2015 г.). На панели (б) заштрихованы области значений λ , соответствующие станциям на ночной стороне Земли.

дения в долготном секторе $\Delta\lambda$ от 0° до 90° . Другими словами, геомагнитные возмущения в земной атмосфере, связанные с приходом МКВМ к Земле, начинаются на станциях низких широт на освещенной Солнцем стороне Земли. Заметим, что различные аспекты SC-события от 22 июня 2015 г. детально обсуждались также в работе [Пархомов и др., 2018].

На рис. 6а отчетливо различимы тренды на зависимостях географической широты станции от момента начала регистрации SC-события на станциях. При этом, чем больше широта станции, тем позднее, в среднем, на этой станции регистрируется SC. Линия регрессии для зависимости географической широты и времени отдельно для

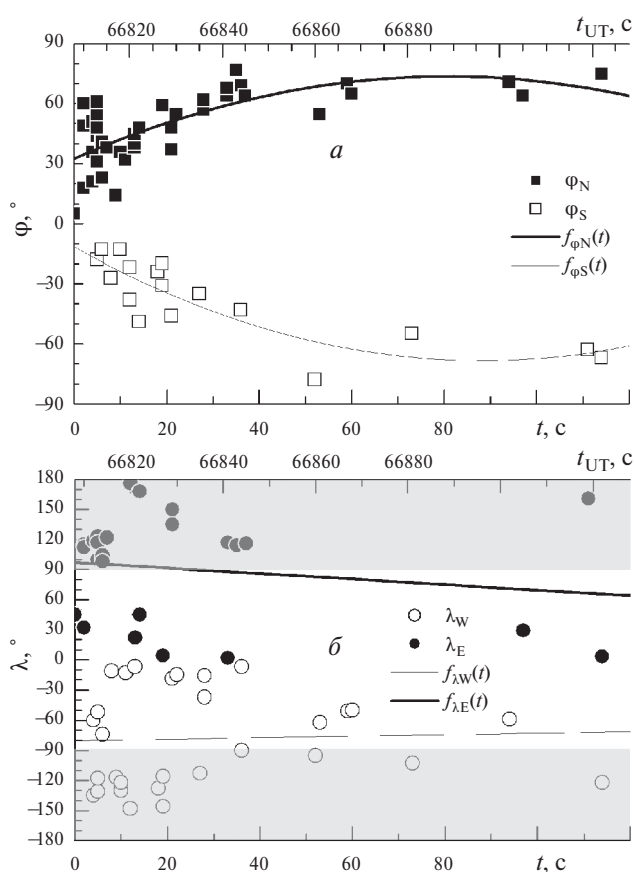


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для начала регистрации MI.

станций Северного полушария Земли принимает вид $f_{\varphi_N}(t) = -0.0171 \cdot t^2 + 1.8039 \cdot t + 21.862$ (коэффициент корреляции $r = 0.7$), для Южного полушария – $f_{\varphi_S}(t) = 0.0065 \cdot t^2 - 1.2055 \cdot t - 11.702$ (коэффициент корреляции $r = -0.88$). Этот результат противоречит результатам работ прошлых лет, где, например, утверждается, что SC регистрируется на несколько минут раньше в высоких широтах по сравнению с низкими (обсуждение этого факта и ссылки см. во Введении).

Тренды для зависимости разницы географической долготы станции от “полуденной” долготы со временем начала регистрации SC на станциях просматриваются слабо (см. рис. 6б). На рис. 6б показаны зависимости разницы между географической долготой станции и “полуденной” долготой f_λ от времени t ($f_\lambda(t)$). Видно, что зависимости $f_\lambda(t)$ менее монотонные, чем $f_\varphi(t)$. Зависимость $f_\lambda(t)$ для станций восточнее “полуденной линии” лучше всего удалось описать линией регрессии вида $f_{\lambda_E}(t) = -0.1283 \cdot t - 75.1274$ с коэффициентом корреляции $r = -0.05$,

а для станций западнее “полуденной долготы” – $f_{\lambda_W}(t) = 0.4821 \cdot t + 80.343$ (коэффициент корреляции $r = 0.11$) (см. рис. 6б). Единственно, что можно отметить по виду зависимостей $f_{\lambda}(t)$: после ~ 40 с начало момента регистрации SC на станции KOU геомагнитное возмущение регистрируется только на станциях на ночной стороне Земли.

Промежуток времени между регистрацией SC на первой и последней 56-ой станции из списка составил чуть более минуты $\Delta t_{SC} = 75$ с или 1 мин 15 с. От станции к станции промежуток времени между моментами начала регистрации SC изменяется от 0 до 13 с, в среднем составляет $\Delta T_{SC} \sim 1$ с. Промежуток времени между регистрацией возмущения на станции KOU, первой зарегистрировавшей SC, и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 10 с. Период времени между регистрацией SC на последней 56-ой станции Северного полушария Земли Resolute Bay (RES; географическая широта/долгота – $75^\circ/265^\circ$) из списка и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 65 с.

На рис. 7, где представлены графики регистрации MI как функции географических координат и времени, первой отреагировала на начало SC-события станция KOU в 18:33:28 UT Северного полушария Земли, находящаяся восточнее “полуденной линии”. Характер связи широты станций φ с началом регистрации MI (рис. 7а) несколько отличается от характера связи φ с началом регистрации SC. Тренд, согласно которому, чем больше широта станции, тем, в среднем, позднее появляется MI, наблюдается на станциях в Северной и Южной полушариях Земли в течение первых ~ 40 с. Позднее, в течение более минуты MI регистрируются на станциях, расположенные на близких широтах около $\pm 70^\circ$. Линия регрессии для зависимости географической широты и времени отдельно для станций Северного полушария Земли принимает вид $f_{\varphi_N}(t) = -0.0064 \cdot t^2 + 1.0267 \cdot t + 32.411$ (коэффициент корреляции $r = 0.72$), для Южного полушария $-f_{\varphi_S}(t) = 0.0073 \cdot t^2 - 1.2874 \cdot t - 11.712$ (коэффициент корреляции $r = -0.85$). Этот результат также, как и для случая начала регистрации SC демонстрирует, что MI регистрируется на несколько минут раньше в низких широтах по сравнению с высокими.

Что касается связи разницы долготы станции и полуденной долготы с моментом начала регистрации MI, то здесь, как и в предыдущем случае, заметные тренды не обнаруживаются. Так, зависимость $f_{\lambda}(t)$ для станций восточнее “полуденной линии” удалось описать линейной регрессии вида $f_{\lambda_E}(t) = 0.075 \cdot t - 80.324$ с малым значением коэффициента корреляции $r = -0.04$, а для станций

западнее “полуденной долготы” – $f_{\lambda_W}(t) = -0.2761 \cdot t + 97.148$ (коэффициент корреляции $r^2 = 0.16$) (см. рис. 7б). Станция KOU на момент наблюдения SC-события находилась в долготном секторе $\Delta\lambda$ от 0° до 90° , т.е. на полушарии Земли, контролируемом Солнцем, западнее “полуденной линии”. После ~ 40 с начало момента регистрации MI на станции KOU геомагнитное возмущение регистрируется, как на станциях на ночной стороне Земли, так и на дневной стороне.

Дополнительно отметим, что промежуток времени между регистрацией MI на первой и последней станциях из списка составило $\Delta t_{MI} = 114$ с или 1 мин 54 с. От станции к станции промежуток времени между моментами начала регистрации

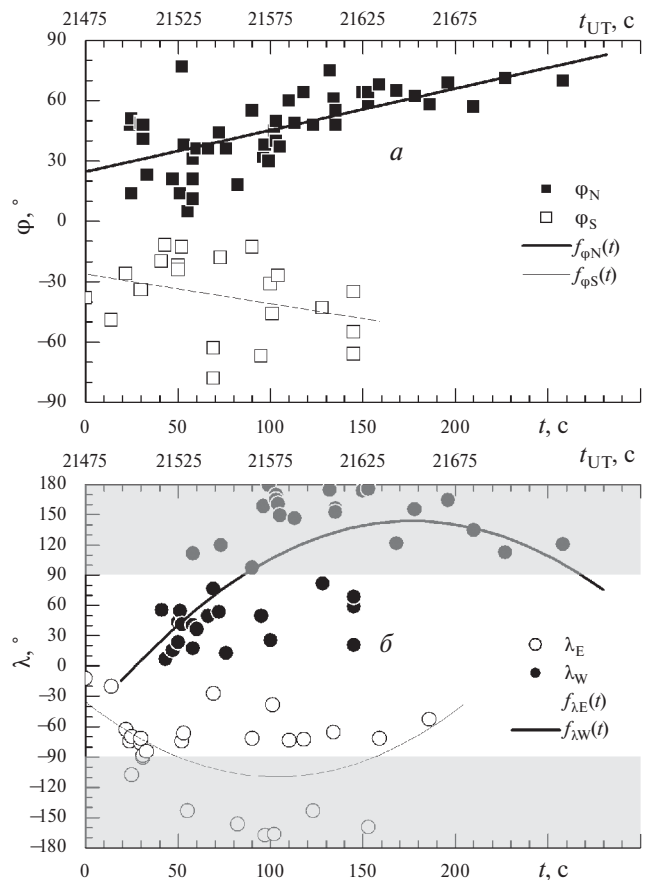


Рис. 8. Регистрация SC как функции географической широты φ (а) и долготы относительно “полуденной линии” λ (б) и времени (t – время в секундах, отсчитываемое от начала регистрации на первой станции из списка AMS; t_{UT} – Всемирное время в секундах от начала суток) для события от 16 июля 2017 г. (КВМ от 14 июля 2017). На рисунке (б) заштрихованы области значений λ , соответствующие станциям на ночной стороне Земли.

MI изменяется от 0 до 21 с, в среднем составляет $\Delta T_{MI} \sim 2$ с. Промежуток времени между регистрацией MI на станции KOU и временем регистрации SC по данным INTERMAGNET составил 28 с. Период времени между регистрацией MI на последней станции из списка (56-я станция) и временем начала регистрации SC по данным INTERMAGNET составил 142 с.

На рис. 8 и рис. 9 показаны графики регистрации SC и MI как функций географических координат и Всемирного времени для события от 16 июля 2017 г. На зависимостях широты станции φ от момента начала регистрации SC отчетливо просматривается линейный тренд в Северном полушарии $f_{\varphi_N}(t) = 0.5798 \cdot t + 24.17$ (коэффициент корреляции $r = 0.64$) и довольно слабый тренд в Южном полушарии Земли $f_{\varphi_S}(t) = -0.3611 \cdot t - 27.256$ (коэффициент корреляции $r = -0.33$) (см. рис. 8а). Первой отреагировала на начало SC-события станция Amsterdam Island (AMS) в 05:58:09 UT Южного полушария Земли, находящаяся восточнее “полуденной линии” (геогра-

фическая широта/долгота станции – $(-38^\circ/78^\circ)$, последней из списка – станция Deadhorse (DED; географическая широта/долгота – $(70^\circ/211^\circ)$) Северного полушария Земли. Напомним, что в этом событии источник формирования КВМ и, как мы предполагаем, связанная с ним УВ были расположены в Южной полусфере Солнца.

На аналогичных зависимостях для MI линейные тренды наблюдаются как для станций Северного полушария Земли, так и для станций Южного полушария. Однако в последнем случае связь между широтой φ станции и началом регистрации MI более слабая по сравнению с соответствующей зависимостью для Северного полушария (см. рис. 9а). Так, на зависимостях широты φ станции от момента начала регистрации MI просматривается линейный тренд в Северном полушарии $f_{\varphi_N}(t) = 0.223 \cdot t + 26.868$ (коэффициент корреляции $r = 0.66$) и очень слабый тренд в Южном полушарии Земли $f_{\varphi_S}(t) = -0.0254 \cdot t - 35.337$ (коэффициент корреляции $r = -0.05$). Как и для случая регистрации SC, первой из списка станций, зарегистрировавшей MI в 05:59:69 UT, стала станция Южного полушария Земли AMS, последней из списка – станция DED.

На зависимостях разности географической долготы станции и “полуденной линии” λ от момента начала регистрации SC во всех случаях наблюдается слабый квадратичный тренд, причем более слабый для станций на долготах восточнее “полуденной линии” (см. рис. 8б). Так, для станций, расположенных на момент начала SC на долготах восточнее “полуденной линии” – $f_{\lambda_E}(t) = 0.039 \cdot t^2 - 2.9156 \cdot t - 52.885$ (коэффициент корреляции $r = -0.42$), западнее – $f_{\lambda_W}(t) = -0.0478 \cdot t^2 + 5.8656 \cdot t - 47.144$ (коэффициент корреляции $r = 0.67$). На рис. 8б видно, что станция AMS на момент наблюдения SC-события находилась в долготном секторе $\Delta\lambda$ от 0° до -90° , т.е. на освещенной Солнце восточной части полушария Земли. Спустя ~ 160 с с момента начала регистрации SC на станции AMS все станции, находящиеся западнее “полуденной линии”, находились на ночной стороне Земли. В то время как на станциях, находящихся восточнее “полуденной линии”, наблюдалось утреннее время (вблизи восхода Солнца).

На графиках регистрации MI как функции разности географической долготы станции и “полуденной линии” λ и времени t , можно выделить только слабые линейные тренды (см. рис. 9б). Так, для станций, расположенных на момент начала SC-события на долготах восточнее “полуденной линии” – $f_{\lambda_E}(t) = 0.3812 \cdot t + 59.077$ (коэффициент корреляции $r = 0.31$), западнее –

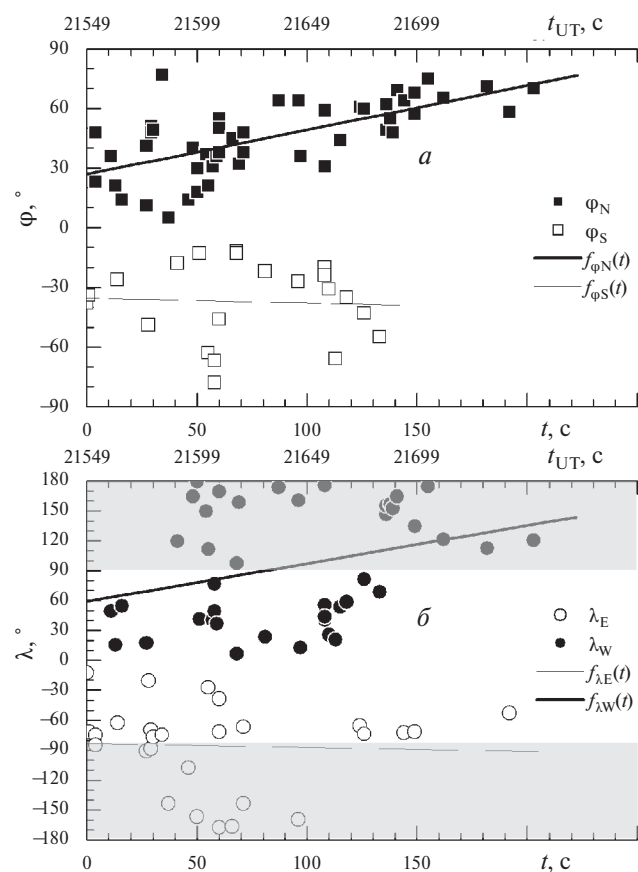


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но для начала регистрации MI.

$f_{\lambda W}(t) = -0.0398 \cdot t - 83.11$ (коэффициент корреляции $r^2 = -0.05$). Через ~ 150 с начало момента регистрации МІ на станции AMS все станции, находящиеся западнее “полуденной линии”, находились на ночной стороне Земли. Тогда как местное время на станциях, находящиеся восточнее “полуденной линии” к этому моменту времени, соответствовало утренним часам.

Из рис. 8 и рис. 9 следует, что, в среднем, регистрация SC и МІ для события от 16 июля 2017 г. начинается раньше на низких широтах на дневной стороне на Земле и позже на высоких широтах. Также отметим, что от станции к станции промежуток времени ΔT_{SC} между моментами начала регистрации SC изменяется от 0 до 31 с, в среднем составляет ~ 4 с. Промежуток времени между наблюдениями начала регистрации SC на первой и последней 68-ой из списка станций для данного события составил $\Delta t_{SC} = 258$ с или 4 мин 18 с. Промежуток времени между моментами начала регистрации МІ изменяется от 0 до 20 сек, в среднем составляет $\Delta T_{MI} \sim 3$ с. Промежуток времени между наблюдениями начала регистрации МІ на первой и последней станции для данного SC-события составил $\Delta t_{MI} = 202$ с или 3 мин 22 с.

Промежуток времени между регистрацией возмущения на станции AMS, первой зарегистрировавшей SC-событие от 16 июля 2017 г., и временем начала SC по данным INTERMAGNET (05:59 UT) составил 51 с. Период времени между регистрацией SC на последней 68-ой станции DED и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 193 с. Промежуток времени между регистрацией МІ на станции AMS и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 9 с. Период времени между регистрацией МІ на последней станции из списка (68-я станция) и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 212 с.

Причина обнаруженных закономерностей регистрации SC и МІ на магнитных обсерваториях как функций их географических координат и Всемирного времени, по-видимому, заключается в неизвестных нам пока особенностях распространения возмущений в магнитосфере, возникших после воздействия на нее межпланетной ударной волны. Можно предположить, что, опираясь на полученные нами зависимости $f_{\phi N}(t)$ и $f_{\phi S}(t)$, удастся получить более точные сведения о физических механизмах генерации SC и МІ.

Обнаруженные тренды $f_{\phi N}(t)$ и $f_{\phi S}(t)$ для регистрации SC и МІ как функции географической широты и Всемирного времени можно, например, объяснить, если предположить, что в результате воздействия МУВ на магнитосферу в ней возникнет

МГД возмущение в области первого контакта фронта МУВ с магнитосферой, которое распространяется со скоростью, близкой к скорости поперечной магнитно-звуковой волны, по крайней мере, до нижнего основания ионосферы. Такое движение МГД-возмущения вглубь магнитосферы будет генерировать альфвеновские возмущения, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля Земли, имеющих примерно дипольный характер. В тех случаях, когда основания силовых линий на Земле будут совпадать с местом расположения магнитной станции, приход сюда альфвеновского возмущения приведет к появлению внезапного начала. При прохождении через магнитосферу МГД-возмущения раньше будут возмущаться внешние силовые линии, связывающие высокоширотные станции, позднее – внутренние, связывающие низкоширотные станции. Если время распространения МГД-возмущения от более далеких к более близким к Земле силовым линиям будет заметно меньше времени распространения альфвеновских волн по силовым линиям, приходящих на высокоширотные магнитные станции, тогда SC и МІ будут возникать раньше на низкоширотных станциях. Однако остается открытым вопрос о том, как такой механизм связан с известными механизмами генерации МІ, обсуждавшимися во Введении.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ связи географических координат магнитных обсерваторий и времени регистрации на них SC и МІ по данным с 1-с временным разрешением для двух SC-событий от 22 июня 2015 и 16 июля 2017 г. позволил сделать следующие выводы:

(i) Магнитные станции, которые первыми откликнулись на воздействие МУВ на магнитосферу, оказались в тех же полусферах на Земле, что и источники формирования КВМ в полусферах на Солнце, что можно объяснить небольшим отклонением траектории КВМ в межпланетном пространстве от радиального направления;

(ii) Регистрация SC и МІ на наземных магнитных станциях, расположенных на разных широтах ϕ , включая приэкваториальные и приполярные широты, вследствие воздействия МУВ на магнитосферу, не происходит одновременно;

(iii) Время регистрации SC и МІ на станциях на разных широтах ϕ отличаются от нескольких секунд до более одной минуты;

(iv) В исследуемых событиях на графиках зависимости регистрации SC и МІ как функций географической широты и времени обнаружены

тренды, согласно которым, в среднем, чем позже регистрируются SC и MI на станции, тем выше ее широта φ ;

(v) В обоих событиях SC и MI регистрируется сначала на станциях на освещенной Солнцем стороне Земли;

(vi) На зависимости регистрации SC и MI как функций разницы географической долготы станции с “полуденной долготой” λ и времени тренды просматриваются слабо как в целом для всего набора точек, так и отдельно для диапазонов долгот $\lambda = [-90^\circ; 90^\circ]$, $\lambda < -90^\circ$ и $\lambda > 90^\circ$;

(vii) Промежутки времени между началом регистрацией SC на первой и на последней по времени станциях Δt различаются, что, возможно, связано с разной скоростью межпланетного КВМ и связанной с ним МУВ в двух рассмотренных событиях, так, для SC-события от 22 июня 2015 г. Δt_{SC} составило 75 с (при скорости МКВМ на орбите Земли $V_{МКВМ} = 610$ км/с), а для события от 16 июля 2017 г. – 258 с (при скорости $V_{МКВМ} = 520$ км/с);

(viii) Временной промежуток Δt_{MI} между началом регистрацией MI на первой и на последней по времени станциях для двух SC-событий также различен и составляет для первого SC-события 114 с, для второго – 202 с.

Мы планируем продолжить исследование зависимостей времени регистрации SC и MI в связи с приходом на орбиту Земли межпланетных ударных волн, связанных с КВМ, как функции географической широты/долготы и Всемирного времени на большей выборке событий. Предполагается более детально изучить влияние свойств КВМ, как источников МУВ, на характер указанных зависимостей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИЗМИРАН и Basic Research Program II.16., а также частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00150.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны научным группам проектов SOHO и SDO за возможность доступа к материалам наблюдений. Авторы также благодарят Пархомова В.А. и Кузнецова В.Д. за полезные обсуждения работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– *Акасофу С.И., Чепмен С.* Солнечно-земная физика. 2 часть. Перевод с англ. М.: Изд-во «Мир», 512 с. 1975.
– *Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. ис-

след. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009. <https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>

– *Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г., Суворова А.В., Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Козелов Б.В.* Глобальный импульсный всплеск геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц, как предвестник внезапного начала геомагнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. // Космич. исслед. Т. 55. № 5. С. 323–336. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0023420617050016>

– *Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г. и др.* 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>

– *Пилипенко В.А., Браво М., Романова Н.В., Козырева О.В., Самсонов С.Н., Сахаров Я.А.* Геомагнитный и ионосферный отклики на межпланетную ударную волну 17 марта 2015 г. // Физика земли. № 5. С. 61–80. 2018. <https://doi.org/10.1134/S1069351318050129>

– *Araki T.* A physical model of the geomagnetic sudden commencement // Geophysical Monograph, V. 81. P. 183–200. 1994. <https://doi.org/10.1029/GM081p0183>

– *Beland J., Small K.* Space weather effects on power transmission systems: The cases of Hydro-Quebec and Transpower New Zealand Ltd. Effects of Space Weather on Technology Infrastructure, Kluwer, Dordrecht, Netherlands / ed. Eaglis I.A. P. 287–299. 2004.

– *Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke C.M.* The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // Solar Physics. 162. P. 357. 1995.

– *Chapman S., Bartels J.* Geomagnetism, Vol. I: Geomagnetic and Related Phenomena. London: Oxford Univ. Press, 1940a.

– *Chapman S., Bartels J.* Geomagnetism, Vol. II: Analysis of the Data, and Physical Theories. London: Oxford Univ. Press, 1940b.

– *Burlaga L.F. and Ogivile K.W.*, Causes of sudden commencements and sudden impulses // J. Geophys. Res. V. 74. P. 2815. 1969.

– *Curto J.J., Araki T., Alberca L.F.* Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and their operative identification // Earth Planets Space. V. 59. i–xii. 2007a. <https://doi.org/10.1186/BF03352059>

– *Curto J.J., Cardús J.O., Alberca L.F., Blanch E.* Milestones of the IAGA International Service of Rapid Magnetic Variations and its contribution to geomagnetic field knowledge // Earth, Planets and Space. V. 59. P. 463–471. 2007b.

– *Domingo V., Fleck B., Poland A.I.* The SOHO Mission: an Overview // Solar Phys. 162(1-2). P. 1. 1995.

– *Fainshtein V.G., Ivanov E.V.* Relationship between CME Parameters and Large-Scale Structure of Solar Magnetic Fields // Sun and Geosphere. V. 5. N. 1. P. 28–33. 2010.

– *Ferraro V.C.A., Parkinson W.C., and Unthank H.W.* Sudden commencements and sudden impulses in geomagne-

- tism, Cheltenham, Tucson, San Juan, Honolulu, Huancayo and Watheroo // *J. Geophys. Res.* V. 56. P. 177–195. 1951.
- *Gerard V.B.* The Propagation of World-Wide Sudden Commencements of Magnetic Storms// *Journal of Geophysical Research.* V. 64. Issue 6. P. 593–596. 1959.
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Stenborg G., Xie G., Mäkelä P., Vourlidis A.* A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // *Earth Moon Planet.* V. 104. P. 7–16. 2010.
- *Hundhausen A.J.* Coronal expansion and solar wind. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg New York, 1972.
- *Kim S.-I., Kim K.-H., Kwon H.-J., et al.* SC-associated electric field variations in the magnetosphere and ionospheric convective flows // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 122. P. 11,044–11,057. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024611>
- *Lam M.M., Rodger A.S.* A case study test of Araki's physical model of geomagnetic sudden commencement // *Journal of Geophysical Research.* V. 106. Issue A7. P. 13135–13144. 2001. <https://doi.org/10.1029/2000JA900134>
- *Mayaud P.* Analysis of storm sudden commencements for the years 1868–1967 // *J. Geophys. Res.* V. 80. № 1. P. 111–122. 1975.
- *Nishida A.* Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. Berlin: Springer-Verlag New-York-Hedelberg. 1978.
- *Nishimura Y., Kikuchi T., Ebihara Y., Yoshikawa A., Imajo S., Li W., Utada H.* Evolution of the current system during solar wind pressure pulses based on aurora and magnetometer observations // *Earth, Planets and Space.* V. 68. P. 144. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0517-y>
- *Parkhomov V.A.* Fine structure of the preliminary impulse of a sudden storm commencement // *Geomagnetizm i Aeronomiia* (ISSN 0016-7940), vol. 25, May-June 1985, p. 420–424. In Russian. 1985.
- *Russell C.T., Ginskey M., Petrinec S.M.* Sudden impulses at low latitude stations: Steady state response for southward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 99 (A7). P. 13403–13408. 1994. <https://doi.org/10.1029/94JA00549>
- *Samsonov A.A., Sibeck D.G., Chen S., Singer H.J., Biernat H.K., Zolotova N.* An event of interplanetary shock - magnetosphere interaction: Comparison between spacecraft observations and MHD modeling. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract id.SM13B-1799. 2010.
- *Sato T.* Sudden commencement of geomagnetic storms in high latitudes // *Rep. Ionosph. Space Res. Japan.* V. 15. P. 215. 1961.
- *Selvakumaran R., Veenadhari B., Ebihara Y., Kumar S., Prasad D.S.V.V.D.* The role of interplanetary shock orientation on SC/SI rise time and geoeffectiveness // *Advances in Space Research.* V. 59. N. 5. P. 1425–1438. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.010>
- *Sun T.R., Wang C., Li H., Guo X.C.* Nightside geosynchronous magnetic field response to interplanetary shocks: Model results // *J. Geophys. Res.* V. 116. A04216. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016074>
- *Sun T.R., Wang C., Zhang J.J., Pilipenko V.A., Wang Y., Wang J.Y.* The chain response of the magnetospheric and ground magnetic field to interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* V. 120. P. 157–165. 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JA020754>
- *Wang C., Li C.X., Huang Z.H., and Richardson J.D.* Effect of interplanetary shock strengths and orientations on storm sudden commencement rise times // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. P.L14104. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL025966>
- *Wang C., Li H., Richardson J.D., and Kan J.R.* Interplanetary shock characteristics and associated geosynchronous magnetic field variations estimated from sudden impulses observed on the ground // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A09215. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014833>
- *Williams V.L.* The simultaneity of sudden commencements of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 65. N. 1. P. 85–92. 1960.
- *Wilson C.R., Sugiura M.* Hydromagnetic Interpretation of Sudden Commencements of Magnetic Storms? // *Journal of Geophysical Research.* V. 66. Issue 12. P. 4097–4111. 1961.
- *Yamamoto M., Maeda H.* The simultaneity of geomagnetic sudden impulses // *J. Atmosf. Terr. Phys.* V. 22. P. 212–215. 1960.
- *Yue C., Zong Q.G., Zhang H., Wang Y.F., Yuan C.J., Pu Z.Y., Fu S.Y., Lui A.T.Y., Yang B., and Wang C.R.* Geomagnetic activity triggered by interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A00I05. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JA0115356>

Study of Sudden Magnetic Storm Commencement from Observations with Second Time Resolution

Iu. S. Zagainova^{1,*}, S. V. Gromov¹, L. I. Gromova¹, V. G. Fainshtein²

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

²*Institute of Solar–Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS), Irkutsk, Russia*

**e-mail: yuliazganova@mail.ru*

The article presents the results of a studying detection of the sudden commencement (SC) and main impulse (MI) of a magnetic storm as a function of the geographic coordinates of magnetic observatories and Universal Time, using modern data with second time resolution. The analysis was carried out for two events in which an interplanetary shock wave impacting the magnetosphere was associated with interplanetary coronal mass ejections (CMEs) with sources in different hemispheres of the Sun. The authors propose an approach to determine the time points of SC and MI detection. It is concluded that the SC and MI detection times may differ by several seconds to more than a minute at magnetic observatories located at different geographic latitudes and longitudes. For the studied events, the graphs of SC and MI detection as functions of the geographic coordinates of magnetic observatories and Universal Time revealed trends according to which, on average, the higher station the latitude, the later SC and MI are detected at the station.