

1. Промежуточный отчет по проекту 18-35-00430 мол_а

Геомагнитная активность, обусловленная корональными плазменными потоками

Аннотация, публикуемая на сайте РФФИ (кратко; описать содержание проведенных исследований и полученные результаты за период, на который был предоставлен грант)

Представлены результаты статистического исследования зависимостей характеристик корональных выбросов массы (КВМ) и уровня геомагнитной активности от параметров локализации их источников на солнечном диске. Прикладная актуальность предпринятого исследования определяется необходимостью прогноза геомагнитной эффективности структур солнечного ветра, образующихся в солнечном ветре благодаря явлениям солнечной активности. Обращено внимание на то, что качество такого прогноза зависит от полноты имеющихся данных о солнечных источниках и стартовых физических характеристиках КВМ. Предложена методика установления локализации и конфигурации солнечных источников магнитных облако (МО) по данным коронографов и фотографиям EIT MDI SOHO фотосферы. С ее помощью выполнен анализ особенностей распределения видимых частей солнечных источников различной протяженности и угловой ориентации солнечного источника. При учете цилиндрической модели анализируемых магнитных облаков, продемонстрировано наиболее вероятное формирование таких структур, лежащих вблизи плоскости эклиптики источниками, находящимися на низких солнечных широтах. На основе учета значений индекса AL определена зависимость экстремальных значений суббуревой активности от параметров анализируемых солнечных источников в интервалы воздействия на земную магнитосферу магнитных облаков. Отмечено отсутствие суббурь, ассоциированных с протяженными источниками вне диапазона гелиоширот $\sim 5\text{--}20$ градусов. Установлены связи координат солнечного источника с геомагнитной активностью оболочки МО и с геомагнитной активностью тела МО согласуются с наиболее вероятным распределением магнитоактивных областей на солнечном диске.

Обращено внимание на увеличение геомагнитной эффективности МО за счет их дополнительного ускорения в солнечном ветре и, соответственно, возникновения структур сопровождаемых ударными волнами и турбулентными оболочками. Определено условие образования таких облаков. Предположено, что в геомагнитную активность дают вклад турбулентные оболочки облаков, параметры которых обусловлены солнечным ветром, изменившимся в результате воздействия на него ударной волны облака. Для оценки данной эволюции натекающего солнечного ветра определены локальные ориентации плоскостей ударных волн и рассчитана ожидаемая на границе магнитосферы последовательность значений геоэффективной B_z компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат. Сопоставление динамики AL индекса с измеренными на КА значениями B_z компоненты и с вычисленной последовательностью значений B_z свидетельствует о необходимости учета такой эволюции межпланетного магнитного поля (ММП) солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере.

Название Проекта (на англ. языке)

Geomagnetic activity due to coronal plasma streams

Аннотация, публикуемая на сайте РФФИ (на английском языке) (кратко; описать содержание проведенных исследований и полученные результаты за период, на который был предоставлен грант)

The results of a statistical study for dependences of characteristics of coronal mass emissions (CME) and the level of geomagnetic activity on the localization parameters of their sources on the solar disk are presented. The applied relevance of the research undertaken is determined by the need to predict the geomagnetic efficiency of the solar wind structures formed in the solar wind due to solar activity phenomena. Attention is drawn to the fact that the quality of such a forecast depends on the completeness of the available data on solar sources and the starting physical characteristics of the CME. A method is proposed for determining the localization and configuration of solar sources of magnetic clouds (MC) according to coronagraphs and photographs of the EIT MDI SOHO photosphere. With its help, an analysis of features of the distribution of visible parts of solar sources of various lengths and angular orientations of a solar source is carried out. When taking into account the cylindrical model of the analyzed magnetic clouds, the most probable formation of such structures is shown, as well as sources lying at low solar latitudes near the ecliptic plane. On the basis of taking into account the values of the AL index, the dependence of the extreme values of the substorm activity on parameters of the analyzed solar sources is determined in the ranges of the effect of magnetic clouds on the Earth's magnetosphere. The absence of substorms associated with extended sources outside the heliolatitude range of ~5-20 degrees is noted. The established relationships of the coordinates of the solar source with the geomagnetic activity of MC shell and with the geomagnetic activity of the MC body are consistent with the most likely distribution of the magnetoactive regions on the solar disk.

Attention is drawn to an increase in the geomagnetic efficiency of MC due to their additional acceleration in the solar wind and, accordingly, the emergence of structures accompanied by shock waves and turbulent shells. The condition for the formation of such clouds is determined. It is assumed that the turbulent shells of clouds contribute to the geomagnetic activity, the parameters of which are due to the solar wind, which has changed as a result of the impact of the shock wave of the cloud on it. To assess this evolution of the incurring solar wind, local orientations of the planes of shock waves are determined and the expected sequence of geo-efficient Bz components at the solar-magnetospheric coordinate system is expected at the boundary of the magnetosphere. Comparison of the dynamics of the AL index with the measured by spacecraft values of the Bz component and the calculated sequence of Bz values indicates the need to take into account this evolution of the interplanetary magnetic field (IMF) of the solar wind on the shock wave of the magnetic cloud during its transfer to the magnetosphere.

Заявленные цели Проекта на период, на который предоставлен грант

Целью проекта является изучение связи параметров корональных потоков и их солнечных источников с интенсивностью геомагнитных возмущений, а также создание на ее основе прогностических методик, позволяющих сделать вывод об ожидаемой геомагнитной активности. Конкретные задачи проекта следующие:

1. Поиск расположений и конфигураций солнечных источников плазменных потоков.
2. Исследование связи уровня геомагнитной активности с координатами солнечных областей локализации источников плазменных потоков.
3. Исследование степени связи КВМ с солнечной вспышечной деятельностью.
4. Установление геомагнитных предвестников мощных солнечных вспышек поиском временных интервалов синхронизации низкочастотных возмущений.

В первый год работы над проектом планировалось:

1. Разработать метод поиска расположения и конфигураций областей солнечной активности необходимый для установления солнечных источников геоэффективных плазменных потоков.

2. Получить связь координат солнечных областей локализации источников плазменных потоков с уровнем суббуревой и глобальной геомагнитной активности, необходимую для выполнения среднесрочных прогнозов.

Для этого планировалось выполнить следующие исследования:

1. Сформировать базу параметрических данных КВМ (корональных выбросов массы), которые могут быть потенциально ответственны за интенсивные геомагнитные бури.
2. Определить число возможных источников в течение суток, начиная от времени, которое рассчитывается исходя из минимальной скорости распространения КВМ от Солнца до патрульного КА. Минимальная скорость принимается равной средней скорости КВМ (по данным патрульного КА) плюс средняя скорость магнитного звука (по данным КА).
3. Источниками КВМ нами принимаются области всплытия и эрупции потоковых петель (волокон) и определение их координат сводится к определению координат видимых областей выхода этих структур на фотосферу («ножек») по данным коронографов.
4. В силу протяженности источников КВМ, предполагается получить их угловые солнечные координаты, ближайшие к центру гелиоцентрической декартовой системы координат. Этот подход видится наиболее удобным для рассмотрения статистики, связанной с солнечными координатами источников, т.к. будет лучше отражать их геоэффективность. Поскольку, чем ниже по широте простирается источник, тем большая часть КВМ попадет в околоземную область. Те же соображения касаются и долгот.
5. Из полученных координат можно также определить ряд параметров источников - их угловую протяженность и угол наклона в картинной (как источник виден с коронографа) плоскости и в декартовой гелиоцентрической системе координат.
6. Установить статистическую зависимость индекса Dst от наименьшей по модулю крайней широты протяженного источника КВМ. Оценить тенденции увеличения модуля Dst с изменением широты. Проанализировать статистическую зависимость индекса Dst от долготы, соответствующей наименьшей по модулю широте протяженного источника.
7. Выполнить аналогичный анализ геомагнитной активности на индексе AL для источников рассматриваемых корональных потоков.
8. Сформулировать метод поиска расположения и конфигураций областей солнечной активности, необходимый для установления солнечных источников геоэффективных плазменных потоков.

Ожидаемые научные результаты за первый год реализации Проекта

1. Метод поиска расположения и конфигураций областей солнечной активности, необходимый для установления солнечных источников геоэффективных плазменных потоков.
2. Статистическая зависимость уровня суббуревой и глобальной геомагнитной активности от координат солнечных областей локализации источников плазменных потоков, необходимая для выполнения среднесрочных прогнозов.

Полученные за период, на который предоставлен грант, результаты с описанием методов и подходов, использованных при реализации Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны).

1. Установление локализации солнечных источников КВМ типа магнитных облаков солнечного ветра (МО), статистическое исследование зависимостей характеристик источников МО между собой и от расположения на солнечном диске, а также анализ связи параметров солнечных источников с магнитосферными суббурями были выполнены на данных о 30 событиях МО, отмеченных с 1997 по 2012 года. Для этого были использованы: 1) каталог корональных выбросов вещества LASCO CME Catalog, (<http://lasco-www.nrl.na-vy.mil/index.php?p=content/cmelist>); 2) каталог крупномасштабных

явлений солнечного ветра (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/); 3) каталог вспышек с указанием присутствия KBM и ударных волн (<http://umtof.umd.edu/sem/>); 4) каталог H α -вспышек (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/); 5) каталог рентгеновских вспышек Virtual Solar Observatory (<http://vso.nso.edu/cgi/catalogui>); 6) данные AL индексов магнитной активности (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). Для рассматриваемых МО было установлено ~70 возможных солнечных источников.

Постановка проблемы в такой форме и изложенные ниже пути ее решения являются новыми для изучения связи геомагнитной активности с локализацией источников солнечной активности через параметры наиболее геоэффективных плазменных потоков, а именно магнитных облаков (МО) солнечного ветра [Бархатов и Калинина, 2010].

2. Описание подходов к выполнению заявленного исследования начато с формулировки первоначальной цели установления локализации солнечного источника МО, которой является определение числа возможных источников за сутки, начиная от времени, которое рассчитывается исходя из минимальной скорости распространения KBM от Солнца до патрульного КА. Минимальная скорость принимается равной средней скорости МО (по данным КА) плюс средняя скорость магнитного звука (по данным КА). В силу протяженности источников МО, есть смысл рассматривать их угловые координаты, ближайшие к центру гелиоцентрической декартовой системой координат. Этот подход видится нам наиболее удобным для рассмотрения статистики, связанной с солнечными координатами источников, т.к. будет лучше отражать их геоэффективность. Поскольку, чем ниже по широте простирается источник, тем большая часть KBM попадет в околоземную область. Те же соображения касаются и долгот.

В общем случае определение координат источника выброса — непростая задача КА [Wang et al., 2011]. Во-первых, многие события сопровождаются каскадными эруптивными процессами с вовлечением петель из нескольких областей. Во-вторых, во многих случаях разрешения коронографа не хватает для наблюдения самого процесса эрупции и солнечных пятен. В-третьих, многие структуры источников далеки от представления потоковой петли в виде арки (например, сигмиды). В нашем исследовании предлагается оригинальная методика установления локализации солнечного источника.

Важным параметром структур, измеряемых на патрульных КА является поток магнитного поля через сечение потоковой трубки (аксиального магнитного поля). Обычно этот поток вычисляется исходя из принимаемой модели, и состоит из аксиальной и азимутальной составляющих (тороидальной и полоидальной в случае модели - тора) [Бархатов и Калинина, 2010; Бархатов и др., 2014]. Наш подход заключается в упрощении задачи исходя из физических соображений. В солнечном ветре магнитные структуры практически никогда не перемещаются свободно из-за относительно малого механического импульса. Они перемещаются в сжатом состоянии из-за торможения о ведущий межпланетный KBM (МКВМ) (в силу большей плотности он быстрее теряет скорость из-за гравитации Солнца), или из-за давления другого МКВМ движущегося позади с большей скоростью. При сжатии магнитной потоковой трубки азимутальное магнитное поле уменьшается, а аксиальное увеличивается в силу сохранения первого и второго адиабатических инвариантов. Т.е. чем сильнее сжата магнитная потоковая трубка поперек оси, тем большую аксиальную компоненту магнитного поля она содержит. Ориентация магнитного поля наибольшей напряженности будет максимально близка к аксиальной [Бархатов и др., 2009].

3. В результате выполнения первого этапа проекта был получен первый заявляемый результат в виде разработанного оригинального метода поиска расположения и конфигураций областей солнечной активности, необходимый для установления солнечных источников геоэффективных плазменных потоков [Бархатов и др., 2019].

Метод заключается в том, что источниками МО нами принимаются области всплытия и эрупции потоковых петель (волокон) и определение их координат сводится к определению координат видимых областей выхода этих структур на фотосферу («ножек») по данным коронографов. В случае высокоэнергетических событий проблем практически не возникает, т.к. петли контрастируют с фотосферой и солнечные пятна хорошо различимы. В случае каскадного процесса источником мы подразумеваем область, в которой конечная петля разрушилась («ножки» этой петли) и стала невидимой в частотном диапазоне коронографа.

Если для наблюдения эрупции не хватает возможностей коронографа, тогда мы используем косвенные признаки эрупции (например, постэруптивные аркады, отклонение «силовых линий» вокруг невидимого центра, области потемнения). В этом случае по аркадам определяется область всплытия петли, а координаты «ножек» - по отклонениям «силовых линий» вокруг невидимого центра в областях, где заканчиваются аркады. Координаты источников, отличающихся от классических арочных потоковых петель, сами по себе бесполезны для статистики, т.к. не отражают масштаба события. В этом случае вместо точечных координат «ножек» в работе нами использованы значения широт и долгот границ областей, вовлеченных в эрупцию.

Во время солнечной активности суточный критерий является очень большим. Число вероятных источников может превышать десяток. Поэтому следующим критерием в отборе вероятных источников являются рентгеновские вспышки и всплески микроволнового излучения. Существует мнение, что эти явления в некоторых случаях ассоциированы с KBM [Hundhausen, 1999] и поскольку они описываются с минутным разрешением, то их можно сопоставить со снимками солнечной фотосферы EIT SOHO и определить координаты вспышки. Однако многие KBM сопровождаются вспышками C-класса и ниже, и могут вообще не выделяться на фоне рентгеновского излучения активных областей Солнца. Надо иметь в виду, что привязка источников KBM к координатам вспышек, сопровождающих эрупцию, хаотизирует статистику, т.к. вспышки происходят в различных областях протяженных источников, которые могут быть обширными.

Результаты применения предлагаемой методики установления локализации источника МО наиболее легко проверяются на событиях KBM типа гало, которые на снимках LASCO SOHO выглядят как замкнутые ореолы вокруг диска, закрывающего Солнце. Для гало выбрасываемого в противоположную от Земли сторону необходимо привлекать данные по рентгену и микроволновому излучению. В удачных случаях разрешение коронографа LASCO C2 равно 24 минутам и этого вполне достаточно для сопоставления с вероятным источником на снимках EIT SOHO в доступном диапазоне (чаще всего $195\text{\AA}$). Во всех возможных случаях полученные координаты источников KBM/МО сопоставлялись с координатами солнечных пятен в районе источника выброса по снимкам MDI SOHO. Удовлетворительным считалось совпадение с отклонением не более чем на $2-3^\circ$ по широте. При определении координат источника также учитывались «качания» КА SOHO вокруг оси X GSE в диапазоне $\sim \pm 7,85^\circ$. Углы «качаний» для каждого случая рассчитывались по движению звезд на разностных снимках LASCO C3 в суточном интервале или чуть менее. Далее полученные координаты источников нужно будет довернуть на полученный угол.

Концентрация частиц в КВМ, как минимум, в два раза выше, чем в возмущенном солнечном ветре (СВ), и, как минимум, в десять раз выше, чем в спокойном СВ. Поэтому определение межпланетных КВМ (МКВМ) в параметрах, измеряемых на патрульных КА не представляет труда. Исследуемое МО, сопутствующее МКВМ, имеет один с ним источник и, соответственно, координаты.

На основе полученных координат источников получаются и другие параметры источников: угловая протяженность и угол наклона в картинной (как источник виден с коронографа) плоскости и в декартовой гелиоцентрической системе координат. В силу дифференциального вращения Солнца, следует ожидать, что источники МО будут вытянуты под острыми углами к гелиографическому экватору: отрицательными - в северном полушарии и положительными - в южном.

В случаях, когда одной исследуемой структуре могли соответствовать два источника выбросов типа гало, сравнивались скорости структур, измеренные на патрульных КА. Второй выброс должен иметь более высокую скорость, чтобы догнать (возможно, и перегнать) первый выброс. Поэтому определяются скорости соответствующих уплотнений, отождествляемых с МКВМ, и устанавливается их очередность в соответствии с источниками. Надо сказать, что ситуация, когда второй скоростной выброс обогнал более медленный первый на расстоянии в 1 AU исключительная редкость, даже если время между стартами соответствующих КВМ на Солнце будет всего несколько часов. Также редка ситуация, когда второй более скоростной выброс проходит сквозь первый. Чаще всего второй более скоростной выброс догоняет первый и поджигает его вместе со структурами, которые ему сопутствуют. Т.е. чаще всего хронологическая последовательность структур, отождествляемых с МКВМ, соответствует хронологической последовательности вероятных источников. Поэтому в случаях с двумя вероятными источниками часто исследуемое МО зажато между двумя выбросами и имеет по две ударно-волновых переходных области – спереди и позади. В этом случае источником второго МО считается источник первого КВМ. Заметим, что сопутствующее МО не всегда следует позади ведущего МКВМ, оно может содержаться в его массиве, и, даже, следовать впереди, имея перед собой небольшое уплотнение, но не турбулентную оболочку (ТО).

Кратко сформулируем пути решения основных проблем обнаружения источников КВМ/МО и их переноса в солнечном ветре с помощью разработанного нами метода.

- 1) Источники КВМ часто не выделяются на фоне короны или фотосферы и тогда они могут определяться по остаточным явлениям.
- 2) Уединенное МО - исключительно редкое явление и его трудно обнаруживаемый на фоне возмущенной солнечной короны или фотосферы источник может быть установлен по наблюдению его массовой части в виде диффузного облака, уносимого с Солнца при эрупции вместе с замороженным корональным магнитным полем. Массовые части КВМ хорошо видны на коронографах и это обстоятельство позволяет определить их источник на солнечном диске и далее легко идентифицировать на патрульных КА. В случае таких КВМ в них включены и МО, поэтому и источник МО также может быть определен.
- 3) Прямое прохождение уединенных МО к Земле фиксируется коронографами только в профиль.
- 4) Огромные размеры МО позволяют по данным патрульных спутников получать параметры структуры и ее динамику только на сечении объекта, что, однако не ограничивает общности, поскольку для облаков нами принята успешно применяемая во многих исследованиях цилиндрическая бессиловая модель.

4. Применение разработанного метода поиска расположения и конфигураций солнечных источников геоэффективных плазменных потоков [Бархатов и др., 2019].

С помощью разработанного метода было проведено статистическое исследование связи параметров солнечных источников КВМ между собой и с характеристиками МО. Оно показало особенности распределения солнечных источников различной протяженности и угловой ориентации их видимой части от координат источников. Установлено, что более протяженные источники и имеющие небольшой наклон к солнечному экватору находящиеся на краях солнечного диска, в отличие от непротяженных и сильно наклоненных, имеют шанс сгенерировать расширяющиеся облака, которые с высокой вероятностью могут достигнуть магнитосферы, как и облака от источника вблизи нулевого меридиана и низких широт.

Установлены закономерности зависимостей магнитных и ориентационных характеристик МО, зарегистрированными на КА от локализации и пространственных параметров их источников на солнечном диске. Следует заметить, что в ряде случаев полученные зависимости по некоторым квадрантам солнечного диска отсутствуют или не установлены. В этом нет ничего удивительно, поскольку точное отождествление источников солнечной активности с структурами МО проходящих через патрульные КА однозначно затруднено причинами упомянутыми во введении. Вместе с тем, в рамках выполненного исследования определены: зависимость скорости МО от минимальной широты источника и, соответствующей ей долготы; зависимость максимальной напряженности магнитного поля (МП) МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы; зависимость модуля B_z -компоненты максимальной напряженности МП МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы; зависимость широтного и долготного углов в солнечно-эклиптической системе координат для вектора МП МО от минимальной широты источника и соответствующей ей долготы.

Исчерпывающие особенности этих зависимостей приведены в соответствующем разделе Приложения. Здесь отметим наблюдаемое увеличение числа высокоскоростных событий МО, привязанных к восточной части солнечного диска и числа медленных событий - к западной части, что отражает последствия спирального движения потока солнечного ветра. Установлено, что для большой группы МО имеется зависимость их максимального магнитного поля от координат источника. Максимальная напряженность МП структуры растет с увеличением северных и южных широт, начиная от экватора, что согласуется с наиболее вероятным распределением магнитоактивных областей на солнечном диске. Этот вывод сделан и для B_z компоненты МП.

Анализ ориентации магнитных облаков, рассматриваемых в рамках цилиндрической модели, продемонстрировал наиболее вероятное формирование облаков, лежащих вблизи плоскости эклиптики источниками, находящимися на низких широтах.

5. Второй заявляемый результат заключался в обнаружении статистической зависимости уровня геомагнитной активности от координат солнечных областей локализации источников плазменных потоков, необходимой для выполнения среднесрочных прогнозов [Бархатов и др., 2019].

Этот результат получен применением разработанного метода для статистического исследования уровня геомагнитной активности от параметров локализации источников МО на солнечном диске. Определена зависимость экстремальных значений суббулевой активности (по индексу AL) от параметров солнечных источников МО в интервалы

воздействия на земную магнитосферу структур МО (тела и оболочки). Отмечено отсутствие суббурь, ассоциированных с протяженными источниками вне диапазона гелиоширот $\sim 5\text{--}20$ градусов. Таким образом, установлены связи координат солнечного источника с геомагнитной активностью оболочки МО и с геомагнитной активностью тела МО. Они согласуются с наиболее вероятным распределением магнитоактивных областей на солнечном диске. Сопоставление результатов говорит о том, что суббуревые эффективности облаков и их оболочек сопоставимы и определяются расположением солнечных источников аналогичным образом (более подробно см. Приложение).

6. В качестве дополнительного результата при выполнении первого этапа проекта установлена необходимость учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере для уточнения уровня возникающей геомагнитной активности [Бархатов и др., 2019]. Для этих целей разработан соответствующий метод оценки ожидаемой высокоширотной геомагнитной активности. Для разработки предлагаемого метода были выполнены ряд исследований на данных по 75 событиям, зарегистрированным в околоземном космическом пространстве с 1973 по 2012 гг. (по данным OMNI и данным с КА ACE, http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/) и определенных в литературе как магнитные облака. По анализу динамики параметров солнечного ветра перед магнитными облаками и отличительным особенностям ударных волн было установлено, что из рассмотренных 75 облаков 30 не имели ударных волн, а остальные 45 ими сопровождалась.

Результатами выполненных исследований являются: найденное условие образования «быстрых» облаков, сопровождаемых ударными волнами и турбулентными оболочками; установленный вклад турбулентных оболочек облаков в геомагнитную эффективность МО через эволюцию последовательности значений геоэффективной B_z компоненты ММП за счет изменений на ударной волне [Бархатов и др., 2019].

Определено, что для магнитных облаков без ударных волн скорость относительно солнечного ветра оказывается ниже скоростей звуковых и альвеновских волн. В то время как для магнитных облаков с ударными волнами наблюдается превышение относительной скорости облаков над звуковыми и альвеновскими скоростями. Показано, что для магнитных облаков без ударных волн имеет место равновесие суммарного газокINETического и магнитного давления на границе солнечный ветер – магнитное облако. Для облаков с ударными волнами отмечается превышение на порядок суммарного давления в теле облака над давлением в солнечном ветре. Это свидетельствует о том, что границы облаков с ударными волнами могут приобрести дополнительную скорость вследствие их расширения. Поскольку магнитное давление в теле облака на порядок превышает газокINETическое, основной вклад в ускорение ведущей части облака дает магнитное давление внутри облака. Зависимость относительной скорости таких облаков от магнитного давления в них имеет заметный коэффициент корреляции. Говорить про ускорение медленных облаков вообще не приходится, поскольку их средняя скорость относительно солнечного ветра равна нулю.

Требуемое уточнение границ элементов магнитного облака выполнено с помощью спектрального анализа возмущений модуля вектора ММП. При этом установлено, что оболочки облаков характеризуются высокочастотными колебаниями модуля ММП, а их тела – низкочастотными колебаниями. Переход из солнечного ветра через ударную волну в турбулентную оболочку сопровождается увеличением мощности высокочастотной части спектра в среднем на 2 порядка; а при переходе из оболочки в тело магнитного облака мощность высокочастотной части спектра напротив уменьшается на 2-4 порядка. Путем удаления низкочастотных составляющих спектра и сравнением мощности

высокочастотных флуктуаций, установлены моменты регистрации ударной волны и границы оболочки магнитных облаков на КА.

Расчет ожидаемой на границе магнитосферы последовательности значений геоэффективной B_z компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат выполнен разными способами. Однако, корреляционный анализ уровня связи динамики AL индекса со значениями B_z компонент, показал: для большинства магнитных облаков независимо от уровня интенсивности волновых движений в их оболочках, наиболее высокая (до 0.97) корреляция имеет место между AL индексом и накопленной величиной ΣVB_z за 30 мин интервал времени, предшествующий значению AL индекса. Такой вывод свидетельствует о зависимости суббуревых явлений от процесса непрерывного поступления и постепенного накопления энергии в магнитосфере Земли (см. также [Бархатов и др., 2017]). Кроме того это говорит о том, что проникающее в оболочку магнитное поле оказывается недостаточным для стабилизации волновых движений и, согласно экспериментальным данным, реально вовлекается в турбулентный процесс и может суммироваться с фоновой турбулентностью.

Таким образом, выполненное сопоставление динамики AL индекса с измеренными на КА значениями B_z компоненты и с вычисленной последовательностью значений B_z свидетельствует о необходимости учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере при оценке уровня возникающей геомагнитной активности.

Полученные научные результаты за первый год реализации проекта соответствуют заявленным ранее: 1) разработан оригинальный метод поиска расположения и конфигураций областей солнечной активности, необходимый для установления солнечных источников геоэффективных плазменных потоков; 2) получена статистическая зависимость уровня суббуревой активности от координат солнечных областей локализации источников плазменных потоков, необходимая для выполнения среднесрочных прогнозов.

Дополнительно к заявленным результатам исследований прошедшего года показана необходимость учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере для целей оценки возникающей геомагнитной активности. Соответственно, разработан метод уточнения ожидающейся высокоширотной геомагнитной активности.

Полный материал, представляющий все исследования первого года выполняемого проекта и полученные результаты, содержится в Приложении №1 и №2, доложен на научных конференциях [Ревунова и др., 2018, Barkhatov et. al, 2018; Бархатова и др., 2018] и опубликован [Бархатов и др., 2019; Barkhatov et. al, 2018; Barkhatov et. al, 2019].

Цитируемая литература

1. Barkhatov N.A., Dolgova D.S., and Revunova E.A. Dependence of the Geomagnetic Activity on the Structure of Magnetic Clouds // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2019, Vol. 59, No. 1, pp. 16–26. © Pleiades Publishing, Ltd., 2019
2. Barkhatov N.A., S.E. Revunov, O.M. Barkhatova, E.A. Revunova, D.S. Dolgova, and Yu. A. Glavatsky Classification of solar plasma flows by analyzing out- and intra-magnetospheric magnetohydrodynamic oscillations during magnetic storms // *International Journal of Engineering & Technology*, Vol 7, No 4.38, pp. 1078-1081 2018

3. Barkhatov N.A., E.A. Revunova, R.V. Romanov, V.G. Vorobjev Solar sources and characteristics of Solar wind magnetic clouds // Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018. pp. 66-69
4. Hundhausen A.J. Coronal mass Ejections // The many faces of the Sun: A summary of the results from NASA's Solar maximum mission / Eds. K.T. Strong et al. – N.Y. Springer, 1999. P.143
5. Wang Yuming, Chen Caixia, Gui Bin, ShenChenglong, Ye Pinzhong, and Wang S. Statistical study of coronal mass ejection source locations: Understanding CMEs viewed in coronagraphs // Journal of Geophysical Research, V. 116, A04104, doi:10.1029/2010JA016101, 2011
6. Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А. Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космические исследования, Т. 52, № 4, С. 286-295, 2014
7. Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия, Т.59, №1, 2019, с. 19-29
8. Бархатов Н.А., Е.А. Ревунова, Р.В. Романов, В.Г. Воробьев Солнечные источники и характеристики магнитных облаков солнечного ветра // Тезисы 41-го ежегодного семинара "Физика авроральных явлений", 12-16 марта 2018 г., ПГИ, с. 44
9. Бархатов Н.А., Калинина (Ревунова) Е.А. Определение параметров магнитных облаков и прогноз интенсивности магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия, 2010, Т 50, № 4, С. 477–485
10. Бархатов Н.А., Калинина (Ревунова) Е.А., Левитин А.Е. Проявление конфигураций магнитных облаков солнечного ветра в геомагнитной активности. // Космические исследования (РАН), 2009, 47, N 4, С. 300-310
11. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. №3. С. 273-279.
12. Ревунова Е.А., Н.А. Бархатов, Д.С. Долгова, С.Е. Ревунов, Р.В. Романов Статистическое исследование зависимостей характеристик магнитных облаков солнечного ветра от параметров их солнечных источников // Труды XXII Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2018, с. 169-172
13. Бархатов Н.А., Е.А. Ревунова, С.Е. Ревунов, Р.В. Романов, Д.С. Долгова Исследование связи параметров локализации солнечных источников магнитных облаков с их характеристиками и суббуревой активностью // Солнечно-Земная физика, 2019 (направлена в печать)

Участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который предоставлен грант (каждое мероприятие с новой строки, указать названия мероприятий и тип доклада)

- 1) Международный научный семинар «Физика авроральных явлений», очное участие с докладом, Апатиты, ПГИ, 12-16 марта 2018 г. [N.A. Barkhatov, E.A. Revunova, R.V. Romanov, V.G. Vorobjev Solar sources and characteristics of Solar wind magnetic clouds // Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018. pp. 66-69]
- 2) Международный научный семинар «Физика авроральных явлений», очное участие с докладом, Апатиты, ПГИ, 12-16 марта 2018 г. [O.M. Barkhatova, N.V. Kosolapova, N.A. Barkhatov, V.G. Vorobjev Ionospheric and geomagnetic disturbances on the background of substorm processes // Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018. pp. 91-94]
- 3) Научная конференция по радиофизике, очное участие с докладом, Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 15-29 мая 2018 г. [Е.А. Ревунова, Н.А. Бархатов, Д.С. Долгова, С.Е. Ревунов, Р.В. Романов Статистическое исследование зависимостей характеристик магнитных облаков солнечного ветра от параметров их солнечных

источников // Труды XXII Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2018, с. 169-172]

4) Научная конференция по радиофизике, очное участие с докладом, Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 15-29 мая 2018 г. [О.М. Бархатова, Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов Турбулентные движения в оболочке магнитного облака солнечного ветра как причина синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности на фоне суббуревых процессов // Труды XXII Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2018, с. 129-132]

5) Всероссийская научная конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, очное участие с докладом, 24-26 сентября 2018 г. [Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А. Внемагнитосферный агент синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в интервалы суббуревых процессов // Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 19-22]

Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных по Проекту (например, <http://www.somewhere.ru/mypub.html>)
http://spacelab.mininuniver.ru/?page_id=771

Краткое назначение конечной продукции, технологии или услуг, которые будут производиться с применением полученных результатов

Полученные зависимости уровня геомагнитной активности от параметров локализации их источников на солнечном диске необходимы для прогноза необходимости учета солнечной активности в сфере геофизических исследований. При мониторинге окружающей среды он может быть использован для динамической настройки оборудования, учета геомагнитной активности при проведении геофизических экспериментов и наблюдений. Соответственно, данный прикладной результат проекта имеет отношение к работе телекоммуникационным систем и для оценки негативного воздействия на различные виды связи полярного наземного и космического базирования. Результаты выполненных исследований полезны при расчетах степени влияния геоиндукционных токов на протяженные магистральные трубопроводы и системы автоматических железнодорожных систем электрической тяги переменного и постоянного тока. Полученные результаты важны для оценки атмосферно-космической обстановки на основе дифференциации явлений и событий естественного (поток высыпающихся частиц) и искусственного (быстро передвигающиеся объекты) происхождения в высоких широтах.

2. Заявка на следующий год

Основной код классификатора
05-652 Магнитосфера

Дополнительные коды классификатора
02-650 Ионосферная и космическая плазма

Ключевые слова (не более 15)

солнечная активность, корональный плазменный поток, корональный выброс массы (КВМ), солнечная вспышка, геомагнитная активность, геомагнитные возмущения, магнитосфера, ионосфера, прогноз, спектральный анализ, вейвлет анализ

Задачи Проекта, которые должны быть решены в следующем году, их связь с целью и задачами Проекта (перечислить задачи и указать распределение исполнителей по задачам на следующий год реализации Проекта)

Во второй год работы над проектом планируется:

1. Получить статистическую связь КВМ с солнечной вспышечной деятельностью, которая продемонстрирует фундаментальные зависимости в явлениях солнечной активности и позволит сделать выводы о вероятности сопровождения КВМ вспышками.
2. Найти закономерности причинно-следственной связи долгопериодных вариаций геомагнитного поля с предвспышечным повышением уровня электромагнитной возмущенности в УФ, рентгеновском и МГД диапазонах. Результат согласуется с актуальным направлением прикладной солнечно-земной физики – разработке новых прогностических инструментов для целей прогноза ожидаемой солнечной активности.

Для этого планируется выполнить следующие исследования:

1. Статистическое исследование связи КВМ с солнечными вспышками. Попытка установления последовательности этих событий и сценария развития процесса эрупции КВМ.
2. Поиск причин существования синхронных возмущений геомагнитного поля и ионосферной плазмы, зарегистрированных обсерваториями в широких географических пределах, в периоды воздействия КВМ на земную магнитосферу.
3. Сопоставление полученных интервалов УНЧ ионосферно-магнитосферных возмущений с моментами предшествующих экстремальных солнечных вспышек.
4. Установление закономерностей причинно-следственной связи долгопериодных вариаций геомагнитного поля с предвспышечными солнечными процессами и, соответственно, с КВМ.

Распределение исполнителей по задачам:

Ревунова Е.А. – Постановка задач проекта, путей и способов их решения, разработка компьютерных программ, оценка полученных результатов и формулировка выводов, написание ежегодных научных отчетов по проекту, общее руководство проектом, подготовка публикаций.

Бархатова О.М. – Установление закономерностей причинно-следственной связи долгопериодных вариаций геомагнитного поля с предвспышечными солнечными процессами и, соответственно, с КВМ.

Косолапова Н.В. – Поиск причин существования синхронных возмущений геомагнитного поля и ионосферной плазмы, зарегистрированных обсерваториями в широких географических пределах, в периоды воздействия КВМ на земную магнитосферу.

Долгова Д.С. – Статистическое исследование связи КВМ с солнечными вспышками. Попытка установления последовательности этих событий и сценария развития процесса эрупции КВМ.

Главацкий Ю.А. – Сопоставление полученных интервалов УНЧ ионосферно-магнитосферных возмущений с моментами предшествующих экстремальных солнечных вспышек.

Ожидаемые в конце периода, на который будет предоставлен грант, научные результаты

- 1) Степень связи КВМ с солнечной вспышечной деятельностью.
- 2) Закономерности причинно-следственной связи долгопериодных ионосферно-магнитосферных плазменных и магнитных вариаций с МГД возмущенностью КВМ и с предвспышечным повышением уровня электромагнитной возмущенности в УФ, рентгеновском и МГД диапазонах.

3) УНЧ отклик на МГД возмущенность УВ и оболочки магнитных облаков, который может объясняться магнитосферно-ионосферными связями, возникающими на фоне развития суббури.

Объем финансирования на следующий год, запрашиваемый в РФФИ
500000 Р

Планируемые поездки. Указать связь с целями и задачами Проекта

Результаты выполненных исследований планируется доложить на семинарах ИЗМИРАН (поездка в Москву), Ежегодном Апатитском семинаре «Физика авроральных явлений» в ПГИ КНЦ РАН (поездка в Апатиты), Ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» в ИКИ РАН (поездка в Москву).