РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Формы отчета проекта 16-05-00608 (Итоговый отчет 2018)

Интенсивные геомагнитные бури, вызываемые магнитными облаками солнечного ветра

3.1.	Номер Проекта	16-05-00608
3.2.	Название Проекта	Интенсивные геомагнитные бури, вызываемые магнитными облаками солнечного ветра
3.3.	Коды классификатора	05-652 Магнитосфера,02-650 Ионосферная и космическая плазма,02-830 Солнце и Солнечная система
3.4.	Цель и задачи фундаментального исследования (указать как в заявке)	Целью планируемого фундаментального исследования является установление причин, по которым один из распространенных типов плазменных солнечных корональных потоков, а именно магнитные облака солнечного ветра, вызывают наиболее интенсивные геомагнитные бури. Воздействие магнитных облаков на геомагнитное поле было частично исследовано нами при выполнении предыдущих проектов РФФИ. Фундаментальными задачами данного проекта являются изучение физических явлений в магнитных облаках, находящих свое отражение в геомагнитной активности. Конкретные задачи следующие: 1. Установление зависимости интенсивности глобальных геомагнитных бурь и высокоширотной геомагнитной активности от расположения источника облака на солнечном диске, от ориентации оси облака по отношению к земному магнитному диполю, от прицельного параметра облака, от распределения параметров среды и магнитного поля в теле облака. 2. Проверка и интерпретация экспериментально замеченного нами факта, что турбулентная оболочка облака может обладать, как и

		само тело облака, высокой геомагнитной эффективностью. Выяснение причин, по которым она сможет стать таковой. 3. Разработка методов диагностики структуры магнитного облака и прогноза ожидаемого геомагнитного возмущения на основе спектрального и вейвлет-скелетонного анализа волновых явлений в параметрах среды и магнитного поля в различных областях магнитного облака.
3.5.	Важнейшие результаты, полученные при реализации Проекта	1. Определены связи локализационных и ориентационных параметров солнечных источников КВМ типа магнитных облаков (МО) между собой и с характеристиками магнитных облаков солнечного ветра. а) Установлено, что чем источник ближе к гелиографическому экватору, тем более он вытянут в экваториальном направлении. И наоборот, чем дальше источник от экватора, тем он более вытянут в меридиональном направлении. б) Углы наклона протяженного источника уменьшаются с увеличением долготы. в) С увеличением широты источника уменьшается вероятность зарегистрировать магнитное облако в плоскости эклиптики, для более протяженных источников (более масштабные облака) расположенных на высоких широтах и по краям солнечного диска, вероятность регистрации облаков в околоземном пространстве существует. г) Скорость облака тем выше, чем севернее и восточнее располагается его предполагаемый источник на Солнце. е) Максимальные значения магнитного поля МО отвечают источникам в районе солнечного полуденного меридиана и растут от значений 10 нТл (экватор) до 50 нТл с увеличением широты к средним значениям. ж) Модуль Bz-компоненты максимальной напряженности магнитного поля (МП) МО имеет минимум в районе гелиографического экватора и максимум в районе полуденного меридиана равном ~20-25 нТл. з) У зависимости широтного угла вектора МП МО от минимальной широты протяженного солнечного источника и соответствующей ей долготы существует минимум ~0° модуля широтного угла в районе гелиографического экватора и максимум ~60-90° в районе полуденного меридиана. С ростом солнечной широты источника широтный угол растет, а с ростом солнечной долготы – уменьшается. и) Модуль долготного угла вектора МП МО имеет

максимум для протяженного солнечного источника с минимальной широтой и соответствующей ей долготой в районе гелиографического экватора и в районе полуденного меридиана, соответственно. С ростом солнечной широты и долготы долготный угол уменьшается.
Определена связь параметров солнечных источников с интенсивностью магнитосферных суббурь (усиление западного электроджета - AL индекс).
а) Увеличение наблюдаемых экстремумов индекса AL с приближением минимальной широты протяженного солнечного источника к экватору.
б) Для северо-западной части солнечного диска имеет место прямая зависимость индекса AL от долготы, соответствующей минимальной широте источника.
в) Суббуревые эффективности облаков и их оболочек сопоставимы и определяются расположением солнечных источников аналогичным образом.
(см. список литературы ниже и Приложение 1)

1. Н.А. Бархатов, 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
2. 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
3. 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. Н.А.Бархатов, 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, 2018 (направлена в печать)

2. Обнаружена синхронизация колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля в широких географических пределах в диапазонах периодов 28-38 минут и 68-88 минут опережающая за 2 дня до интенсивной солнечной вспышки. Солнечные вспышки во многих случаях сопровождаются

корональными выбросами массы (КВМ), которые ответственны за возникновение геомагнитоэффективных магнитных облаков. Это позволяет сделать вывод о возможности прогноза солнечной вспышки и КВМ за этот интервал времени.
(см. список литературы ниже)

5. Бархатов Н.А., Обридко В.Н., Ревунов С.Е., Снегирев С.Д., Шадруков Д.В., Шейнер О.А. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как предвестники солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия, Т.56, № 2, С. 265–272, 2016
6. Barkhatov N. A., Obridko V. N., Revunov S. E., Snegirev S. D., Shadrukov D. V., and Sheiner O. A. Long Period Geomagnetic Pulsations as Solar Flare Precursors // ISSN 0016_7932, Geomagnetism and Aeronomy, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 249–255. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.

3. В условиях развития суббури обнаружена синхронизация среднеширотной ионосферной и геомагнитной возмущенности в УНЧ диапазоне с волновыми явлениями Bz компоненты межпланетного магнитного поля на большом долготно-широтном пространстве.
(см. список литературы ниже)

7. Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В. Явление синхронизации ионосферных и геомагнитных УНЧ возмущений в районе станции Казань в геомагнитоспокойный период. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.70-71. 2017
8. Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances on the substorm process background. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. PGI RAS. pp.97-99
9. Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В. Синхронизация геомагнитных и ионосферных возмущений на фоне суббуревого процесса. Труды XXI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г. НИУ ННГУ. с. 90-93. 2017
10. Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V., Revunov S.E. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances over Kazan station // Solar

Terrestrial Physics, 2017, V.3, Iss.4, pp. 11-21, UDC 550.388.2 DOI: 10.12737/szf-33201701
11. Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань // Солнечно-Земная физика, 2017, Т.3, № 4, с. 24-36

4. Показана способность трехмерной токовой системы клина суббури, частью которой является западный электроджет, быть проводником низкочастотных МГД возмущений турбулентных оболочек магнитных облаков солнечного ветра в магнитосферно-ионосферную систему.
(см. список литературы ниже и Приложение 2)

12. О.М. Бархатова, Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев Ионосферная и геомагнитная возмущенность на фоне суббуревых процессов // Тезисы 41-го ежегодного семинара "Физика авроральных явлений", 12-16 марта 2018 г., ПГИ, с. 58
13. 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
14. 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
15. Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А. Внемагнитосферный агент синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в интервалы суббуревых процессов // Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 8
16. 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
17. О.М. Бархатова, Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, Ревунов С.Е. УНЧ Отклик магнитосферно-ионосферной системы на мгд возмущенность оболочки магнитных

облаков // Изв.ВУЗов «Радиофизика», 2018
(направлена в печать)

5. Определены условия возникновения ударных волн перед магнитными облаками путем исследования соотношения звуковых и альвеновских скоростей в солнечном ветре с относительной скоростью магнитных облаков Vотн. Установлено, что основным условием существования ударных волн перед облаками является превышение скорости облака над скоростью солнечного ветра более чем на 50 км/с.
(см. список литературы ниже)

18. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Виноградов А.Б. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.15-16. 2016
19. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Виноградов А.Б. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, P. 74-77, 2016

6. Показано, что дополнительное ускорение магнитных облаков может происходить за счет превышения магнитного давления в их телах над давлением в окружающем солнечном ветре.
(см. список литературы ниже)

20. Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B., Romanov R.V., Yagodkina O.I. Geomagnetic activity structures of magnetic clouds. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 28-29. 2016
21. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б., Романов Р.В. Суббуревая геомагнитная активность, связанная с элементами магнитных облаков. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), С.10. 2016

7. Определены ориентации плоскостей образующихся ударных волн в солнечно-эклиптической системе координат с помощью трехмерного моделирования

касательной плоскости в точке пересечения структуры магнитного облака орбитой патрульного КА.
(см. список литературы ниже)

22. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Условия существования быстрых магнитных облаков солнечного ветра сопровождаемых ударными волнами. Труды XXI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г. НИУ ННГУ. с. 83-85. 2017
23. Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Возможная причина возникновения ударных волн у магнитных облаков солнечного ветра. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.53-54. 2017

8. Сформулированы условия возникновения турбулентных явлений в оболочке магнитного облака, которые определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к ММП поглощаемому ударной волной при ее распространении в солнечном ветре.
(см. список литературы ниже)

24. Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Possible cause of solar wind magnetic cloud shock waves. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. PGI RAS. pp.76-77

9. Показано, что выводы о геомагнитной эффективности магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, сделанные на основе измеренных на КА значений Bz компоненты, требуют учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере. В этом случае прогноз геомагнитного возмущения уточняется.
(см. список литературы ниже)

25. Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия, Т.59, №1, 2019, с. 1-11
26. 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

10. Найдена зависимость степени суббуревой активности, характеризуемой интегральным индексом AL, от ориентацией ударных фронтов магнитных облаков солнечного ветра. Это свидетельствует о зависимости интенсивности суббурь от уровня турбулентности в оболочках магнитных облаков. (см. список литературы ниже и Приложение 3)

27. Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина, Ю.А. Главацкий Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Тезисы 41-го ежегодного семинара "Физика авроральных явлений", 12-16 марта 2018 г., ПГИ, с. 20
28. N.A. Barkhatov, V.G. Vorobjev, S.E. Revunov, O.I. Yagodkina, Yu.A. Glavatsky Substorm activity and shock wave front orientation for interplanetary magnetic clouds // Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018. pp. 7-11
29. Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов, Ю.А. Главацкий Причина зависимости суббуревой активности от ориентации фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Труды XXII Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2018, с. 125-128
30. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака // Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 9
31. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака // Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 11-14
32. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Главацкий Ю.А. Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Геомагнетизм и аэрономия, 2018 (направлена в печать)

11. Определены особенности спектрального состава турбулентных оболочек магнитных облаков (МО)

солнечного ветра (СВ) различной протяженности и переднего края их тел.
а) Характерный диапазон регистрируемых периодов в оболочках разной продолжительности составляет от 15 до 25 минут в низкочастотной области спектра и порядка 5 минут для высокочастотной области.
б) Для оболочек разной продолжительности имеет место резкое ослабление интенсивности возмущений при переходе из оболочки в тело облака.
в) Оболочки малой протяженности характеризуются энергетическим каскадом в область высоких частот, что отвечает турбулентному режиму возмущений.
г) Протяженные оболочки содержат возмущения на характерных частотах в интервале 3-10 мГц. Они представляют собой структуры с сильными флуктуациями магнитного поля, скорости и концентрации, превышающими их значения в теле облака.
д) Особенностями протяженных оболочек является пространственное распределение спектральных максимумов по оболочке – возмущения магнитного поля и параметров солнечного ветра следуют группами. Внутри группы регистрируются каскады спектральных максимумов в область высоких частот. Это свидетельствует о наличие в оболочках повторяющихся турбулентных режимов.
е) Вейвлет-спектры для тел облаков обеих групп не имеют заметных отличий. Подразделение на диапазоны дает высокочастотные возмущения с характерными периодами 2,5 - 10 минут и низкочастотные с периодами порядка 15-25 минут.
Установлена сравнительная геомагнитная эффективность оболочек и тел магнитных облаков (на основе Bz компоненты ММП).
а) За развитие суббуревой активности для облаков с непродолжительными оболочками в основном ответственны оболочки облаков.
б) Интегральная плотность абсолютных значений Bz компоненты ММП внутри тел облаков обладающих продолжительными оболочками заметно превышает плотность в их оболочках.
в) Таким образом, геоэффективность структур облаков зависит от продолжительности их оболочек.
(см. список литературы ниже и Приложение 4)

33. Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Главацкий Ю.А. Учет геомагнитного поля при

распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.40-41. 2016
34. Манакова Ю.В., Пехтелева К.А., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Пространственно-временной анализ возмущений диапазона Pc4-5 в периоды магнитных бурь корреляционно-скелетонным методом // Вестник Мининского университета, № 1, 2016, 1-6
35. Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V., Yagodkina O.I. The magnetosonic waves in the mid-latitude ionosphere appeared within preparation phase of strong earthquakes. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 223. 2016
36. Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Главацкий Ю.А. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере // Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, P. 104-107, 2016
37. N.A. Barkhatov, 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 59, No 1, 2019 (принята к печати)

12. Динамика индекса авроральных электроджетов AL управляется интегральным параметром комбинирующим параметры плазмы солнечного ветра. Созданный нейросетевой алгоритм позволяет прогнозировать динамику индекса в процессе суббури по параметрам солнечного ветра получаемым с патрульного КА с коэффициентом корреляции свыше 0.7. Такой прогноз может применяться для восстановления как отдельных суббурь, так и суббурь, вызванных медленными магнитными облаками.
(см. список литературы ниже)

38. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Гелиогеофизнческие приложения современных методов обработки цифровых данных: монография. М.: ФЛИНТА. Нижний Новгород: Мининский университет, 2017. 316 с.

39. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.14-15. 2016
40. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), С.11. 2016
41. Barkhatov N.A., Yagodkina O.I., Revunov S.E., Vorobjev V.G. Solar wind driving and formation of substorm activity. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 29. 2016
42. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента // Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, P. 27-30, 2016
43. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия, Т.57, № 3, с. 273–279, 2017
44. Barkhatov N. A., Vorob’ev V. G., Revunov S. E., and Yagodkina O. I. Effect of Solar Dynamics Parameters on the Formation of Substorm Activity // Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 57, No. 3, pp. 251–256, 2017.
45. Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 10
46. Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И.

Ягодкина Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 15-18

13. Установлена нелинейная связь индекса AL со значениями By и Bz компонент ММП в магнитном облаке с учетом их 90 мин предыстории. Качество такого нейросетевого прогноза динамики AL при этом достигает 80%. Такой подход может успешно применяться для прогноза суббурь, вызванных быстрыми магнитными облаками.
(см. список литературы ниже)

47. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Главацкий Ю.А. Причинно-следственная связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с типом магнитного облака солнечного ветра. Труды XXI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г. НИУ ННГУ. с. 86-89. 2017
48. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Glavatskij Yu.A. The causal relationship between the dynamics of high-latitude geomagnetic activity and type of solar wind magnetic cloud. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. PGI RAS. pp.74-75
49. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Виноградов А.Б., Главацкий Ю.А. Связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с изменениями параметров магнитных облаков. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.54. 2017
50. Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов, В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина Исследование взаимосвязи высокоширотной геомагнитной активности с параметрами межпланетных магнитных облаков с использованием искусственных нейронных сетей // Геомагнетизм и аэрономия, 2018, т. 58, № 2, с. 155–162
51. N.A. Barkhatov, S.E. Revunov, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina Studying the Relationship between High-Latitude Geomagnetic Activity and Parameters of Interplanetary Magnetic Clouds with the Use of Artificial Neural Networks // Geomagnetism and Aeronomy, 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 147–153. © Pleiades Publishing, Ltd., 2018

		14. Найдено частотно-пространственное распределение низкочастотных возмущений отвечающих модельной конфигурации магнитного облака представляемой бессиловой цилиндрически симметричной магнитной потоковой трубкой (см. Приложение 5).
3.6.	Сопоставление результатов, полученных при реализации с мировым уровнем	Корональные выбросы массы (КВМ) являются одним из основных факторов космической погоды. Одним из представителей корональных выбросов массы являются магнитные облака. На переднем фронте магнитных облаков часто образуются ударные волны, которые характеризуются резким одновременным скачком параметров солнечного ветра (скорость, концентрация, температура). За ударными волнами следуют области с флуктуациями компонент ММП и повышенной плотностью, называемые оболочкой облака. Далее располагается собственно тело облака, содержащее в своем объеме значительную отрицательную Bz компоненту ММП (в солнечно-эклиптической системе координат) [Echer and Gonzalez, 2004; Wu and Lepping, 2002; Zhang et al., 2004]. Тело магнитного облака характеризуется пониженными значениями температуры, скорости, концентрации, отношения газокинетического давления к магнитному и монотонным вращением вектора ММП [Lepping et al., 1990; Bothmer and Schwenn, 1998; Бархатов и др, 2009; Николаева и др., 2011], благодаря которому облака являются наиболее геоэффективными представителями КВМ. Вместе с тем, известно [Бархатов и др., 2014a], что магнитные облака, имеющие перед собой оболочку, являются источниками, как правило, сильных или экстремальных магнитных бурь. К настоящему времени разработано несколько моделей для описания структуры магнитного поля в магнитных облаках. Широкое применение получил бессиловой подход, основанный на предположении параллельности (антипараллельности) тока в облаке линиям магнитного поля. Данный подход применяют для тороидальной [Romashets and Vandas, 2001; Vandas et al., 2002] и цилиндрической [Vandas ey al., 1996; Бархатов и др, 2009] конфигураций облака. Разработаны также модели магнитных облаков, учитывающие деформацию структуры облака при движении в потоке медленного солнечного ветра [Hidalgo et al., 2002a; Hidalgo, 2003]. Описание магнитного поля в магнитных облаках может быть выполнено и на не бессиловых моделях, учитывающих наличие в облаке перпендикулярной

компоненты тока [Hidalgo et al., 2002b]. Все описанные модели согласуются друг с другом и дают хорошее соответствие модельной и регистрируемой динамики магнитного поля в теле облаке. Однако ни одна из этих моделей не учитывает наличие ударной волны и оболочки перед облаком. Выполняемый проект эти важные обстоятельства принимает во внимание. Некоторое количество результатов выполнения Проекта мы включили в число важнейших (см. п.3.6, номера 1-14).

В настоящее время существует возможность установления солнечных источников магнитных облаков, которые могут быть основаны на визуальном анализе данных каталога корональных выбросов LASCO и фотографий солнечной поверхности, полученных различными инструментами на КА SOHO, SDO и STEREO A, B. Традиционный способ статистического исследования источников КВМ и затем выбросов основанный на данных спектрометрического коронографов имеет в силу разных причин низкую достоверность[Wang et al., 2011]. Использование данных о состоянии солнечной поверхности с КА SDO, SRETEO A, B и SOHO, ведущих наблюдение с трех различных углов зрения, позволяет оценить ориентацию солнечного источника и принятую совпадающей с ней ориентацию магнитного поля возникающего магнитного облака. Однако, эти возможности по интерпретации данных каталогов не используются целенаправленно по отношению к возникновению именно магнитных облаков. Вместе с тем это представляет принципиальный интерес, поскольку именно облака являются наиболее геоэффективными корональными выбросами. Учитывая особенности магнитных облаков, заключающиеся в том, что они являются объектами имеющими направление переноса, ориентацию и составляющие части, становится обоснованным предпринятое нами статистическое и корреляционное исследование локализации их источников. Это оригинальное исследование нацелено на получение связи координат солнечных областей локализации источников плазменных потоков с параметрами переносимых в солнечном ветре облаков и с уровнем геомагнитной активности. Здесь принята модель МО в виде бессиловой магнитной трубки, уносимой от Солнца при наблюдаемой эрупции [Бархатов и Калинина, 2010]. Локализационные и ориентационные параметры

солнечных источников КВМ типа магнитных облаков (МО) таковы, что чем источник ближе к гелиографическому экватору, тем более он вытянут в экваториальном направлении. И наоборот, чем дальше источник от экватора, тем он более вытянут в меридиональном направлении. По всей вероятности это является следствием влияния дифференциального вращения фотосферы на источник. При этом углы наклона протяженного источника уменьшаются с увеличением долготы. Последнее может быть объяснено особенностями расширения магнитного облака, вследствие которых облака из «лежачих» источников с периферии солнечного диска предпочтительно расширяются в экваториальном направлении и вероятнее могут воздействовать на околоземное пространство, чем облака из «стоячих» источников. Облака из областей вблизи нулевого меридиана достигнут земной магнитосферы независимо от ориентации протяженных источников. С увеличением широты источника уменьшается вероятность зарегистрировать магнитное облако в плоскости эклиптики, для более протяженных источников (более масштабные облака) расположенных на высоких широтах и по краям солнечного диска, вероятность регистрации облаков в околоземном пространстве существует. Действительно, более протяженные источники на краях солнечного диска, в отличие от непротяженных, имеют шанс сгенерировать расширяющиеся облака, которые достигнут магнитосферы.
Относительно скорости облака можно утверждать, что она тем выше, чем севернее и восточнее располагается его предполагаемый источник на Солнце. Наблюдаемые увеличения числа высокоскоростных событий МО привязанных к восточной части солнечного диска и числа медленных событий - к западной части, отражают последствия спирального движения потока солнечного ветра обусловленного солнечной угловой скоростью. В первом случае спираль закручена слабее и МО регистрируются ближе к линии Солнце-Земля. Максимальные значения магнитного поля МО отвечают источникам в районе солнечного полуденного меридиана и растут от значений 10 нТл (экватор) до 50 нТл с увеличением широты к средним значениям. Модуль Bz-компоненты максимальной напряженности магнитного поля (МП) МО имеет минимум в районе гелиографического экватора и максимум в районе

полуденного меридиана равном ~20-25 нТл.
У зависимости широтного угла вектора МП МО от минимальной широты протяженного солнечного источника и соответствующей ей долготы существует минимум ~0° модуля широтного угла в районе гелиографического экватора и максимум ~60-90° в районе полуденного меридиана. С ростом солнечной широты источника широтный угол растет, а с ростом солнечной долготы – уменьшается.
Такая особенность в поведении полярного угла может свидетельствовать о наиболее вероятном формировании «лежачих облаков» источниками, находящимися на низких широтах (вблизи солнечного экватора) [Бархатов и Калинина, 2010]. Модуль долготного угла вектора МП МО имеет максимум для протяженного солнечного источника с минимальной широтой и соответствующей ей долготой в районе гелиографического экватора и в районе полуденного меридиана, соответственно. С ростом солнечной широты и долготы долготный угол уменьшается.
Исследование связи параметров источников КВМ с геоэффективностью магнитных облаков проводилось по данным о глобальной и суббуревой геомагнитной активности на основе индекса AL. Выполнен анализ полученных зависимостей максимальных амплитуд индексов геомагнитной активности от угла ориентации солнечного источника относительно плоскости экватора. Он показал, что геомагнитная активность магнитных облаков увеличивается за счет облаков, солнечные источники которых имеют значительный угол к плоскости солнечного экватора. Имеет место увеличение наблюдаемых экстремумов индекса AL с приближением минимальной широты протяженного солнечного источника к экватору. Для северо-западной части солнечного диска наблюдается прямая зависимость индекса AL от долготы, соответствующей минимальной широте источника. Важно, что суббуревые эффективности облаков и их оболочек сопоставимы и определяются расположением солнечных источников аналогичным образом. Полученные зависимости [Бархатов и др., 2018а; Barkhatov et al., 2018 c; Ревунова и др., 2018; Бархатов и др., 2018б] (см. также Приложение 1) согласуются с ранее отмеченными фактами связи геомагнитной активности с параметрами источников магнитных облаков солнечного ветра [Kilpua et al., 2011; Бархатов и др., 2014б; Бархатов и др., 2014в; Barkhatov et. al., 2014b].

Совместное использование вейвлет-скелетонной пост процессинговой обработки сигналов и нейросетевого подхода, который известен в научной практике [Uwamahoro et al., 2012], позволил обнаружить синхронизацию низкочастотных (периоды 28-38 и 68-88 минут) колебаний геомагнитного поля на магнитных станциях, расположенных в широких географических пределах, опережающую на 2 дня интенсивную солнечную вспышку [Бархатов и др., 2016д; Barkhatov et. al., 2016a].
Эти результаты согласуются с результатами ранее проведенных исследований по установлению эффекта возрастания длиннопериодных пульсаций H-компоненты магнитного поля Земли на временном интервале за 1-2 суток до мощных солнечных вспышек [Снегирев и др., 2005; Снегирев и др., 2009].
Единственной возможностью усиления колебаний геомагнитного поля и их синхронизации в широких географических пределах может служить увеличение ионосферной проводимости под действием солнечного ионизирующего электромагнитного излучения, опережающего вспышку, и как следствие – усиление ионосферных колебательных токовых систем.
Колебания интенсивности этого излучения проявляются в геомагнитных пульсациях, начиная с периодов порядка и более часа, что можно связать с соответствующей инерционностью ионосферы [Barkhatov et al., 2004]. Выполненное нами исследование дает возможность прогноза солнечной вспышки, а также КВМ, включая геомагнитоэффективное магнитное облако, которое часто за ней следует.
В условиях развития суббури на большом долготно-широтном пространстве в ночном секторе среднеширотной ионосферы обнаружена [Бархатова и др., 2017a; Barkhatova et al., 2017b; Бархатова и др., 2017б; Barkhatova et al., 2017a; Бархатова и др., 2017в] синхронизация ионосферной и геомагнитной возмущенности с волновыми явлениями Bz компоненты межпланетного магнитного поля. В рассматриваемом случае возмущения Bz компоненты ММП оказываются внемагнитосферным источником возмущения в УНЧ диапазоне. Условия для развития суббури при этом создаются сменой ориентации Bz компоненты, увеличением скорости солнечного ветра и опережающим увеличением значений его

концентрации. Одновременно с развитием суббуревой активности происходит вытягивание силовых линий в геомагнитный хвост, которые и возмущаются УНЧ колебаниями замагниченного солнечного ветра. Таким образом одним из источников МЗ волн в рассматриваемом диапазоне частот может являться суббуревая активность [Белаховский и др., 2015], вызываемая возмущениями в солнечном ветре. Обнаруженные нами на большой пространственной области МЗ возмущения могут быть генерированы нестабильностью западного электроджета, который участвует в суббуревом процессе в качестве элемента крупномасштабной трёхмерной токовой системы – токового клина суббури (SCW).
Прямые спутниковые измерения параметров межпланетной среды показали, что быстрые МО с магнитозвуковым числом Маха M>>1, предваряются ударными волнами (УВ). За ударной волной следует переходная область – оболочка облака с сильными нерегулярностями плазмы и магнитного поля [Kilpua et al., 2012]. Изучение УНЧ возмущений, возникающих в ионосфере и геомагнитном поле во время прохождения магнитосферы Земли через турбулентную оболочку магнитных облаков (МО) вызывающих суббури различной интенсивности показало, что в рассмотренные интервалы зарегистрированы синхронные возмущения ПЭС в ночной ионосфере и горизонтальной компоненте геомагнитного поля в диапазоне 10-35 минут. Результаты спектрального вейвлет анализа и преобразования ННТ (Hilbert-Huang Transform) Bx, By и Bz компонент межпланетного магнитного поля (ММП), скорости и концентрации протонов солнечного ветра свидетельствуют о наличии в них возмущений с указанными периодами. Это означает, что имеет место УНЧ отклик на МГД возмущенность оболочки магнитных облаков, который может объясняться магнитосферно-ионосферными связями, возникающими на фоне развития суббури. Действительно, в этот период возникает интенсивная трехмерная токовая система – токовый клин суббури или Substorm Current Wedge (SCW) [McPherron at al., 1973; McPherron and Barfield, 1980; Ohtani et al., 1991], которая связывает активные области магнитосферы с высокоширотной ионосферой. Таким образом нами показана способность трехмерной токовой системы клина суббури, частью которой является западный электроджет, быть проводником низкочастотных МГД

возмущений турбулентных оболочек магнитных облаков солнечного ветра в магнитосферно-ионосферную систему. МГД возмущенность в ионосферно-магнитосферной системе отсутствует в том случае, когда не развиты суббуревые процессы. Это может объясняться тем, что в этот период не сформирована трехмерная токовая система SCW, которая является проводником низкочастотных МГД возмущений из околоземного космического пространства внутрь земной магнитосферы. Фактически мы проверили предположение, что за низкочастотные МГД ночные возмущения в геомагнитном поле и ионосфере, происходящие на фоне суббуревых процессов, несет ответственность внемагнитосферный волновой агент, находящийся и околоземном космическом пространстве [Бархатова и др., 2018а; Barkhatova et al., 2018c; Бархатова и др., 2018б; Бархатова и др., 2018в; Бархатова и др., 2018г; Бархатова и др., 2018д] (см. также Приложение 2).
Исследования геомагнитной активности, связанной с магнитными облаками, показали, что для некоторых событий начало глобальных и высокоширотных геомагнитных возмущений соответствует ударной волне и оболочке [Клейменова и др., 2003; Barkhatov et al., 2015; Бархатов и др., 2018к]. Таким образом, наличие оболочки у магнитных облаков увеличивает их геоэффективность и при следовании методам прогнозирования геомагнитной активности [Бархатов и др., 2011; Бархатов и др., 2014б], основанных на учете значений отрицательной Bz-компоненты ММП в теле облака, снижает их качество. Более точное прогнозирование геомагнитной активности требует учета потенциальной геомагнитной эффективности физических процессов на переднем фронте “быстрых” магнитных облаков. Параметры оболочек магнитных облаков, достигших магнитосферы и вызвавших геомагнитные возмущения, обусловлены эволюцией замагниченного солнечного ветра в процессе его поглощения быстро двигающимися магнитными облаками. Соответственно, может иметь место влияние изменившихся на ударной волне облака параметров солнечного ветра на геомагнитную активность. При этом надо иметь в виду то, что параметры турбулентной оболочки, зарегистрированные на КА, отличаются от параметров оболочки достигшей магнитосферы. Для оценки вклада в геомагнитную активность параметров турбулентных оболочек облаков, мы принимали во

внимание именно это обстоятельство. В результате качество прогноза геомагнитной активности, вызванной “быстрыми” магнитными облаками, повышается.
Выполнение заявляемого исследования потребовало формулировки условий существования магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, уточнения границ структурных элементов магнитных облаков, анализа эволюции ориентации ММП вследствие его взаимодействия с набегающей ударной волной магнитного облака, оценки связи зарегистрированных и расчетных параметров турбулентной оболочки с высокоширотной суббуревой активностью [Бархатов и др., 2016з; Бархатов и др., 2016б].
В связи с вышеизложенным мы обратили внимание на зависимость высокоширотной геомагнитной активности от существования структурных элементов сопровождающих «быстрые» магнитные облака. Для этого предварительно определены условия возникновения ударных волн перед магнитными облаками путем исследования соотношения скоростей звуковых и альвеновских волн в солнечном ветре с относительной скоростью магнитных облаков Vотн. Установлено, что основным условием существования ударных волн перед облаками является превышение скорости облака над скоростью солнечного ветра более чем на 50 км/с. При этом относительная скорость облака оказывается выше скоростей звуковых и альвеновских волн в солнечном ветре. На основе соотношений на границе солнечный ветер – магнитное облако суммарного газокинетического и магнитного давления, газокинетического и магнитного давлений в отдельности, а также зависимости относительной скорости магнитных облаков от этих двух давлений, показано, что ускорение магнитных облаков возможно происходит за счет превышения магнитного давления в их телах над давлением в окружающем солнечном ветре [Barkhatov et al., 2017a].
Уточнение границ элементов магнитного облака мы выполняли 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 [Barkhatov et al., 2016b; Бархатов и др., 2016a].
Показано, что выводы о геоэффективности магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, требуют учета изменения на ударном разрыве компонент магнитного поля солнечного ветра, для чего установлены локальные ориентации плоскостей ударных волн магнитных облаков. Расчет ожидаемой на границе магнитосферы последовательности значений геоэффективной Bz компоненты в солнечно-магнитосферной системе координат выполнен разными способами. Однако, корреляционный анализ уровня связи динамики AL индекса со значениями Bz 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 суммарной величиной ΣVBzs. Эта суммарная величина получена суммированием измененной на ударной волне Bz компоненты и зарегистрированных на КА значений этой компоненты и дальнейшим накоплением 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., 2017г]). 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 Bz компоненты и с вычисленной последовательностью значений Bz свидетельствует о необходимости учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере [Бархатов и др., 2019; Barkhatov et al., 2019].
Динамические характеристики ударной волны облака и

его оболочки, как элементов магнитных облаков, при взаимодействии с земной магнитосферой могут привести также к заметному росту магнитных возмущений на земной поверхности [Клейменова и др., 2003; Манакова и др., 2016]. В связи с этим, становится понятной актуальность экспериментального и теоретического анализа связи суббуревой активности с наличием турбулентных областей в солнечном ветре [Бархатов и др., 2017г; Бархатов и др., 2018е].
В работе [Бархатов и др., 2001] обращено внимание на то, что турбулентные явления в оболочке во многом определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к межпланетному магнитному полю (ММП) солнечного ветра поглощаемому ударной волной при ее распространении в потоке солнечной плазмы. Применение предложенного нами ранее метода поиска ударных волн в потоке солнечного ветра [Бархатов и Ревунов, 2010] и определение ориентации их ударных плоскостей позволило установить динамику угла между ММП непосредственно перед фронтом ударной волны и нормалью к её фронту [Бархатов и др., 2017а; Бархатов и др., 2017б].
Выполненное нами сопоставление степени суббуревой активности, характеризуемой интегральным индексом AL, с ориентацией ударных фронтов свидетельствует о зависимости геомагнитных возмущений от уровня турбулентности в переходной области. На этом основании делается вывод о росте уровня интенсивности турбулентных процессовв оболочке облака с уменьшением величины магнитного поля проникающего в оболочку и выполняющего стабилизирующую роль для турбулентных МГД возмущений. В результате исследования было показано, что в случаях квазипараллельных ударных волн магнитных облаков интенсивность суббуревых процессов нарастает. Полученные выводы относительно связи ориентации плоскости ударной волны магнитных облаков с уровнем турбулентности в оболочке облака определяющей степень суббуревой активности, подкреплены сопоставлением геомагнитной активности с выполнением условий подавления в оболочке облака турбулентных движений. В целом выполненное исследование показало, что теоретические представления о возможной связи ориентации фронта ударной волны магнитного облака и, соответственно, уровня турбулентности в оболочке облака, с уровнем суббуревой активности экспериментально

подтверждаются. Таким образом, результаты, полученные при обработке экспериментальных данных, согласуются с аналитическими оценками.
Во многих случаях облака сопровождаются турбулентными оболочками следующими за ударными волнами. Оболочки являются следствием МГД явлений обусловленных движением облаков в замагниченном солнечном ветре. Однако, в связи со сложной внутренней структурой оболочек, относительно мало известно о распределении плазменных вариаций и магнитного поля в них. Исследования геомагнитной активности, связанной с магнитными облаками, показали, что для некоторых событий начало глобальных и высокоширотных геомагнитных возмущений соответствует ударной волне и оболочке [Клейменова и др., 2003; Barkhatov et al., 2015]. Таким образом, наличие оболочки у магнитных облаков увеличивает их геоэффективность и при следовании методам прогнозирования геомагнитной активности [Бархатов и др., 2011], основанных только на учете значений отрицательной Bz компоненты ММП в теле облака, снижает их качество.
Мы [Бархатов и др., 2011], так же как и многие исследователи [Farrugia et al., 1998], обратили внимание на неудовлетворительный прогноз геомагнитных бурь в случаях с облаками, имеющими оболочки. Действительно, при прогнозе геомагнитной возмущенности исследователи учитывают только параметры тела облака, в то время, как параметры оболочки игнорируются. Примеры применения нашего метода поиска облаков при работе нашей программы показали, что хотя параметры облака с оболочкой определяются верно, но прогноз интенсивности геомагнитной бури выполняется с ошибкой. В наших исследованиях нам удалось связать с параметры таких облаков с фазами полярных суббурь. Мы выяснили в каких случаях облако получает оболочку и с вязали уровень ее турбулентности с уровнем ее суббуревой активности. Нам удалось показать, что возмущенные характеристики оболочки определяются не только характеристиками облака, но и замагниченного солнечного ветра, окружающего облако (см. выше). Это согласуется с [Kilpua et al., 2012], где отмечено, что геоэффективность МО зависит не только от его структуры, но и от параметров окружающего замагниченного солнечного ветра. Опыт изучения аналогичных турбулентных процессов происходящих в

магнитослое за земной ударной волной позволил нам исследовать спектральный состав оболочек магнитных облаков (МО) солнечного ветра (СВ) различной протяженности и переднего края их тел и сделать выводы. В [Kilpua et al., 2013b] также анализировались УНЧ флуктуации ММП в оболочках облаков. Обращено внимание на то, что свойства облаков влияют на уровень и распределение мощности УНЧ в оболочке. Например, в оболочках сильных или быстрых облаков сильны УНЧ и есть значительные расхождения в мощности по всей оболочке. Более слабые или медленные облака имеют слабый уровень УНЧ и резкий спад мощности на их переднем фронте. Нам удалось дополнить эти результаты о отметить новые особенности распределения УНЧ возмущений в оболочках отличающихся по продолжительности [Бархатов и др., 2018в; Barkhatov et al., 2018b; Бархатов и др., 2018г; Бархатов и др., 2018д; Бархатов и др., 2018е; Бархатов и др., 2018 ж] (см. также Приложение 3).

Анализ спектральный состав оболочек магнитных облаков (МО) солнечного ветра (СВ) различной протяженности и переднего края их тел для 33 событий позволил выделить две группы событий. Первая включала в себя облака с оболочками малой протяженности менее 2 часов (2 события) и события с продолжительными оболочками более 2 часов (31 событие). Анализом динамики модуля межпланетного магнитного поля, скорости и концентрации солнечного ветра были установлены границы оболочек облаков и отмечены области перехода к телу облака. Полученные результаты были проверены с помощью сонограмм. Для событий первой и второй группы переход к телу облака отмечается как резкое ослабление интенсивности возмущений при входе в тело. Результаты исследования спектров фурье оболочек рассматриваемых событий демонстрируют их значительное отличие для разных групп событий. В оболочках малой протяженности спектр частот характерен для турбулентного режима возмущений. В более протяженных оболочках возникают характерные частоты в интервале 3-10 мГц. Это может означать, что продолжительные оболочки не являются в полной мере турбулентными областями. Они представляют собой структуры с сильными флуктуациями магнитного поля, скорости и концентрации СВ, превышающими их значения в теле облака. В телах магнитных облаков обеих групп

присутствуют флуктуации с характерными частотами 1-10 мГц. Более детальный анализ частотно-пространственного распределения интенсивности возмущений в оболочках облаков показывает, что для событий первой группы регистрируется интенсивная возмущенность на протяжении всей оболочки с каскадом спектральных максимумов в высокочастотную область. Это подтверждает наличие турбулентного режима во всей оболочке такого облака с постепенным затуханием турбулентных процессов в малых масштабах в задней части оболочек. У событий второй группы имеет место пространственное распределение спектральных максимумов по оболочке – возмущения магнитного поля и параметров солнечного ветра следуют группами. Внутри группы регистрируются каскады спектральных максимумов в область высоких частот, что свидетельствует о наличие по оболочке повторяющихся турбулентных режимов только в данных областях. Характерный диапазон регистрируемых периодов в оболочках для обеих групп событий составляет от 15 до 25 минут в низкочастотной области спектра и порядка 5 минут для высокочастотной области. Вейвлет-спектры для тел облаков обеих групп не имеют заметных отличий. В телах изучаемых событий регистрируются как высокочастотные возмущения с характерными периодами 2,5 - 10 минут, так и низкочастотные с периодами порядка 15-25 минут [Бархатов и др., 2016е; Манакова и др., 2016; Barkhatova et al., 2016; Бархатов и др., 2016ж; Barkhatov et al., 2019a] (см. также Приложение 4).
В нашем исследовании поведения индекса авроральных электроджетов в интервалы суббурь нам удалось показать, что AL управляется интегральным параметром комбинирующим параметры плазмы солнечного ветра. Созданный для этих целей нейросетевой алгоритм позволяет прогнозировать динамику индекса в процессе суббури по параметрам солнечного ветра получаемым с патрульного КА с коэффициентом корреляции свыше 0.7. Такой прогноз может применяться для восстановления как отдельных суббурь, так и суббурь, вызванных медленными магнитными облаками.
Определенные успехи в конструировании и прогнозировании AL индекса с использованием ИНС были достигнуты и ранее [Hernandez et al., 1993; Weigel et al., 1999, 2003; Valach et al., 2014 и других]. Так, в работе [Hernandez et al., 1993] использовались нейронные сети для прогнозирования AL индекса с 15

мин разрешением на основе данных по VBs и AL, где V – направленная к Земле компонента скорости солнечного ветра, а Bs – южная компонента ММП. В работе [Weigel et al., 1999, 2003] были использованы те же данные, что и в предыдущем исследовании, но эти авторы создали новую архитектуру ИНС с различными ветвями, учитывающими уровень магнитной активности. В работах [Бархатов и др., 2003; Бархатов и др., 2004] предложен нейросетевой способ восстановления классических индексов авроральных электроджетов по современным индексам, рассчитанным на основе геомагнитных данных полученных на сокращенном количестве обсерваторий. В настоящее время на сайте (http://spacelab.mininuniver.ru/?page_id=81) функционирует нейросетевой интернет-сервис восстановления и публикации классических индексов по ограниченным данным. Такая задача возникает в связи с тем, что в последнее десятилетие часть обсерваторий из списка [Davis and Sugiura, 1966], перестала регулярно поставлять данные для расчета индексов AE(AL, AU) [Бархатов и Ревунов, 2017в; Бархатов и др., 2016и; Бархатов и др., 2016в; Barkhatov et al., 2016c; Бархатов и др., 2016г; Бархатов и др., 2017г; Barkhatov et al., 2017b; Бархатов и др., 2018з; Бархатов и др., 2018и].
В своем исследовании мы учли то обстоятельство, что процесс накопления энергии возможен только при условии непрерывного поступления в магнитосферу кинетической энергии частиц (N*V^2) солнечного ветра на интервале подготовительной фазы суббури (N – плотность, а V - скорость солнечного ветра). Постепенное накопление энергии невозможно учесть на основе мгновенных значений (Bz, N, V), поэтому для описания процесса формирования суббури в настоящей работе нами предлагается использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы ∑[N*V^2] наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра. Алгоритм описания процесса формирования суббури реализован с помощью инструмента в виде ИНС типа Элмана путем восстановления AL индекса с использованием динамики вводимого нами интегрального параметра. Применение интегрального параметра на входе ИНС позволяет имитировать структуру и интеллектуальные свойства биологической нервной системы, поскольку таким способом обеспечивается дополнительная реализация памяти о предыстории моделируемого процесса.

Причинно-следственные связи динамики высокоширотной геомагнитной активности (по индексу AL) с типом магнитного облака солнечного ветра, как наиболее геоэффективным корональным объектом мы изучаем с использованием искусственных нейронных сетей. Несмотря на многообразие конфигураций магнитных облаков и способов их воздействия на земную магнитосферу, зависящих в том числе и от прицельных параметров облака, обязательной особенностью является поворот вектора ММП внутри облака, что обеспечивает возникновение геоэффективной отрицательной Bz компоненты. Последнее, однако, не означает, что МО всегда вызывают глобальные магнитные бури, но с ними часто бывают связаны суббуревые процессы [Henderson et al., 1996]. Структура быстрых магнитных облаков заметно усложняется возникновением ударной волны и турбулентной области за ней. В связи с этим представляет интерес установление степени участия элементов структуры магнитных облаков при формировании высокоширотной геомагнитной активности. Как и в [Бархатов и др., 2016е], мы применяем нейросетевой подход с использованием рекуррентной нейронной сети типа Элмана. Как и ранее, здесь предполагается создание быстрой нейросетевой модели основанной на поиске оптимальных физически связанных входных и выходных параметров, характеризующих воздействие на магнитосферу конкретного плазменного потока, зависящего от типа магнитного облака. Однако особенностью данного исследования является использование разных нейросетевых архитектур, позволяющих последовательно подкреплять окончательное обучение последовательностями AL индекса, синтезируемыми на первых этапах. Проведенные исследования показали, что для восстановления последовательности AL индекса с эффективностью до 80 % достаточно использование в качестве входных параметров нейросетевой модели By и Bz компонент ММП с учетом их 90 мин предыстории. Это означает, что в периоды взаимодействия магнитосферы Земли с магнитными облаками существует тесная нелинейная связь между уровнем магнитной активности в высоких широтах и динамикой By и Bz компонент ММП. Для восстановления отдельных суббурь и суббурь, вызванных медленными магнитными облаками с высокой эффективностью могут быть

		применены нейросетевые модели созданные в исследовании [Бархатов и др., 2017г]. Для восстановления суббурь, вызванных быстрыми магнитными облаками, может успешно применяться ИНС, разработанная в данном исследовании. Важно, что разработанная модель восстановления AL индекса может быть использована как детектор магнитных облаков [Бархатов и др., 2017д; Barkhatov et al., 2017c; Бархатов и др., 2017е; Бархатов и др., 2018к; Barkhatov et al., 2018a]. Выполнены аналитические и численные расчеты по установлению частотно-пространственное распределение низкочастотных возмущений отвечающих модельной конфигурации магнитного облака представляемой бессиловой цилиндрически симметричной спиральной магнитной потоковой трубкой. Общая идея подхода к решению этой задачи согласуется с работами [Михайловский, 1978]. Учитывая грандиозные размеры магнитных облаков, расчеты проводились в диапазонах крайне низких частот. Они продемонстрировали существование волновых процессов, которые проявляются в распределенных по амплитуде магнитных колебаниях поперек спиральной потоковой трубки [см. Приложение 5]. Результаты, полученные при выполнении Проекта, соответствуют мировому уровню, согласуются с результатами отечественных и зарубежных исследователей. Они проясняют ранее неизвестные обстоятельства воздействия составляющих элементов магнитных облаков солнечного ветра на магнитосферно-ионосферную систему, в результате чего изменяется интенсивность и спектральный состав геомагнитных и ионосферных возмущений. При выполнении Проекта были разработаны оригинальные подходы и созданы вычислительные программы позволяющие выполнять прогноз внутримагнитосферных последствий солнечной активности, необходимый для осуществления различного рода технической деятельности.
3.7.	Методы и подходы, использованные при реализации Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)	Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта по изучению характеристик структур магнитных облаков солнечного ветра и их геомагнитной эффективности, ориентированы на современные возможности, связанные с использованием данных высокого разрешения параметров солнечного ветра и

околоземного пространства, а также высококачественных фотографических данных окрестностей Солнца. При выполнении исследований мы опираемся на комбинацию разрабатываемых нами оригинальных подходов и методов определения фундаментальных зависимостей в изучаемых физических процессах и оценках их достоверности. Одновременно нами использованы и традиционные статистические, корреляционные, нейросетевые, аналитические и численные подходы. В процессе работы мы создали Базу данных о параметрах магнитных облаков, включая быстрые облака, имевшие ударную волну и турбулентную оболочку. В ней сведены исчерпывающие характеристики солнечных источников КВМ и магнитных облаков. В Базу включены также и сведения об облаках, взятые из литературных источников. Приведенные в Базе данные использованы при выполнении этого Проекта и будут использоваться далее в планируемых нами исследованиях.
Проблему установления ориентации источников корональных выбросов массы (КВМ) рождающихся замагниченные плазменные потоки, включая магнитные облака (МО), решение которой необходимо для выводов об их геомагнитной эффективности, мы устраняем оценкой конфигурации магнитных полей активных областей поверхности Солнца по стерео фотографиям высокого качества. Такие фотографические данные предоставляют современные инструменты космических аппаратов (КА), например, STEREO A, Данные с патрульного КА SOHO уже дают конфигурацию магнитных облаков в процессе из движения к Земле. Все эти данные позволяет нам делать вывод об эволюции их ориентации в пространстве. Такая обработка фотографических данных кладется нами в основу описания фундаментальных процессов происходящих с облаками в солнечном ветре и прогноза геомагнитных возмущений уже в момент зарождения магнитных облаков[Barkhatov et al., 2018c; Ревунова и др., 2018; Бархатов и др., 2018б].
Статистическое исследование зависимостей характеристик источников МО от расположения на солнечном диске выполнено на событиях МО, отмеченных с 1997 по 2012 года. Согласно каталогам: 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 CME и ударных волн (http://umtof.umd.edu/sem/); 4) каталог H□-вспышек (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/); 5) каталог рентгеновских вспышек Virtual Solar Observatory (http://vso.nso.edu/cgi/catalogui) для них было установлено ~70 возможных солнечных источников. Первоначальной целью установления локализации солнечного источника МО является определение числа возможных источников за сутки, начиная от времени, которое рассчитывается исходя из минимальной скорости распространения КВМ 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 (СК). 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.

В общем случае определение координат – сложная задача. 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, сигмоиды).

В данном исследовании предлагается следующая методика установления локализации солнечного источника. 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.
Иногда 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 КВМ и поскольку они описываются с минутным разрешением, то их можно сопоставить со снимками солнечной фотосферы EIT SOHO и определить координаты вспышки. Однако многие КВМ сопровождаются вспышками С-класса и ниже, и могут вообще не выделяться на фоне рентгеновского излучения активных областей Солнца. Надо иметь ввиду, что привязка источников КВМ 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 КВМ 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 195Å). Во всех возможных случаях полученные координаты источников

КВМ/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° по широте. При определении координат источника также учитывались «качания» КА SOHO вокруг оси X GSE в диапазоне ~ ±7,85°. Углы «качаний» для каждого случая рассчитывались по движению звезд на разностных снимках LASCO C3 в суточном интервале или чуть менее.
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 можно также получить и другие параметры источников: их угловую 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 поджимает 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 переходную область (ПО).

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). 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 МКВВ (в силу большей плотности он быстрее теряет скорость из-за гравитации Солнца), или из-за давления другого МКВВ 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.

Прогноз геоэффективности магнитных облаков требует учета особенностей структуры магнитных облаков, часть которых может содержать на своем ведущем крае ударные волны и следующие за ними турбулентные оболочки. Проверка и интерпретация экспериментально замеченного нами факта, что турбулентная оболочка облака может обладать, как и само тело облака, высокой геомагнитной эффективностью потребовали создать оригинальную вычислительную программу поиска и моделирования магнитных облаков для целей обнаружения облаков с ударной волной и турбулентной

оболочкой. В основу общего алгоритм программы, как и было у нас раньше [Barkhatov et. al., 2014a], положено непрерывное сопоставление получаемого из потока данных регистрируемых на патрульном космическом аппарате (КА) параметров возмущенного корональным потоком солнечного ветра с параметрами облаков из специально созданной модельной базы содержащей 2000000 вариантов облаков. Оно позволяет получить ориентацию, геометрические размеры облаков и распределение магнитного поля в них уже по начальным спутниковым измерениям плазмы и магнитного поля внутри обнаруженного потока. В результате выполняется прогноз интенсивности ожидаемой магнитной бури [Бархатов и Калинина, 2010].

Обнаружение фронтов ударных волн программой выполняется на основе их представления как одного из типов магнитогидродинамического разрыва. Для этого были разработаны и использованы алгоритмы поиска ударных волн для установления ориентации поверхностей ударных разрывов по одномерным наблюдениям скачков параметров солнечного ветра на патрульных КА [Бархатов и др., 2017а; Бархатов и др., 2017б; Бархатов и др., 2019; Barkhatov et al., 2019b].

Определение характеристик фронтов ударных волн (УВ) магнитного облака выполняется при использовании для облака цилиндрической модели. Для этого решается геометрическая задача поиска уравнения плоскости, касательной к цилиндру, в точке его пересечения орбитой патрульного КА. При этом магнитное облако представляется многогранным объектом, в пределе представляющим цилиндрическую поверхность, двигающимся от Солнца в сторону орбиты КА. Во всех экспериментах по нахождению плоскостей УВ магнитных облаков оказалось достаточным моделирование не более 300 образующих плоскостей цилиндра.

Статистическими и корреляционными методами определены условия возникновения ударных волн перед магнитными облаками путем исследования соотношения звуковых и альвеновских скоростей в солнечном ветре с относительной скоростью магнитных облаков Vотн. Установлено, что основным условием существования ударных волн перед облаками является превышение скорости облака над скоростью солнечного ветра более чем на 50 км/с. Показано, что дополнительное ускорение магнитных облаков может

происходить за счет превышения магнитного давления в их телах над давленем в окружающем солнечном ветре.
В рамках этой части исследования определены ориентации плоскостей образующихся ударных волн в солнечно-эклиптической системе координат с помощью трехмерного моделирования касательной плоскости в точке пересечения структуры магнитного облака орбитой патрульного КА. Сформулированы условия возникновения турбулентных явлений в оболочке магнитного облака, которые определяются ориентацией плоскости ударной волны по отношению к ММП поглощаемому ударной волной при ее распространении в солнечном ветре. В результате показано, что выводы о геомагнитной эффективности магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, сделанные на основе измеренных на КА значений Bz компоненты, требуют учета эволюции магнитного поля солнечного ветра на ударной волне магнитного облака за время ее переноса к магнитосфере. Прогноз геомагнитного возмущения в этом случае более точен.
В рамках конкретной задачи о связи суббуревой активности с ориентацией ударных фронтов магнитных облаков солнечного ветра установлена зависимость интенсивности суббурь от уровня турбулентности в оболочках магнитных облаков [///]. Таким образом, ведущая структура быстрого магнитного облака поля в виде турбулентной оболочки может быть причиной геомагнитных возмущений даже независимо от динамики магнитного поля в самом теле облака.
Таким образом предложенные нами оригинальные методы исследования геомагнитной эффективности структур магнитных облаков дополненные статистическими методами исследования помогли определить зависимость интенсивности вызванных облаками геомагнитных возмущений от расположения и ориентации солнечных источников магнитных облаков, а также зависимость частоты возникновения магнитных облаков солнечного ветра, имеющих ударную волну и сопровождаемых оболочками, от скорости солнечных потоков и от уровня магнитного давления были [Бархатов и др., 2016а; Бархатов и др., 2016б].
Неоднократно опробованный нами нейросетевой подход к восстановлению последовательных рядов, искусственной нейронной сетью предварительно обученной по прецедентам, позволил создать метод и алгоритм восстанавливающий динамику индекса

авроральных электроджетов AL в процессе развития полярной суббури. При этом удалось найти комбинирующий параметры плазмы солнечного ветра интегральный параметр играющий основную роль в формировании суббури. Созданный при этом оригинальный нейросетевой алгоритм позволяет восстанавливать с высоким коэффициентом корреляции динамику индекса в процессе суббури по параметрам солнечного ветра, получаемым с патрульного КА с коэффициентом корреляции свыше 0.7. Такой прогноз может применяться для восстановления как отдельных суббурь, так и суббурь, вызванных медленными магнитными облаками [Бархатов и др., 2016в; Бархатов и др., 2016г; Бархатов и др., 2017г; Barkhatov et.al., 2016c]. В результате сделан вывод о том, что динамика индекса авроральных электроджетов AL управляется интегральным параметром комбинирующим параметры плазмы солнечного ветра. Установлены причинно-следственные связи динамики высокоширотной геомагнитной активности (по индексу AL) в виде полярных суббурь с типом магнитного облака солнечного ветра, обусловленного параметрами замагниченного плазменного коронального выброса. При этом разработан и успешно применен метод нейросетевого прогноза динамики индекса AL для прогноза суббурь, вызванных быстрыми магнитными облаками. Полученную успешность восстановления динамики AL по используемым данным с эффективностью до 80% мы характеризуем, как установленную нелинейную связь AL с параметрами облака. Показано, что для восстановления последовательности AL индекса достаточно использование By и Bz компонент ММП с учетом их 90 мин предыстории в качестве входных параметров нейросетевой модели [Бархатов и др., 2017д; Barkhatov et al., 2017c; Бархатов и др., 2017е; Бархатов и др., 2018к; Barkhatov et al., 2018a].
Далее, более подробно остановимся на этом полученном результате и описании использованных здесь методов и подходов. Несмотря на большое количество публикаций по суббурям можно убедиться в том, что в исследовании магнитосферных возмущений еще многое впереди. При изучении суббурь основное внимание сейчас сосредоточено на природе изолированных суббуревых процессов. Большинство работ опираются на статистические исследования и методы спектрального анализа наблюдательных

данных. Вместе с тем, высокоэффективным методом восстановления и прогноза высокоширотных геомагнитных возмущений по нашему мнению может считаться использование нейросетевого подхода, в рамках которого используется данные о динамике околоземного пространства. Эффективность этого метода продемонстрирована нами на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL индекса по параметрам солнечного ветра и ММП. Примененная здесь нейронная сеть Элмана является рекуррентной искусственной нейросетью (ИНС) с обратным распространением ошибки и включенной петлей обратной связи, исходящей из скрытого слоя. Она содержит дополнительный слой нейронов (контекстные нейроны), обеспечивающий «внутреннюю память» о предыстории восстанавливаемого динамического процесса.
Следует отметить, что наши первые численные нейросетевые эксперименты не давали положительного результата по восстановлению индекса AL. Это можно было интерпретировать как результат неудачного математического синтеза физической модели. Тогда потребовалось бы значительно усложнить архитектуру ИНС, что неизбежно повлекло бы за собой рост привлекаемых ресурсов (память, время расчета). Однако, усложнение модели не всегда приводит к желаемой цели и движение в этом направлении может не дать в итоге надежного результата. Вместе с тем, усиление внутренних связей синтезированной математической модели на основе относительно простой ИНС, можно получить радикальным изменением входных и выходных наборов. Такой подход требует более глубокого физически обоснованного учета причинно-следственных закономерностей рассматриваемого процесса. В результате такого нового подхода нами была установлена связь интегральных параметров потока солнечного ветра с суббуревой активностью в рамках простой нейросетевой модели [Бархатов и др., 2017г; Barkhatov et al., 2017b]. Скорость работы этого инструмента позволяет использовать его в режиме реального времени, т.е. проводить расчеты по онлайн данным.
Анализ вне и внутримагнитосферных волновых явлений по данным высокого разрешения проводился с использованием современных методов вейвлет-анализа и нелинейной корреляционной обработки сигналов. При этом оригинальность подходов обуславливалась

применением комбинации классических методов корреляционной и спектральной обработки возмущений с пост процессинговой обработкой, заключающейся в построении вейвлет скелетонных картин, содержащих ключевые параметры изучаемых процессов. Такое сжатие полезной информации позволяет делать более ответственные выводы по результатам исследований [Бархатов и др., 2016е; Бархатов и др., 2016ж; Манакова и др., 2016]. Нелинейная корреляционная обработка анализируемых сигналов реализуется нами на оригинальных искусственных нейронных сетях (ИНС).

Совместное использование вейвлет-скелетонно пост процессинговой обработки сигналов и нейросетевого подхода, который известен в научной практике [Uwamahoro et al., 2012], позволил обнаружить геомагнитные предвестники солнечной активности. В результате возможен прогноз солнечных вспышек и МО за два-три дня. [Бархатов и др., 2016и; Barkhatov et. al., 2016a].

Частотные характеристики внемагнитосферных УНЧ, включая характеристики структур магнитных облаков, и внутримагнитосферных УНЧ возмущений МГД диапазона изучались с помощью анализа вейвлет-спектров, наряду с построением динамических спектров Фурье. В некоторых случаях для более ответственного выделения турбулентной оболочки следующей за ударной волной магнитного облака и для изучения частотных особенностей анализируемых возмущений применялось преобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang transform – HHT). Преобразование Гильберта-Хуанга включает в себя метод эмпирической модовой декомпозиции EMD (Empirical Mode Decomposition - метод разложения данных на функции, которые получили название «эмпирических мод») нелинейных и нестационарных процессов и Гильбертов спектральный анализ (HSA) [Huang et al., 1998]. Альтернативный метод анализа нестационарных процессов, использует принцип разложения на эмпирические моды (EMD), который хорошо зарекомендовал себя при решении широкого круга задач [Ястребов, 2016]. Метод EMD представляет собой итерационную вычислительную процедуру, в результате которой исходные данные раскладываются на эмпирические моды или внутренние колебания (Intrinsic Mode Functions, IMF). В отличие от гармонического анализа, где модель для исходных данных задаётся заранее, эмпирические моды

вычисляются в ходе процесса. Разложение на эмпирические моды позволяет анализировать локальные явления, поэтому данный метод может быть использован при обработке нестационарных временных рядов или процессов. Метод EMD является частью преобразования Гильберта-Хуанга (HHT). Согласно результатам ряда исследований, метод эмпирических мод превосходит вейвлет-анализ с точки зрения частотно-временного разрешения.
Выше упомянутые подходы использовались для определения особенностей спектрального состава турбулентных оболочек магнитных облаков (МО) солнечного ветра (СВ) различной протяженности и переднего края их тел. В этом исследовании установлена также сравнительная геомагнитная эффективность оболочек и тел магнитных облаков (на основе Bz компоненты ММП) [Бархатова и др., 2017а; Barkhatova et al., 2017b; Бархатова и др., 2017б; Barkhatova et al., 2017a; Бархатова и др., 2017в]. Такими же методами была обнаружена синхронизация среднеширотной ионосферной и геомагнитной возмущенности в УНЧ диапазоне на большом долготно-широтном пространстве, с волновыми явлениями Bz компоненты межпланетного магнитного поля, в условиях развития суббури. В процессе этого исследования показана способность трехмерной токовой системы клина суббури, частью которой является западный электроджет, быть проводником низкочастотных МГД возмущений турбулентных оболочек магнитных облаков солнечного ветра в магнитосферно-ионосферную систему [Бархатова и др., 2018а; Barkhatova et al., 2018c; Бархатова и др., 2018б; Бархатова и др., 2018в; Бархатова и др., 2018г; Бархатова и др., 2018д] (Приложение 2)
Продолжая исследования частотно-пространственных характеристик магнитных облаков солнечного ветра аналитическими и численными методами была решена задача по определению частотно-пространственного распределения низкочастотных магнитных возмущений в модельном магнитном облаке, представляемым бессиловой цилиндрически симметричной магнитной потоковой трубкой. Здесь учтен подход, с помощью которого в работе [Михайловский, 1978] изучались неустойчивости плазмы в магнитных ловушках. Решение выполнялось в два этапа. Первый аналитический этап заключался в постановке задачи о

линейных МГД гармонических возмущениях в цилиндре со спиральным магнитным полем отвечающим бессиловой модели. В результате было получено обыкновенное дифференциальное уравнение с переменными коэффициентами для смещений. На втором этапе выполнялось численное решение для задаваемых фоновых значений среды и магнитного поля [Приложение 5].

Комбинация подходов и методов примененных при выполнении работ по проекту оригинальна и нова для сформулированных в проекте задач. Она существенно расширила наши возможности исследований. Такой подход к изучению солнечно-земных связей и, конкретно, геомагнитной эффективности структур магнитных облаков солнечного ветра, не имеет современных аналогов.

Литература

Barkhatov N.A., Revunov S.E., Uryadov V.P. (2004), Forecasting of the critical frequency of the ionosphere F2 layer by the method of artificial neural networks. Int.J.Geomagn.Aeron., 5, GI2010, DOI:10.1029/2004GI000065, 2004
Barkhatov N. A., Levitin A. E., Revunova E. A. Geomagnetic Storm Intensity Forecast Caused by Magnetic Clouds of Solar Wind // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. V. 54. N. 6. P. 718–726. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014. DOI:10.1134/S001679321406005X. 2014a
Barkhatov N.A., Levitin A.E., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Geomagnetic activity of magnetic clouds considering season of year // Proc. Of XXXVII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, P. 78-80, 2014b
Barkhatov N. A., Vinogradov A. B., Levitin A. E., Revunova E. A. Geomagnetic Substorm Activity Associated With Magnetic Clouds \\ Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 5, pp. 596–602. © Pleiades Publishing, Ltd., 2015. DOI: 10.1134/S0016793215050023, 2015
Barkhatov N. A., Obridko V. N., Revunov S. E., Snegirev S. D., Shadrukov D. V., and Sheiner O. A. Long Period Geomagnetic Pulsations as Solar Flare Precursors // ISSN 0016_7932, Geomagnetism and Aeronomy, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 249–255. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016a
Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B., Romanov R.V., Yagodkina O.I. Geomagnetic activity structures of

magnetic clouds. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 28-29. 2016b
Barkhatov N.A., Yagodkina O.I., Revunov S.E., Vorobjev V.G. Solar wind driving and formation of substorm activity. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 29. 2016c
Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Possible cause of solar wind magnetic cloud shock waves. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, 2017. PGI RAS. pp.76-77, 2017a
Barkhatov N. A., Vorobjev V. G., Revunov S. E., and Yagodkina O. I. Effect of Solar Dynamics Parameters on the Formation of Substorm Activity // Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 57, No. 3, pp. 251–256, 2017b
Barkhatov N.A., Revunov S.E., Glavatskij Yu.A. The causal relationship between the dynamics of high-latitude geomagnetic activity and type of solar wind magnetic cloud. Proc. XL Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity, PGI RAS. pp.74-75. 2017c
Barkhatov N.A., S.E. Revunov, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina Studying the Relationship between High-Latitude Geomagnetic Activity and Parameters of Interplanetary Magnetic Clouds with the Use of Artificial Neural Networks // Geomagnetism and Aeronomy, 2018, Vol. 58, No. 2, pp. 147–153. © Pleiades Publishing, Ltd., 2018a
Barkhatov N.A., V.G. Vorobjev, S.E. Revunov, O.I. Yagodkina, Yu.A. Glavatsky Substorm activity and shock wave front orientation for interplanetary magnetic clouds // Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, pp. 7-11. 2018b
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, 2018c
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 59, No 1, 2019a (принята к печати)
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., 2019b
Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V., Yagodkina O.I. The magnetosonic waves in the mid-latitude ionosphere appeared within preparation phase of strong earthquakes.
Book of Abstracts of 11th International Conference "PROBLEMS OF GEOCOSMOS", October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, P. 223. 2016
Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V., Revunov S.E. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances over Kazan station // Solar Terrestrial Physics, 2017, V.3, Iss.4, pp. 11-21, UDC 550.388.2 DOI: 10.12737/szf-33201701, 2017a
Barkhatova O.M., Barkhatov N.A., Kosolapova N.V. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances on the substorm process background. Proc. XL Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", Apatity, 2017. PGI RAS. pp.97-99, 2017b
Barkhatova O.M., 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, 2018c
Bothmer V., Schwenn R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind // Ann. Geophysicae. 1998. V. 16. P. 1 – 24
Burlaga L.F., Wang C., Richardson J.D., Ness N.F. Evolution of the multiscale statistical properties of corotating streams from 1 to 95 AU // J. Geophys. Res. V. 108.№ A7.P.1305–1310.10.1029/2003JA009841. 2003
Davis T.N., Sigiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. V. 71. No. 3. P. 785-801. DOI: 10.1029/JZ071i003p00785. 1966.
Echer E., Gonzalez W. D. Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence // Geophys. Res. Letters. 2004. V. 31. No. L09808. doi:10.1029/2003GL019199
FarrugiaC.J. ,et . al., Geoeftectiveness of three Wind magnetic clouds: a comparative study // J. Geophys. Res., V.103, N A8, P.17261-17278, 1998.
Hernandez J.V., Tajima T., Horton W. Neural net forecasting for geomagnetic activity // Geophys. Res. Lett. V. 20. No.

23. P. 2707- 2710. DOI:10.1029/93GL02848. 1993.
Hidalgo M. A., Nieves-Chinchilla T., Cid C. Elliptical cross-section model for the magnetic topology of magnetic clouds // Geophys. Res. Letters. 2002a. V. 29.No. 13.P. 1637.10.1029/2001GL013875
Hidalgo M. A., Vinas, A. F., Sequeiros, J. A non–force-free approach to the topology of magnetic clouds in the solar wind // J. Geophys. Res. 2002b. V. 106. No. A1. P. 1002.10.1029/2001JA900100
Hidalgo M. A. A study of the expansion and distortion of the cross section of magnetic clouds in the interplanetary medium // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A8. P. 1320.doi:10.1029/2002JA009818
Huang N. E. Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998
Lepping R. P., Jones J. A., Burlaga L. F. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. 1990.No. 95. P. 11,957–11,965
Kilpua E. K. J., Lee C. O., Luhmann J. G., and Li Y. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during the minimum periods following solar cycles 22 and 23 // Ann. Geophys., 29, 1455–1467, 2011. doi:10.5194/angeo-29-1455-2011
Kilpua.K.J., Li Y., Luhmann J.G., Jian L.K., Russell C.T. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness // Ann. Geophys. V. 30. P. 1037–1050. doi:10.5194/angeo-30-1037-2012. 2012
Kilpua E. K. J., Isavnin A., Vourlidas A., Koskinen H. E. J., and Rodriguez L. On the relationship between interplanetary coronal mass ejections and magnetic clouds // Ann. Geophys., 31, 1251–1265. doi:10.5194/angeo-31-1251-2013, 2013a
Kilpua E. K. J., Hietala H., Koskinen H. E. J., Fontaine D., and Turc L. Magnetic field and dynamic pressure ULF fluctuations in coronal-mass-ejection-driven sheath regions // Ann. Geophys., 31, 1559–1567. doi:10.5194/angeo-31-1559-2013, 2013b
McPherron, R. L., C. T. Russell, M. G. Kivelson, and P. J. Coleman Jr. (1973), Substorms in space: The correlation between ground and satellite observations of the magnetic field, Radio Sci., 8(11), 1059–1076, doi:10.1029/RS008i011p01059, 1973
McPherron, R. L., and J. N. Barfield (1980), A seasonal

change in the effect of field-aligned currents at synchronous orbit, J.Geophys.Res., 85(A12), 6743–6746, doi:10.1029/JA085iA12p06743, 1980
Ohtani S., Takahashi K., Zanetti L.J., Potemra T.A., McEntire R.W. and Iijima T. (1991) Tail Current Disruption in the Geosynchronous Region, in Magnetospheric Substorms (eds J. R. Kan, T. A. Potemra, S. Kokubun and T. Iijima), American Geophysical Union, Washington, D.C.. doi: 10.1029/GM064p0131, 1991
Romashets, E. P., Vandas, V. Dynamics of a toroidal magnetic clouds in the solar wind // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No. A6. P. 10,615 – 10,624, 2001
Valach F., Bochnicek J., Hejda P., Revallo M. Strong magnetic activity forecast by neural networks under dominant southern orientation of interplanetary magnetic field // Adv. Space Res. V. 53. No. 4 P. 589-598. DOI:10.1016/j.asr.2013.12.005. 2014
Vandas, M., Fischer, S., Dryer, M., Smith, Z., Detman, T. Simulation of magnetic cloud propagation in the inner heliosphere in two-dimensions 2. A loop parallel to the ecliptic plane and the role of helicity // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No. A2. P. 2505 – 2510, 1996
Vandas, M., Odstrcil, D., Watari, S. Three-dimensional MHD simulation of a loop-like magnetic cloud in the solar wind // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A9. P. 1236.doi:10.1029/2001JA005068, 2002
Weigel R.S., Horton W., Tajima T. Forecasting auroral electrojet activity from solar wind input with neural networks // Geophys. Res. Lett. V. 26. No. 10. P. 1353-1356. DOI:10.1029/1999GL900280. 1999
Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D. Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic field and their time derivatives // J. Geophys. Res. V. 107. No. A7. 1298. DOI: 10.1029/2002JA009627. 2003
Uwamahoro J., McKinnell L. A., and Habarulema J. B. Estimating the geoeffectiveness of halo CMEs from associated solar and IP parameters using neural networks // Ann. Geophys., 30, 963–972, 2012. doi:10.5194/angeo-30-963-2012, 2012
Wu C. C., Lepping R. P. Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 4 years of Wind // J. Geophys. Res. 2002. V.107. № A10. P. 1314-1321. doi:10.1029/2001JA000161, 2002
Zhang J., Liemohn M.W., Kozyra J.U., Lynch B.J., Zurbuchen T.H. A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years // J. Geophys. Res. V. 109.A09101.doi:10.1029/2004JA010410.

2004
Бархатов Н.А., Беллюстин Н.С., Бужере Ж.-Л., Сахаров С.Ю., Токарев Ю.В. Влияние магнитного поля солнечного ветра на турбулентность переходной области за отошедшей ударной волной // Известия ВУЗов "Радиофизика". Т. 44. № 12. С. 993-1002. 2001
Бархатов Н.А., Королев А.В., Левитин А.Е., Сахаров С.Ю. Коррекция современных индексов интенсивности авроральных электроструй, определяемых по данным меньшего числа магнитных обсерваторий, чем были получены классические индексы АЕ // Геомагнетизм и аэрономия. 2003. Т.43. N 6. С. 748-751. 2003
Бархатов Н.А., Королев А.В., Левитин А.Е., Сахаров С.Ю. Пересчет современных индексов полярной активности к классическим // Известия ВУЗов "Радиофизика". 2004. Т.47. N 3. С.200-208. 2004
Бархатов Н.А., Калинина Е.А., Левитин А.Е. Проявление конфигураций магнитных облаков солнечного ветра в геомагнитной активности. // Космические исследования (РАН), 47, N 4, С. 300-310, 2009
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Нейросетевая классификация разрывов параметров космической плазмы. Научное издание: Солнечно-земная физика, выпуск 14(127), С.42–51, 2010
Бархатов Н. А., Калинина Е. А. Определение параметров магнитных облаков и прогноз интенсивности магнитных бурь. Геомагнетизм и аэрономия, 2010, Т 50, № 4, С. 477–485, 2010
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Левитин А.Е. Краткосрочный прогноз интенсивности геомагнитных бурь, ожидаемых при воздействии магнитных облаков на магнитосферу Земли // Сб. Солнечно-земная физика, вып. 19. с. 40-45, 2011
Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Ревунова Е.А. Классификация комплексов космической погоды с учетом типа солнечного источника, характеристик плазменного потока и создаваемого им геомагнитного возмущения // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 54, № 2, С. 185-191, 2014а
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, 2014б
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Эволюция ориентации магнитных облаков солнечного ветра и проявление сезонной зависимости в их

геомагнитной активности // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. № 4(1). С. 106-114. 2014в
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б., Романов Р.В. Суббуревая геомагнитная активность, связанная с элементами магнитных облаков. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), С.10. 2016а
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Виноградов А.Б. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Proc. of 39 Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", PGI, Apatity, P. 74-77, 2016б
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), С.11. 2016в
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента // Proc. of 39 Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", PGI, Apatity, P. 27-30, 2016г
Бархатов Н.А., Обридко В.Н., Ревунов С.Е., Снегирев С.Д., Шадруков Д.В., Шейнер О.А. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как предвестники солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия, Т.56, № 2, С. 265–272, 2016д
Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Главацкий Ю.А. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.40-41. 2016е
Бархатов Н.А., Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Главацкий Ю.А. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере // Proc. of 39 Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", PGI, Apatity, P.

104-107, 2016ж
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Романов Р.В., Виноградов А.Б. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.15-16. 2016з
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Виноградов А.Б. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 2-6 марта 2016 г., ПГИ РАН, С.14-15. 2016и
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Условия существования быстрых магнитных облаков солнечного ветра сопровождаемых ударными волнами. Труды XXI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г. НИУ ННГУ. с. 83-85. 2017а
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Возможная причина возникновения ударных волн у магнитных облаков солнечного ветра. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.53-54. 2017б
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Гелиогеофизнческие приложения современных методов обработки цифровых данных: монография. М.: ФЛИНТА. Нижний Новгород: Мининский университет, 2017. 316 с., 2017в
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия, Т.57, № 3, с. 273–279, 2017г
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Главацкий Ю.А. Причинно-следственная связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с типом магнитного облака солнечного ветра. Труды XXI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г. НИУ ННГУ. с. 86-89. 2017д
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Виноградов А.Б., Главацкий Ю.А. Связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с изменениями параметров магнитных облаков. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.54. 2017е
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, 2018а
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, 2018б (направлена в печать)
Бархатов Н.А., В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина, Ю.А. Главацкий Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Тезисы 41-го ежегодного семинара "Физика авроральных явлений", 12-16 марта 2018 г., ПГИ, с. 20, 2018в
Бархатов Н.А., С.Е. Ревунов, Ю.А. Главацкий Причина зависимости суббуревой активности от ориентации фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Труды XXII Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2018, с. 125-128, 2018г
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака // Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 9, 2018д
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака // Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 11-14, 2018е
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Главацкий Ю.А. Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Геомагнетизм и аэрономия, 2018 (направлена в печать), 2018ж
Бархатов Н.А., В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, с. 10, 2018з
Бархатов Н.А., В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И.

Ягодкина Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, с. 15-18, 2018и
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Динамика высокоширотной геомагнитной активности, обусловленная межпланетными магнитными облаками // Геомагнетизм и аэрономия, Т 58, № 2, С. 155-162, DOI:10.7868/S0016794018020013. 2018к
Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков // Геомагнетизм и аэрономия, Т.59, №1, 2019, с. 1-11, 2019
Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В. Явление синхронизации ионосферных и геомагнитных УНЧ возмущений в районе станции Казань в геомагнитоспокойный период. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., ПГИ РАН, С.70-71. 2017а
Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В. Синхронизация геомагнитных и ионосферных возмущений на фоне суббуревого процесса. Труды XXI научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г. НИУ ННГУ. с. 90-93. 2017б
Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань // Солнечно-Земная физика, 2017, Т.3, № 4, с. 24-36, 2017в
Бархатова О.М., Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев Ионосферная и геомагнитная возмущенность на фоне суббуревых процессов // Тезисы 41-го ежегодного семинара "Физика авроральных явлений", 12-16 марта 2018 г., ПГИ, с. 58, 2018а
Бархатова О.М., 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, 2018б
Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А. Внемагнитосферный агент синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в интервалы суббуревых

процессов // Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, с. 8, 2018в
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, 2018г
Бархатова О.М., Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, Ревунов С.Е. УНЧ Отклик магнитосферно-ионосферной системы на мгд возмущенность оболочки магнитных облаков // Изв.ВУЗов «Радиофизика», 2018д (направлена в печать)
Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Самсонов С.Н. Иррегулярные Pi3 пульсации и их связь с потоками заряженных частиц в магнитосфере и ионосфере // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. 2015. P. 71-74.
Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Шотт Ж. Ж. Волновой геомагнитный отклик магнитосферы на подход к земле межпланетного магнитного облака (14-15 июля 2000 г., "Bastilledayevent") // Геомагнетизм и аэрономия, 2003, Т.43, № 3, 321-331, 2003
Манакова Ю.В., Пехтелева К.А., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Пространственно-временной анализ возмущений диапазона Pc4-5 в периоды магнитных бурь корреляционно-скелетонным методом // Вестник Мининского университета, № 1, 1-6, 2016
Михайловский А.Б. Неустойчивости плазмы в магнитных ловушках. М., Атомиздат, 1978, 296 с.
Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 1. С. 51–67. 2011
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, 2018
Снегирев С.Д., Фридман В.М., Шейнер О.А. О флуктуациях магнитного поля земли, предшествующих крупным солнечным вспышкам // Солнечно-земная

		физика. № 8. С. 27-29. 2005. Снегирев С.Д., Смирнова А.С., Шейнер О.А. Об усилении долгопериодных пульсаций Н-компоненты магнитного поля Земли перед мощными солнечными вспышками // Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика – 2009». Труды. / Отв. ред. А.В.Степанов. С-Петербург, Пулково, 5-11 июля. ГАО РАН. С. 401-404. 2009. Ястребов И.П. О свойствах и применениях преобразования Гильберта–Хуанга // Проектирование и технология электронных средств. – 2016. – № 1. – С. 26–33, 2016
3.8.1.	Количество научных работ по Проекту, опубликованных за весь период реализации Проекта	43
3.8.1.1.	- в изданиях, включенных в перечень ВАК	5
3.8.1.2.	- в изданиях, включенных в библиографическую базу данных РИНЦ	24
3.8.1.3.	- из них в изданиях, включенных в Scopus	2
3.8.1.4.	- в изданиях, включенных Web of Science	4
3.8.2.	Количество научных работ, подготовленных при реализации Проекта и принятых к печати за период, на который предоставлен грант (пункт заполняется автоматически, выводится количество заполненных 509 форм)	6
3.9.	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. 41-й Ежегодный Апатитский семинар «Физика авроральных явлений», 12-16 марта 2018 г., Полярный Геофизический Иинститут (ПГИ) Доклады: Н.А. Бархатов, Е.А. Ревунова, Р.В. Романов, В.Г. Воробьев Солнечные источники и характеристики магнитных облаков солнечного ветра (устный). О.М. Бархатова, Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев Ионосферная и геомагнитная возмущенность на фоне суббуревых процессов (устный). Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И.

		Ягодкина, Ю.А. Главацкий Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака (устный). 2. XXII научная конференции по радиофизике, Нижний Новгород, 15-29 мая 2018 г. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет (ННГУ) им. Н.И. Лобачевского Доклады: 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 (устный). 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 (устный). Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов, Ю.А. Главацкий Причина зависимости суббуревой активности от ориентации фронта ударной волны межпланетного магнитного облака (устный). 3. Вторая всероссийская научная конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, 23-26 сентября 2018 г. ПГИ Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака (устный). Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А. Внемагнитосферный агент синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в интервалы суббуревых процессов (устный). Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (устный).
3.10.	Участие в экспедициях по тематике Проекта, за период, на который предоставлен грант (указать номера проектов)	нет
3.11.	Финансовые средства, полученные в 2018 году от РФФИ	700000.00

3.12.	Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных Проекту (например, http://www.somewhere.ru/mypub.html)	http://www.mininuniver.spacelab.ru
3.13.	Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных за период, на который предоставлен грант	Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Исследование взаимосвязи высокоширотной геомагнитной активности с параметрами межпланетных магнитных облаков с использованием искусственных нейронных сетей. Геомагнетизм и аэрономия, 2018, 58 - 2, 155–162 Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Studying the Relationship between High-Latitude Geomagnetic Activity and Parameters of Interplanetary Magnetic Clouds with the Use of Artificial Neural Networks. Geomagnetism and Aeronomy, 2018, 58 - 2, 147–153 Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А.. Зависимость геомагнитной активности от структуры магнитных облаков. Геомагнетизм и аэрономия, 2019, 59 - 1, 1-11 Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А.. Dependence of the Geomagnetic Activity on the Structure of Magnetic Clouds. Geomagnetism and Aeronomy, 2019, 59 - 1, 16–26 Бархатов Н.А., Долгова Д.С., Ревунова Е.А., Ревунов С.Е., Главацкий Ю.А.. Classification of solar plasma flows by analyzing outside and intra-magnetospheric magnetohydrodynamic oscillations during magnetic storms. International Journal of Engineering & Technology, 2019 Бархатова О.М., Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, В.Г. Воробьев. Ionospheric and geomagnetic disturbances on the background of substorm processes. Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018, 2018, 91-94 Бархатов Н.А., Е.А. Ревунова, Р.В. Романов, В.Г. Воробьев . Solar sources and characteristics of Solar wind magnetic clouds. Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018, 2018, 66-69 Бархатов Н.А., В.Г. Воробьев, С.Е. Ревунов, О.И. Ягодкина, Ю.А. Главацкий. Substorm activity and shock wave front orientation for interplanetary magnetic clouds. Proc. 41st Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena», Apatity, 2018, 2018, 7-11 Бархатов Н.А., С.Е. Ревунов, Ю.А. Главацкий. Причина зависимости суббуревой активности от ориентации фронта ударной волны межпланетного магнитного облака. Труды XXII Научной конференции по

радиофизике, ННГУ, 2018, 2018, 125-128
Бархатова О.М., 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, 2018, 129-132
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, 2018, 169-172
Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А.. Внемагнитосферный агент синхронной ионосферной и геомагнитной возмущенности в интервалы суббуревых процессов. Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, 2018, 8
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака. Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, 2018, 9
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Сборник тезисов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, 2018, 10
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, 2018, 19-22
Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Зависимость суббуревой активности от уровня турбулентных движений в оболочке межпланетного магнитного облака. Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, 2018, 11-14

Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Причинно-следственные связи динамики суббуревой активности с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Сборник трудов второй всероссийской научной конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», Мурманск, ПГИ, 2018, 2018, 15-18

Бархатов Н.А., О.М. Бархатова, С.Е. Ревунов. Численное моделирование МГД волновых процессов в космической плазме, часть 1. Численное моделирование МГД волновых процессов в космической плазме, часть 1: учебное издание, 2018, 84

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, 2018

Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И., Главацкий Ю.А.. Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака. Геомагнетизм и аэрономия, 2018

Бархатова О.М., Н.В. Косолапова, Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов. УНЧ Отклик магнитосферно-ионосферной системы на МГД возмущенность оболочки магнитных облаков. Известия ВУЗов «Радиофизика», 2018

Бархатов Н.А., Ревунов С.Е.. Гелиогеофизические приложения современных методов обработки цифровых данных. 2017, 320

Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Отражение динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности. Геомагнетизм и аэрономия, 2017, 57 - 3, 273-279

Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И.. Effect of Solar Dynamics Parameters on the Formation of Substorm Activity. Geomagnetism and Aeronomy, 2017, 57 - 3, 251–256

Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б.. Условия существования быстрых магнитных облаков солнечного ветра сопровождаемых ударными волнами. 2017, 40, 53-54

Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Виноградов А.Б., Главацкий Ю.А.. Связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с изменениями параметров магнитных облаков. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., 2017, 54

Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В.. Явление синхронизации ионосферных и геомагнитных УНЧ возмущений в районе станции Казань в геомагнитоспокойный период. Сборник тезисов 40-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 13-17 марта 2017 г., 2017, 40
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б.. Возможная причина возникновения ударных волн у магнитных облаков солнечного ветра. Труды XXI научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г.), 2017, 21, 83-85
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Главацкий Ю.А.. Причинно-следственная связь динамики высокоширотной геомагнитной активности с типом магнитного облака солнечного ветра. Труды XXI научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г.), 2017, 21, 86-89
Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В.. Синхронизация геомагнитных и ионосферных возмущений на фоне суббуревого процесса. Труды XXI научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород, 15-22 мая 2017 г.), 2017, 21, 90-93
Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Главацкий Ю.А.. The causal relationship between the dynamics of high-latitude geomagnetic activity and type of solar wind magnetic cloud. “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XL Annual Seminar, Apatity, 2017, 2017, 40, 74-76
Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б.. Possible cause of solar wind magnetic cloud shock waves. “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XL Annual Seminar, Apatity, 2017, 2017, 40, 76-78
Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Косолапова Н.В.. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances on the substorm process background. “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XL Annual Seminar, Apatity, 2017, 2017, 40, 97-100
Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е.. Synchronization of geomagnetic and ionospheric disturbances over Kazan station. Solar Terrestrial Physics, 2017, 3 - 4, 63-73
Бархатова О.М., Косолапова Н.В., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е.. Событие синхронных возмущений в ионосфере и геомагнитном поле над станцией Казань. Солнечно-земная физика, 2017, 3 - 4, 63-73
Бархатов Николай Александрович, Обридко Владимир Нухимович
Ревунов Сергей Евгеньевич

Снегирев Сергей Донатович
Шадруков Дмитрий Владимирович
Шейнер Ольга Александровна. Long Period Geomagnetic Pulsations as Solar Flare Precursors. Geomagnetism and Aeronomy, 2016, 56 - 2, 249–255
Манакова Юлия Валерьевна, Пехтелева Ксения Александровна
Бархатов Николай Александрович
Ревунов Сергей Евгеньевич
. Пространственно-временной анализ возмущений диапазона Pc4-5 в периоды магнитных бурь корреляционно-скелетонным методом. Вестник Мининского университета, 2016, 56 - 1, 1-6
Бархатов Николай Александрович, Обридко Владимир Нухимович
Ревунов Сергей Евгеньевич
Снегирев Сергей Донатович
Шадруков Дмитрий Владимирович
Шейнер Ольга Александровна. Длиннопериодные геомагнитные пульсации как предвестники солнечных вспышек. Геомагнетизм и аэрономия, 2016, 57 - 2, 265–272
Бархатов Николай Александрович, Бархатова Оксана Михайловна
Косолапова Наталия Валентиновна
Главацкий Юрий Алексеевич. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере. Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, 2016, 39, 104-107
Бархатов Николай Александрович, Ревунова Елена Алексеевна
Романов Роман Владимирович
Виноградов Александр Борисович
. Геомагнитная активность структуры магнитных облаков. Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, 2016, 39, 74-77
Бархатов Николай Александрович, Воробьев Вячеслав Георгиевич
Ревунов Сергей Евгеньевич
Ягодкина Оксана Ивановна
Виноградов Александр Борисович. Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Proc. of 39 Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, PGI, Apatity, 2016, 27-30

Бархатова Оксана Михайловна, Бархатов Николай Александрович
Косолапова Наталия Валентиновна
Ягодкина Оксана Ивановна. The magnetosonic waves in the mid-latitude ionosphere appeared within preparation phase of strong earthquakes. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, 2016, 11, 29
Бархатов Николай Александрович, Воробьев Вячеслав Георгиевич
Ревунов Сергей Евгеньевич
Ягодкина Оксана Ивановна
. Solar wind driving and formation of substorm activity. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, 2016, 11, 28-29
Бархатов Николай Александрович, Ревунова Елена Алексеевна
Романов Роман Владимирович
Виноградов Александр Борисович
Ягодкина Оксана Ивановна. Geomagnetic activity structures of magnetic clouds. Book of Abstracts of 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”, October 3–7, 2016, St. Petersburg, Petrodvorets, St. Petersburg State University, 2016, 39, 10
Бархатов Николай Александрович, Ревунова Елена Алексеевна
Романов Роман Владимирович
Виноградов Александр Борисович. Суббуревая геомагнитная активность, связанная с элементами магнитных облаков. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), 2016, 39, 40-41
Бархатов Николай Александрович, Бархатова Оксана Михайловна
Косолапова Наталия Валентиновна
Главацкий Юрий Алексеевич
. Учет геомагнитного поля при распространении гравитационных волн в среднеширотной ионосфере. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 29 февраля-4 марта 2016 г., ПГИ РАН, 2016, 39, 40-41
Бархатов Николай Александрович, Ревунова Елена Алексеевна

		Романов Роман Владимирович Виноградов Александр Борисович . Геомагнитная активность структуры магнитных облаков. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 29 февраля-4 марта 2016 г., ПГИ РАН, 2016, 15-16 Бархатов Николай Александрович, Воробьев Вячеслав Георгиевич Ревунов Сергей Евгеньевич Ягодкина Оксана Ивановна Виноградов Александр Борисович . Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016, г. Мурманск, Полярный геофизический институт (ФАНО-РАН), 2016, 11 Бархатов Николай Александрович, Воробьев Вячеслав Георгиевич Ревунов Сергей Евгеньевич Ягодкина Оксана Ивановна Виноградов Александр Борисович . Демонстрация отражения динамики параметров солнечного ветра в процессе формирования суббуревой активности с помощью интеллектуального инструмента. Сборник тезисов 39-го ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», 29 февраля-4 марта 2016 г., ПГИ РАН, 2016, 14-15
3.14.	Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного Проекта	Рациональное природопользование
3.15.	Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного Проекта	Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера
3.16.	Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного Проекта	Космические технологии, прежде всего связанные с телекоммуникациями, включая ГЛОНАСС и программу развития наземной инфраструктуры
3.17.	Направление из Стратегии научно-технологического развития	Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и

Российской Федерации	телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики