

## ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2019 г. В. М. Чекрыжов<sup>1</sup>, \*\*, П. Н. Свиркунов<sup>1</sup>, \*, С. В. Козлов<sup>1</sup>, \*\*\*

<sup>1</sup>Институт экспериментальной метеорологии НПО Тайфун, г. Обнинск, Россия

\*e-mail: ps@rpatyphoon.ru

\*\*e-mail: wladichek@yandex.ru

\*\*\*e-mail: kozlov-sv@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 29.11.2017 г.

После доработки 05.06.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Приведены результаты наблюдений геомагнитных возмущений, связанных с циклонической деятельностью в тропосфере. Для выявления таких возмущений нами использовался статистический анализ данных магнитных наблюдений за определенный период, а также данные, полученные для случая отдельного крупного циклона. Предложен физический механизм генерации возмущений геомагнитного поля тропосферными циклонами, в основе которого лежит электродинамический эффект возникновения магнитного поля при движении заряженных облаков под действием ветра и выпадения осадков, содержащих заряженные частицы. Экспериментально установлено, что дисперсия возмущений магнитного поля в пункте наблюдения, через который прошел циклон, в диапазоне частот 4.3–8.3 мГц может возрасти более чем в 2 раза по сравнению с фоновыми условиями при отсутствии циклона. Теоретическая оценка амплитудных значений возмущений магнитной индукции, вызванных циклоном, удовлетворительно согласуется с данными наблюдений.

DOI: 10.1134/S0016794019010036

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям механизмов возмущений геомагнитного поля (ГМП) уделялось и уделяется большое внимание. Это вызвано не только научными интересами, но и связано с решением целого ряда практически важных задач. Например, современные требования к точности измерений магнитного поля Земли при проведении геомагнитных съемок и навигации сложно реализовать, если не учитывать влияние различных источников помех, одним из которых могут служить интенсивные атмосферные процессы. Во многих случаях эти возмущения могут быть связаны с процессами в ионосфере. В частности, они могут вызываться влиянием нижних слоев атмосферы – тропосферы и стратосферы на ионосферу [Данилов и др., 1987].

Механизмом такого влияния могут служить волновые процессы: акустико-гравитационные волны, приливные колебания и другие. В связи с этим можно указать ряд работ, в которых исследовалось воздействие интенсивных метеопроцессов в тропосфере (крупных циклонов, штормов, ураганов, атмосферных фронтов) на ионосферу. На первых порах для выявления этих воздействий использовались методы доплеровских измерений ионосферных эффектов при радиолокационном

зондировании ионосферы над грозовыми штормами [Prasad et al., 1975, Krishnam et al., 1981]. В последние годы для этих задач стали применять методы спутниковых измерений [Исаев и др., 2010], включая данные томографических исследований [Ванина-Дарт и др., 2011]. Что касается регистрации собственно магнитных возмущений, вызванных интенсивными атмосферными процессами, то здесь в качестве первой следует указать работу [Щепетнов и др., 1986], в которой приведены результаты наблюдений возмущений магнитного поля с частотой порядка 2 Гц и амплитудой до 0.1 нТл, зарегистрированных на обсерватории Борок во время прохождения мощного циклона.

В работе [Пикалов и др., 2009] приведены результаты исследования статистической взаимосвязи метеорологических факторов с вариациями ГМП на протяжении 3 лет. В течение этого периода наблюдений выявлены случаи возмущения магнитного поля во время прохождения мощных циклонов над измерительным комплексом. В работе [Колесник и Пикалов, 2010] выдвинута гипотеза о физическом механизме взаимосвязи, базирующемся на генерации инфразвуковых колебаний в атмосфере в периоды циклонической активности. Предполагалось, что инфразвуковые колебания, генерируемые в циклонической зоне,

достигая ионосферы, вызывают модуляцию ионосферных токов, что в свою очередь приводит к вариациям ГМП, регистрируемым на поверхности земли. Однако оценок, подтверждающих данную гипотезу, в работе не приводится.

Наряду с механизмом возмущения ГМП, рассмотренным в вышеуказанной работе, могут быть и другие физические механизмы возмущений геомагнитного поля под влиянием мощных атмосферных циклонов. Так до настоящего времени в публикациях, посвященных анализу механизмов вариаций ГМП, полученных в процессе мониторинга геомагнитного поля, не уделялось внимания тому факту, что облака часто несут значительный заряд [Имянитов и др., 1971], и что движение облачных объемных зарядов в атмосфере под действием ветра должно порождать собственное магнитное поле этих зарядов. При этом наложение магнитного поля облаков на естественные вариации геомагнитного поля так же может быть причиной дополнительных вариаций ГМП и повышать его шумовую компоненту в спектре. Они могут быть заметны в условиях интенсивных атмосферных процессов (крупные циклоны, атмосферные фронты).

Целью настоящей работы является попытка выявить возмущения геомагнитного поля, связанные с циклонической активностью, и оценить вклад собственных магнитных полей облачных структур, связанных с их зарядами, в возмущения ГМП на основе совокупности магнитных, метеорологических и спутниковых данных.

## 2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

Известно, что регистрируемые приборами вариации геомагнитного поля представляют собой суперпозицию возмущений, генерируемых множеством источников. Общие соображения позволяют разделить все наблюдаемые возмущения геомагнитного поля на три основные группы: геокосмического (ионосферно-магнитосферного), тропосферного и техногенного происхождения. Чтобы выделить в магнитном поле возмущения тропосферного происхождения нужно исключить или корректно учесть влияние источников техногенной и космической природы. Влияние последнего источника можно исключить выбором ситуаций, когда геокосмическими возмущениями можно пренебречь по причине их малости.

Более сложной является задача оценки возмущений ГМП от техногенных источников, которые в дальнейшем рассматриваются как источники геомагнитного фона, маскирующего эффекты от тропосферных источников. Условий, необходимых для определения характеристик геомагнитного фона, в общем случае два: во-первых, от-

сутствие или минимум возмущений ГМП, обусловленных солнечной активностью (отсутствие магнитных бурь и суббурь), во-вторых, отсутствие возмущений, связанных с циклонической активностью тропосферы. Последнее условие выполняется, когда имеет место антициклон с высоким уровнем атмосферного давления при полном отсутствии облаков. Необходимую метеорологическую информацию для определения условий формирования фонового массива магнитных данных можно выбрать из наблюдений ближайшей метеостанции (в нашем случае – метеостанция Малоярославец в 15 км от г. Обнинска). Данные наблюдений метеостанции публикуются на сайте [<http://rp5.ru/>].

Методика определения параметров геомагнитного фона в пункте наблюдения состоит в следующем. Сначала формируют выборку всех суток (например, за месячный период), обязательно содержащих безоблачные отрезки времени. Из этой выборки удаляют те части суток, которые содержат облачность. Исключают также безоблачные отрезки времени, если в это время наблюдаются магнитные бури или суббури, в которых К-индекс превышает два балла. В итоге оставшиеся части суток без облаков и магнитных бурь (суббурь) принимаются в качестве фоновых, если их достаточно для формирования 24 часового суточного отрезка времени (искусственных целых суток).

Далее эти искусственные сутки делятся на полчасовые отрезки времени, для которых выбирают соответствующие отрезки магнитных наблюдений. Если оказывается, что получасовых отрезков магнитных данных для данного времени суток в пределах рассматриваемого месяца оказывается несколько, то эти данные усредняются. Затем для каждого получасового ряда магнитных данных вычисляется дисперсия вариаций ГМП, являющаяся индикатором уровня геомагнитного фона в пункте наблюдения. В итоге формируется суточный ряд данных из 48 получасовых значений дисперсии, характеризующий геомагнитный фон в пункте наблюдений.

Чтобы выявить в процессе обработки данных мониторинга ГМП возмущения, связанные с облачностью, необходимо учесть уровень местного геомагнитного фона. Это означает, что из текущего значения дисперсии возмущений ГМП вычитается дисперсия фонового магнитного шума, рассчитанная по вышеприведенной методике для соответствующего интервала суток.

Ниже представлены результаты использования метода. Для этой цели в качестве периода совместных наблюдений ГМП и метеорологической обстановки был выбран сентябрь 2012 г., содержащий достаточное количество суток безоблачной и облачной погоды, включая осадки. По данным метеостанции Малоярославец за указан-

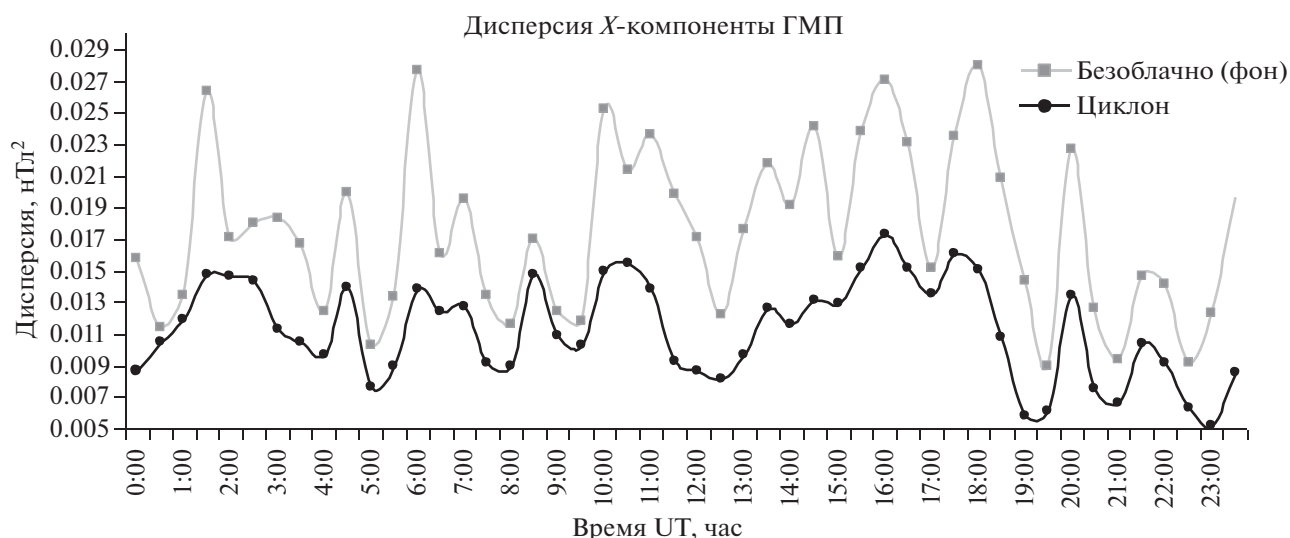


Рис. 1. Вариации дисперсии X-компоненты ГМП в фоновых и циклонических условиях по данным сентября 2012 г.

ный период времени произведено формирование отдельных целых суток, как с безоблачной, так и облачной погодой с низкой кучево-дождевой облачностью и осадками (циклонические условия). При этом сформированные сутки с облачной погодой также проверялись на отсутствие или минимум геомагнитной активности.

Временные ряды наблюдений ГМП, соответствующие сформированным суткам с облачной и безоблачной погодой, разделены на получасовые отрезки, для которых вычислялась дисперсия вариаций ГМП, являющаяся суперпозицией возмущений магнитного поля от процессов в облаках и местного магнитного фона. Магнитный эффект облачности определялся разностью фоновых значений дисперсии и дисперсии, вычисленной для циклонических условий.

Практика наблюдений ГМП показывает, что X-компонента оказывается наиболее чувствительной к различным его возмущениям. В этой связи мы ограничимся исследованиями вариаций ГМП только X-компоненты. На рисунке 1 представлены графики суточного хода дисперсий X-компоненты ГМП в сентябре 2012 г. для безоблачной и облачной погоды с дождями. Дисперсии возмущений вычислялись в ограниченном диапазоне частот 0.1–5 Гц. На рисунке 1 видно, что кривая (серого цвета), отвечающая циклоническим погодным условиям, располагается выше кривой, характеризующей магнитный фон пункта наблюдения. Разность дисперсий шума ГМП для фоновых и циклонических условий (эффект циклона), усредненная за сутки, составила  $0.006 \text{ (нТл)}^2$ .

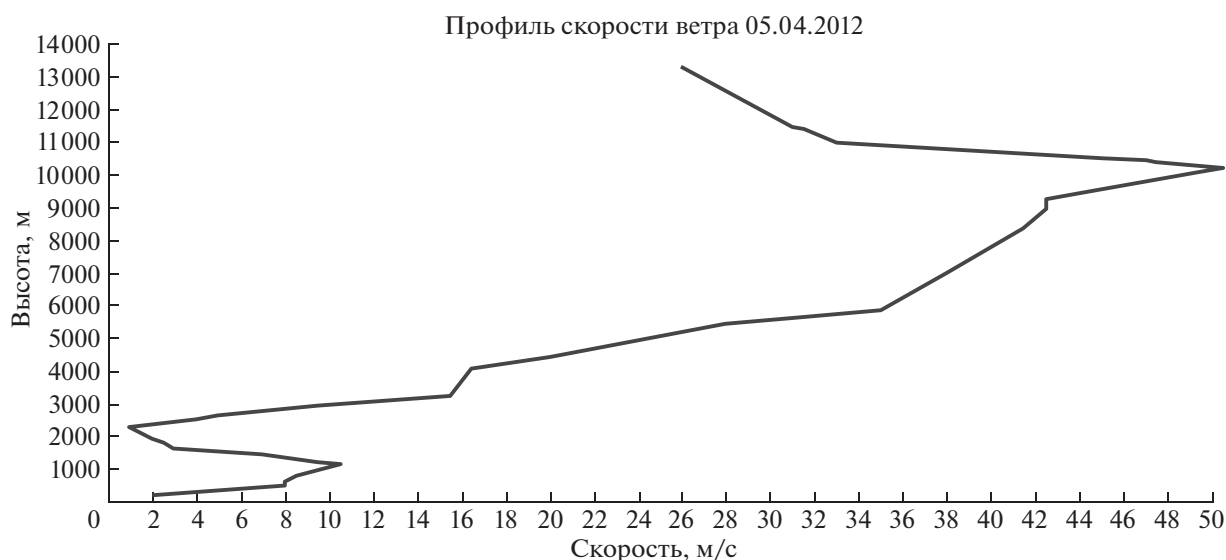
### 3. МЕТОДИКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЛЯ ОТДЕЛЬНОГО ЦИКЛОНА

В качестве следующего примера более подробно рассмотрим магнитные эффекты прохождения мощного циклона в период 4–5 апреля 2012 г. над Калужской и Московской областями. Метеорологические характеристики этого циклона подробно рассмотрены в работе [Нерушев и др., 2013], из которой видно, что данный циклон имел все признаки конвективной суперячейки с высотой верхней границы облаков до 10 км и сопровождался аномально обильным снегопадом, по интенсивности характеризуемым как опасное метеорологическое явление. Его особенностью являлось то, что он перемещался под действием сильного струйного течения с большим градиентом скорости ветра по высоте.

Вертикальный профиль скорости ветра по данным аэрологического зондирования показан на рис. 2. На этом рисунке видно, что верхняя часть облаков на высоте примерно 9–10 км перемещалась со скоростью  $\sim 42\text{--}50 \text{ м/с}$ , а нижняя часть облачности на высоте  $\sim 1\text{--}2 \text{ км}$  перемещалась со скоростью, не превышающей  $10 \text{ м/с}$ .

Мониторинг геомагнитного поля на территории как охваченной циклоном, так и за ее пределами осуществлялся феррозондовыми магнитометрами по стандартной методике, принятой во всемирной сети INTERMAGNET.

На рисунке 3 показаны фрагменты вариаций геомагнитного поля при прохождении циклона в Обнинске, а также на ближайшей магнитной обсерватории Борок (Ярославская обл.). Данные этой обсерватории были приняты в качестве фоновых для сравнения с результатами, полученными в



**Рис. 2.** Профиль скорости ветра, полученный на аэрологической станции (г. Долгопрудный, Московская обл.) 5 апреля 2012 г. (на 00 ч).



**Рис. 3.** Фрагменты магнитограмм (X-компонента), полученные из двух пунктов наблюдений во время прохождения циклона над г. Обнинском 4 и 5 апреля 2012 г.

Обнинске, поскольку ее территория осталась вне рассматриваемого циклона.

Числовые данные для графического представления вариаций ГМП для obs. Борок, показанные на рис. 3, получены из архива сети INTERMAGNET на сайте [www.intermagnet.org]. Штриховкой на этом рисунке показано время выпадения осадков в Обнинске в период с 19:00 4 апреля 2012 г. до 4:00 5 апреля 2012 г. по мировому времени (UT).

На рисунке 3 видно, что магнитные вариации в указанных пунктах по времени практически синхронны. Однако, как будет показано далее, в спектрах мелкомасштабных пульсаций магнитного поля в этих пунктах обнаруживаются заметные различия, которые, на наш взгляд, непосредственно связаны с влиянием облачной системы циклона, проходящего над Обнинском.

В качестве основных параметров, позволяющих выявить признаки влияния циклона в вариациях

ГМП, взяты дисперсии пульсаций магнитного шума, а также коэффициенты корреляции сигналов между обсерваториями Борок и Обнинск. Указанные параметры вычислялись за 9-часовые промежутки времени в диапазоне частот 4.3–8.3 мГц:

– на начальном этапе циклона с 10 до 19 ч 04.04.2012 г. (до выпадения осадков);

– в его активной фазе с 19:00 04.04.2012 г. до 4:00 05.04.2012 г. (сильный снегопад).

Кроме того, эти же параметры с целью сравнения были вычислены для условий спокойной метеорологической и геомагнитной обстановки с 10 до 19 ч 26.03.2012 г.

Представленная на рис. 4 блок-схема алгоритма для расчета параметров магнитного шума включает в себя два канала, каждый из которых параллельно обрабатывает данные по заданному пункту магнитных наблюдений: Борок и Обнинск. Развернутая структура алгоритма обработки в каждом из каналов показана для канала 1, канал 2 идентичен первому. Блок 1 осуществляет операцию выборки необходимых данных заданного файла для обработки. Блок 2 производит подготовку и форматирование полученных данных для дальнейших вычислений. В блоке 3 реализована функция удаления тренда из массива обрабатываемых данных. Блок 4 представляет собой цифровой фильтр верхних частот с перестраиваемой полосой пропускания. В блоке 5 вычисляются среднеквадратическое значение сигнала (RMS) данного канала и его дисперсия (D). Блок 6 выполняет вычисление спектра мощности пульсаций магнитного поля в вышеуказанной полосе частот. В блоке 7 после фильтрации производится вычисление коэффициента корреляции сигналов (R) для пары Борок–Обнинск. Блок 8 осуществляет запись в файл вычисленных спектров.

Цель сравнения дисперсий сигналов и коэффициентов корреляции заключается в следующем. В условиях отсутствия облачности и слабой возмущенности магнитного поля (в фоновых условиях) в двух относительно недалеко расположенных пунктах наблюдения временной ход вариаций поля должен был бы быть согласован по времени и близким по амплитуде. Однако наличие местных магнитных шумов приводит к их рассогласованности, которую можно охарактеризовать изменением значения коэффициента корреляции. Появление в одном из пунктов наблюдения ГМП мощной облачности, возмущающей геомагнитное поле, должно привести к уменьшению коэффициента корреляции сигналов. Кроме того, должна увеличиться дисперсия сигнала в пункте с облачностью. Данные изменения и будут являться признаками магнитного эффекта облачности в том пункте, который подвергся воздействию циклона. Переходя к конкретному анализу ситуации 4 и 5 апреля 2012 г. отметим, что облач-

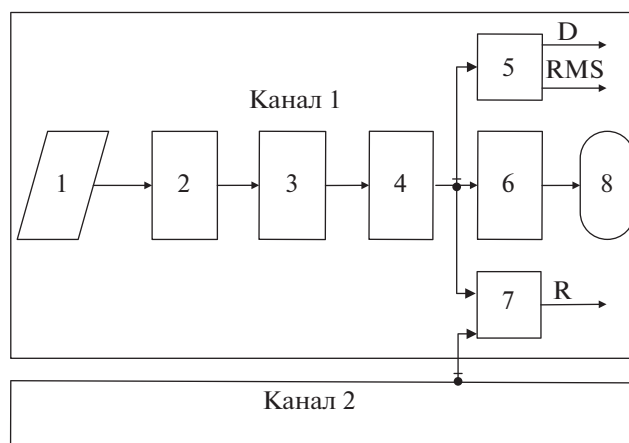


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчета параметров магнитного шума.

ная система циклона наблюдалась над Обнинском около суток. Обсерватория Борок располагалась за пределами области, по которой прошел циклон.

Выявление мелкомасштабных пульсаций геомагнитного поля, связанных с циклоном, проведем с помощью спектрального анализа. На рисунках 5–7 для сравнения представлены спектры мощности пульсаций  $X$ -компоненты ГМП, вычисленные в диапазоне частот 2.5–8.3 мГц по результатам наблюдений на обсерваториях Борок и Обнинск. При этом в качестве фоновых приняты результаты от 26 марта 2012 г., полученные в вышеуказанных пунктах в условиях антициклона и при минимальной геомагнитной активности.  $K$ -индекс по данным обсерватории Москва (ИЗМИ-РАН) не превышал единицы. Спектр, полученный в фоновых условиях, представлен на рис. 5, на котором видно, что амплитуды спектральных составляющих близки по значению, главным образом, в полосе частот 4.3–8.3 мГц. В этом же диапазоне наиболее заметен и магнитный эффект циклона, подтверждаемый рис. 6 и 7. В связи с выявленными особенностями спектров далее именно в диапазоне частот 4.3–8.3 мГц будут рассчитаны дисперсии и коэффициенты корреляции сигналов. Ограничение сверху данного диапазона частотой 8.3 мГц связано с одноминутным периодом дискретизации магнитных данных, что, согласно теореме Котельникова, не позволяет выделить в спектре сигналы с периодом меньше 2 мин или с частотой выше 8.3 мГц.

Нижняя граница диапазона 4.3 мГц выбрана, как указывалось выше, из соображений наибольшего наблюдаемого контраста магнитного эффекта циклона по сравнению с более низкими частотами, где сильнее заметны магнитные возмущения от геокосмических источников, а также от ионосферных процессов, не связанных с погод-

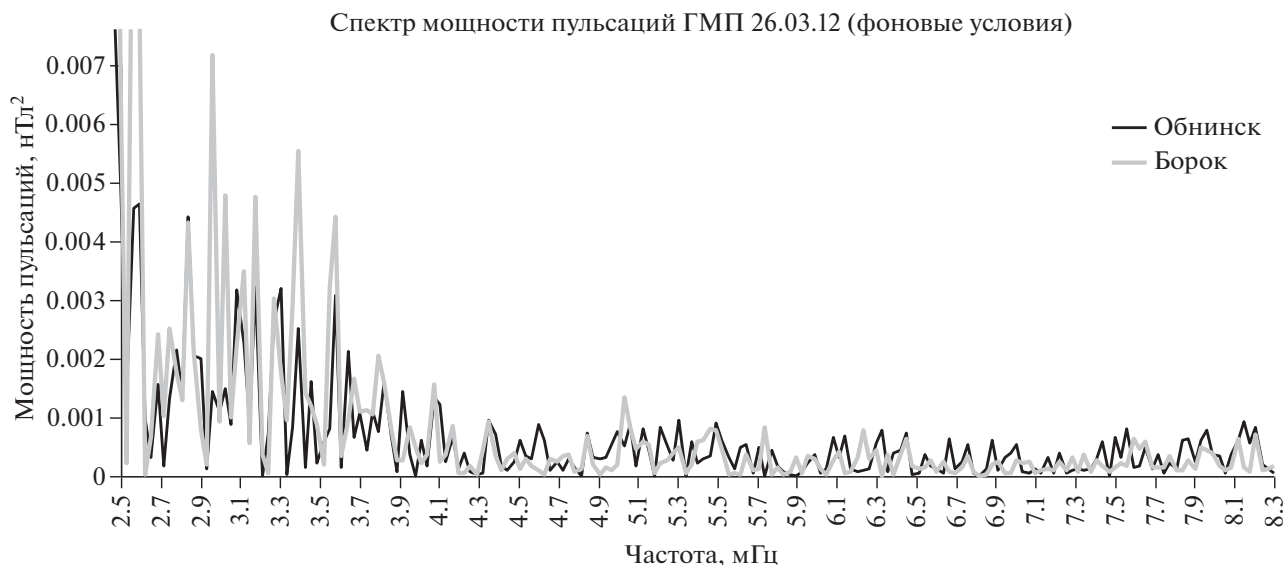


Рис. 5. Спектры мощности магнитных пульсаций ГМП в фоновых условиях 26.03.2012 г. для двух пунктов наблюдения.

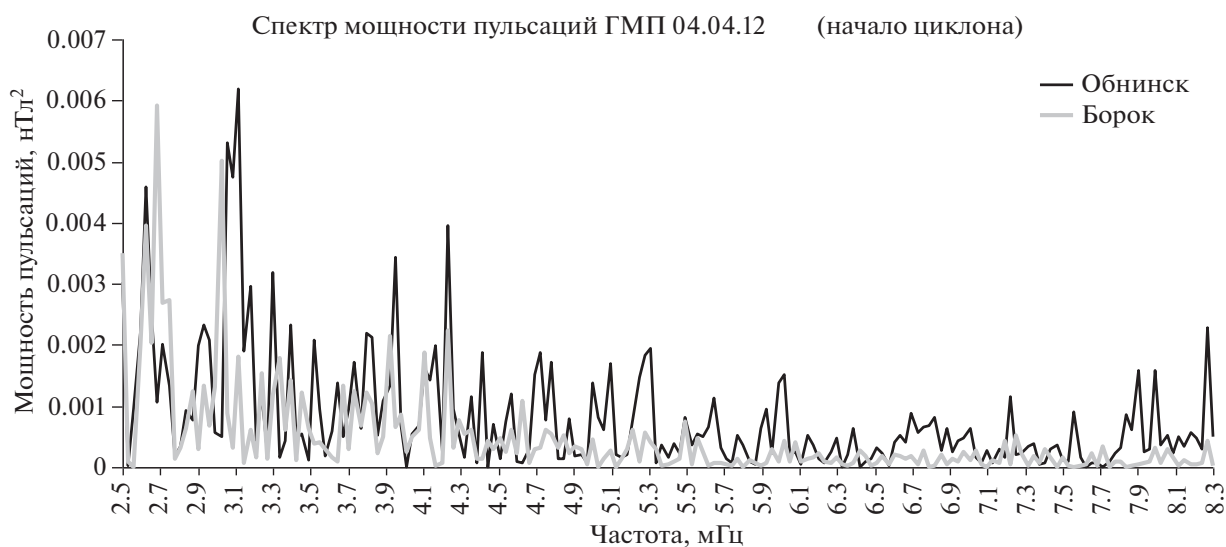


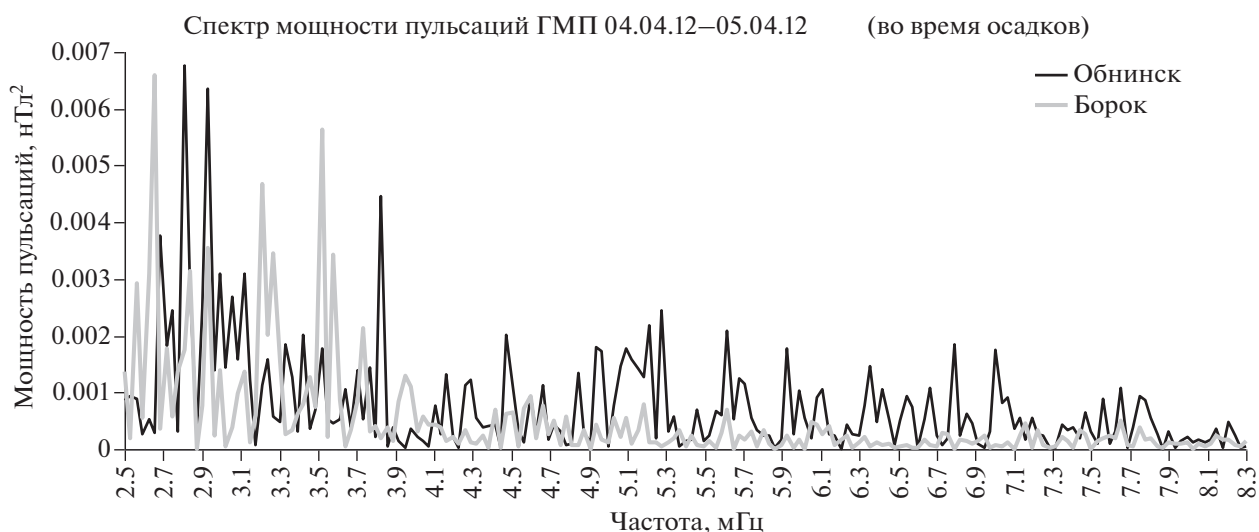
Рис. 6. Спектры мощности магнитных пульсаций в условиях приближающегося циклона (до начала осадков) 4 апреля 2012 г.

ными условиями в тропосфере, которые маскируют эффекты от циклона. Дисперсии сигналов в пунктах Борок и Обнинск, вычисленные для общих фоновых условий, составили, соответственно, 0.06 и 0.07 (нТл)<sup>2</sup>, т.е. довольно близкие значения. Коэффициент корреляции сигналов между указанными пунктами составил 0.57.

На рисунке 6 представлены графики спектров мощности пульсаций для начальной стадии циклона, приближающегося к Обнинску.

Из рисунка 6 видно, что уровень спектральных пиков в пункте мониторинга Обнинск существенно возрос по сравнению с пунктом Борок. Особен-

но это заметно для частот больших 4.3 мГц. Над территорией Обнинска в этот период наблюдалось появление перисто-слоистых и высококучевых облаков, которые по спутниковым данным [Нерушев и др. 2013] перемещались на высотах 3–10 км со средней скоростью 86 км/ч (~24 м/с), что согласуется с высотным профилем скорости ветра (рис. 2). Поскольку обл. Борок в это время оставалась вне поля облачности циклона, естественно предположить, что единственной причиной, вызывающей эффект возмущения геомагнитного поля в Обнинске, может являться только вышеуказанная облачность надвигающегося циклона.



**Рис. 7.** Спектры мощности магнитных пульсаций ГМП в г. Обнинске во время прохождения циклона с обильным снегопадом 4 и 5 апреля 2012 г.

Значения дисперсий в пунктах Борок и Обнинск, рассчитанные для условий приближающегося к Обнинску циклона составили, соответственно, 0.05 и 0.11 (нТл)<sup>2</sup>, т.е. дисперсия сигналов в пункте Обнинск возросла в 2.2 раза по отношению к пункту Борок. Коэффициент корреляции сигналов Борок–Обнинск уменьшился до 0.45 по сравнению с фоновым значением. Увеличение дисперсии сигнала в Обнинске, а также ослабление корреляционной связи между сигналами рассматриваемых пунктов наблюдения свидетельствует, на наш взгляд, о появлении над Обнинском дополнительных источников магнитных возмущений, которые мы связываем с магнитными полями движущихся зарядов облаков.

Аналогичная процедура анализа выполнена для ситуации, когда центр циклона с интенсивным снегопадом перемещался над Обнинском. На рисунке 7 показаны спектры мощности магнитных пульсаций в пунктах наблюдения Борок и Обнинск во время активной стадии циклона, проходящего над Обнинском. В окрестности obs. Борок погода оставалась по-прежнему практически безоблачной. Спектры, представленные на рис. 7, в общих чертах похожи на спектры, показанные на рис. 6. Точно так же в диапазоне частот 4.3–8.3 мГц сохраняется повышенный уровень спектральных составляющих сигнала в Обнинске по сравнению со спектром сигнала в фоновых условиях на obs. Борок.

Так же, как и в двух предыдущих случаях, вычислены дисперсии магнитных пульсаций в пунктах Борок и Обнинск для условий активной стадии циклона, проходящего над Обнинском с обильным снегопадом, которые составили, соответственно, 0.04 и 0.09 (нТл)<sup>2</sup>. Коэффициент кор-

реляции сигналов уменьшился до 0.36 по сравнению с фоновыми условиями.

Сводные данные дисперсий ГМП для X-компоненты в двух пунктах наблюдений, вычисленные для всех стадий циклона, представлены в табл. 1. Данные, приведенные в таблице, показывают, что дисперсия сигналов в пункте, над которым проходит мощный циклон, заметно увеличивается по отношению к тем пунктам, где наблюдается ясная погода. Одновременно корреляция сигналов между этими пунктами ослабляется по мере развития циклона. Из данных таблицы видно, что отношение дисперсий магнитного шума Обнинск/Борок в условиях прохождения циклона примерно в 2 раза выше, чем в фоновых условиях.

#### 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Приведем теоретические оценки магнитного эффекта исследуемого циклона, полагая, что он вызван магнитным полем движущихся заряженных облаков. Для этой цели используем теорему о циркуляции вектора магнитной индукции. По данным спутниковых наблюдений [Нерушев и др., 2013] облачная система циклона была вытянута вдоль направления движения более чем в два раза по сравнению с поперечным размером, имела размеры приблизительно 710 × 330 км и перемещалась со средней скоростью 24 м/с. Для использования теоремы о циркуляции вектора выберем контур в виде прямоугольника перпендикулярного движению облачной системы циклона, в поперечном сечении облака, охватывающего ее. Запишем уравнение циркуляции для вектора магнитной ин-

**Таблица 1.** Дисперсия пульсаций ГМП на разных стадиях циклона и коэффициент корреляции сигналов между пунктами наблюдений

Пункты наблюдений	Общие фоновые условия	Начальная стадия циклона	Активная стадия циклона
Дисперсия пульсаций ГМП, (нТл) <sup>2</sup>			
Обнинск	0.07	0.11	0.09
Борок	0.06	0.05	0.04
Коэффициент корреляции			
Обнинск–Борок	0.57	0.45	0.36

дукции в скалярном виде, [Яворский, Детлаф, 1974].

$$\oint_L B dl \cos \alpha = \mu_0 I, \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция движущегося облачного заряда (Тл);  $dl$  – элемент контура;  $\alpha$  – угол между вектором  $B$  и вектором элемента длины,  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $I$  – ток через выбранный контур (А).

В крупных кучевых облаках с осадками заряды разделяются по вертикали, причем нижняя часть облака оказывается заряженной отрицательно, а верхняя положительно [Имянитов и др. 1972]. Если в облаке имеется вертикальный сдвиг скорости ветра, то токи положительных и отрицательных зарядов будут различны, и в результате возникнет ненулевой ток  $i$ , в соответствии с (1), магнитное поле.

Рассмотрим простую модель двухслойного облака, в котором верхний слой заряжен положительно, нижний, такой же толщины, отрицательно с одинаковой по модулю плотностью. Тогда выражение для тока можно представить в виде

$$I = \rho Dh \Delta V, \quad (2)$$

где  $\rho$  – объемная плотность заряда облачных слоев (Кл/м<sup>3</sup>);  $D$  – характерный поперечный размер облака (м);  $h$  – толщины облачных слоев (м);  $\Delta V$  – разность средних скоростей движения слоев (м/с).

Учитывая, что вертикальные участки контура почти на два порядка меньше горизонтальных, их вкладом в циркуляцию пренебрежем, а так же положим  $\alpha \approx 0$ , так что интеграл в левой части (1) приближенно оценим величиной  $2BD$ . Таким образом, из равенства (1) с учетом соотношения (2) получим выражение для оценки магнитной индукции

$$B \approx 0.5 \mu_0 \rho h \Delta V. \quad (3)$$

Значение  $\rho$  определим, воспользовавшись данными [Имянитов, Шифрин, 1962], полученными в условиях мощных кучевых облаков, переходящих в ливневые и грозовые, которые соответствуют метеорологической ситуации в нашем случае. Ве-

личина объемной плотности зарядов в таких облаках может достигать  $10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>. Для оценки возьмем среднее значение  $5 \times 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>. Толщины заряженных слоев можно оценить в 4500 м. Величину  $\Delta V$ , используя рис. 2, можно оценить в 20 м/с. Подставляя эти значения в выражение (3), получим  $B \approx 0.3$  нТл.

Кроме рассмотренного механизма возмущения геомагнитного поля, следует рассмотреть еще один, связанный с осадками проходящего циклона. Как правило, частицы осадков несут электрические заряды, и, следовательно, процесс выпадения осадков сопровождается переносом заряда, т.е. электрическим током, который так же должен давать вклад в возмущение геомагнитного поля. Этот ток осадков (дождя, снегопада) обсуждался в литературе. Так в известной монографии [Чалмерс, 1974] отмечалось, что в условиях интенсивных атмосферных процессов (шквалов, ливней, гроз) плотность тока осадков может достигать величин порядка  $10^{-8}$  А/м<sup>2</sup>.

Приведем оценку значения плотности тока и возмущений геомагнитного поля, создаваемых осадками рассматриваемого циклона. Для оценки плотности тока, который будем обозначать через  $j$ , используем достаточно очевидное соотношение

$$j = \gamma \rho_c H / t, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – удельный заряд частиц осадков;  $\rho_c$  – плотность осадков;  $H$  – толщина слоя осадков, выпавших за время  $t$ .

Для частиц твердых осадков (снега) в монографии [Шишкин, 1964] приведены значения  $\gamma$ , равные 8.3 и 9.8 э.с.е/г. Для оценки возьмем, выразив заряд в кулонах, среднее значение  $3 \times 10^{-9}$  Кл/г. Для плотности рассматриваемой категории осадков (мокрый свежеснеговываливший снег) литературные данные дают интервал 0.06–0.15 г/см<sup>3</sup>. Для оценки возьмем среднее значение 0.1 г/см<sup>3</sup>. Далее, по данным работы [Нерушев и др., 2013] при прохождении циклона примерно за 8 ч в городах Малоярославец и Обнинск выпало, соответственно, от 22 до 30 см снега, в среднем 26 см.



Подставляя эти значения в выражение (6), получим  $j = 2.7 \times 10^{-9} \text{ А/м}^2$ .

Для оценки величины магнитного поля снова воспользуемся теоремой о циркуляции вектора магнитной индукции. В качестве контура возьмем горизонтальную замкнутую кривую, приблизительно совпадающую с границей облачного массива циклона, длину которой обозначим через  $l$ . Используя в качестве магнитной индукции ее среднее значение на контуре, которое обозначим через  $B_m$ , теорему о циркуляции приближенно представим в виде

$$B_m l = \mu_0 S j, \quad (5)$$

где  $S$  — площадь внутри контура (площадь циклона).

Для оценки аппроксимируем форму циклона эллипсом с продольной и поперечной осью, которые обозначим через  $L$  и  $D$  соответственно, равными 710 и 330 км, как отмечалось выше. Тогда площадь циклона будет определяться выражением  $\pi L D / 4$ , а длина контура  $l$ , которая выражается через полный эллиптический интеграл, при данном соотношении осей, приблизительно будет равна  $2.4L$ . Подставляя эти выражения в равенство (5), получим соотношение для  $B_m$

$$B_m \approx 0.1 \pi \mu_0 j D. \quad (6)$$

Для указанных выше значений  $j$  и  $D$  получим  $B_m \approx 0.34 \text{ нТл}$ . Стоит отметить, что данная оценка характерна для периферической части циклона, в то время, как в центральной части она может быть заметно меньше.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Среднесуточные значения дисперсий магнитного шума, полученные по экспериментальным данным в пункте Обнинск в фоновых и возмущенных условиях (раздел 2, рис. 1), позволили определить вклад наблюдаемых в сентябре 2012 г. циклонов в шумовую компоненту ГМП на уровне  $0.006 \text{ (нТл)}^2$  в широкой полосе частот  $0.1\text{--}5 \text{ Гц}$ . При этом среднеквадратическое значение магнитного шума циклонов в данном частотном диапазоне равно, соответственно,  $0.08 \text{ нТл}$ , что согласуется с результатами наблюдений, приведенными в работе [Щепетнов и др., 1986]. Необходимо отметить, что изменение внешних условий меняет характер суточного хода фоновой дисперсии магнитного шума во времени, что в свою очередь может приводить к изменению оценок дисперсии по экспериментальным данным мониторинга ГМП. По этой причине для других отрезков времени магнитный фон в данном пункте мониторинга каждый раз должен определяться заново.

Анализ магнитного шума во время прохождения 4–5 апреля 2012 г. над Обнинском мощного циклона показывает, что и на более низких частотах

4.3–8.3 мГц наблюдается повышение его уровня по сравнению с пунктом Борок, который в данной ситуации являлся фоновым (раздел 3). Дисперсия магнитного шума в Обнинске (магнитный эффект циклона) по данным наблюдений в среднем увеличилась примерно на  $0.05\text{--}0.06 \text{ (нТл)}^2$  по сравнению с Бороком. Соответственно, среднеквадратические значения добавки в магнитный шум в Обнинске составили приблизительно  $0.22\text{--}0.24 \text{ нТл}$ . Здесь необходимо отметить, что эти оценки шума несколько занижены из-за искусственно ограниченной для анализа полосы частот. В спектрах на рис. 6 и 7 видно, что вообще магнитный эффект циклона наблюдается и на более низких частотах до  $2.5 \text{ мГц}$ , однако надежно выделить его из фона на этих частотах значительно труднее. Рост дисперсии сигналов в полосе частот  $4.3\text{--}8.3 \text{ мГц}$  по сравнению с фоновыми условиями с практической точки зрения может служить хорошим индикатором возмущений ГМП, генерируемых циклонами при их прохождении через пункты мониторинга геомагнитного поля. Согласие выполненных на основе электродинамической модели теоретических оценок магнитной индукции поля, создаваемого облачной системой и осадками циклона, с экспериментальными данными свидетельствует об адекватности этой модели процессам, рассмотренным в настоящей статье.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате выполнения настоящей работы были экспериментально обнаружены и оценены геомагнитные возмущения, вызванные циклонической активностью в тропосфере.

Предложен физический механизм влияния интенсивных метеорологических атмосферных процессов в тропосфере на возмущения геомагнитного поля, в основе которого лежат эффекты возникновения магнитного поля при движении заряженных облаков под влиянием ветра с вертикальным сдвигом скорости и выпадении заряженных частиц осадков. На его основе проведены оценки возможных значений таких возмущений. Удовлетворительное согласие экспериментальных данных и теоретических оценок подтверждает реалистичность предлагаемого механизма.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А. Влияние тропического циклона на верхнюю ионосферу по данным томографического зондирования над островом Сахалин в ноябре 2007 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 51. № 6. С. 790–798. 2011.

- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат. 268 с. 1987.
- Имянитов И.М., Чубарина Е.В., Шварц Я.М. Электричество облаков. Л.: Гидрометеиздат, 93 с. 1971.
- Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // УФН. Т. LXXVI. вып. 4. С. 593–642. 1962.
- Исаев Н.В., Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Возмущения верхней ионосферы, вызванные тайфунами // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 2. С. 253–264. 2010.
- Колесник С.А., Пикалов М.В. Механизм воздействия инфразвука на вариации магнитного поля Земли // Изв. вузов. Физика, 9/3. Томск: ТГУ. С. 268–269. 2010.
- Нерушев А.Ф., Новицкий М.А., Калиничева О.Ю., Кулижникова Л.К., Милёхин Л.И., Чечин Д.Е. Динамика атмосферных характеристик в период интенсивного снегопада в центральной части ЕТР в апреле 2012 г. // Метеорология и гидрология. № 2. С. 5–17. 2013.
- Пикалов М.В., Колесник С.А., Соловьев А.В., Лобычева И.Ю. Зависимость электромагнитного фона от метеорологических условий / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XVI Международного симпозиума. Томск: ИОА СО РАН. С. 609–611. 2009.
- Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 420 с. 1974.
- Шишкин Н.С. Облака осадки и грозовое электричество. Л.: Гидрометеиздат, 403 с. 1964.
- Щепетнов Р.В., Троицкая В.А., Довбня Б.В. Электромагнитное излучение с центральной частотой 2 герца во время мощного циклона 9 июня 1984 г. М.: Наука. ДАН. Т. 290. № 3. С. 582–585. 1986.
- Яворский Б.М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М.: “Наука”, 942 с. 1974.
- <http://rp5.ru/5174/ru>.
- Krishnam Raju D.G., Rao M.S., Rao B.M., Jogulu C., Rao C.P., Ramanadham R. Infrasonic oscillations in the F2 region associated with severe thunderstorms // J. Geophys. Res. V. 86. № A7. P. 5873–5880. 1981.
- Prasad S.S., Schneck L.J., Davies K. Ionospheric disturbances by severe tropospheric weather storms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. P. 1357–1363. 1975.