

УДК 550.3+550.4+533.95

## СЕЙСМИЧЕСКИЕ, АТМОСФЕРНО-ВОЛНОВЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ МОЩНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ

© 2022 г. А. А. Спивак<sup>1</sup>, \*, В. М. Овчинников<sup>1</sup>, Ю. С. Рыбнов<sup>1</sup>,  
С. А. Рябова<sup>1</sup>, В. А. Харламов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: [aaspivak100@gmail.com](mailto:aaspivak100@gmail.com)

Поступила в редакцию 10.01.2022 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 17.02.2022 г.

Обсуждаются возмущения сейсмического шума, магнитного поля, электрических характеристик приземной атмосферы и микробарических вариаций, вызванных прохождением холодных атмосферных фронтов 2-го рода. Предложен новый подход к разработке комплексного прогностического признака мощных атмосферных фронтов, потенциально опасных по последствиям в виде ураганов, шквалов и сильных гроз, основанный на анализе совместных вариаций электрического поля и вертикального тока приземной атмосферы, магнитного поля и микропульсаций атмосферного давления в период, предшествующий наступлению наиболее интенсивных проявлений указанных явлений. Полученные данные могут способствовать повышению надежности краткосрочного прогноза опасных атмосферных явлений.

*Ключевые слова:* атмосферный фронт, сейсмический шум, акустические колебания, акустико-гравитационные волны, электрическое поле, атмосферный ток, магнитное поле, вариации, прогностический признак.

DOI: 10.31857/S0002333722040111

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается беспрецедентное увеличение количества опасных по негативным последствиям для человека и его производственной деятельности атмосферных явлений в виде ураганов, шквалов, ливневых осадков с затоплением значительных по размеру территорий, а также сильных гроз. Считается, что эти погодные катаклизмы связаны с изменением земного климата, а точнее, как это постоянно отмечается Межправительственной группой экспертов ООН по изменению климата (IPCC) [Climate, 2021], с глобальным потеплением на планете.

Мощные атмосферные явления, как правило, являются следствием мощной циклонической деятельности. Действительно, отмечаемые нарушения сезонного хода повторяемости мощных циклонов и их распределения по земной поверхности приводят к сложным и весьма изменчивым погодным условиям. Вероятнее всего это связано с увеличением контрастности термобарических зон и изменением направлений глобальных воздушных потоков в атмосфере Земли. В результате изменяются длительности синоптических периодов, и главное — увеличивается количество ло-

кальных природных явлений с опасными последствиями.

Традиционно описание мощных атмосферных явлений и прогноз их негативных последствий основываются на анализе метеорологической обстановки [Алексеева, 2017; Атмосфера, 1991; Губенко, Рубинштейн, 2017; и др.]. Однако, как показывает опыт, указанный подход характеризуется известной неопределенностью в оценках конкретного района, времени, а главное интенсивности самого явления и его последствий. В связи с этим представляет интерес рассмотрение геофизических эффектов, сопровождающих мощные атмосферные явления, и не только с точки зрения полноты их описания, но также с целью разработки прогностических признаков [Спивак, Рябова, 2022; Спивак и др., 2019].

Следует отметить, что по негативным последствиям особый интерес представляет рассмотрение атмосферных явлений, которые происходят при прохождении холодных атмосферных фронтов 2-го рода, характеризующихся достаточно высокой скоростью распространения и мощными турбулентными движениями воздушных масс [Атмосфера, 1991]. В этом случае формирование в окрестности линии атмосферного фронта и вдоль

его фронтальной поверхности активной атмосферной ячейки, представленной мощными конвективными потоками, осложненными спиралеобразными движениями воздушных масс, вызывает не только волновые движения в атмосфере, но также электрические и магнитные эффекты [Адушкин и др., 2021; Кузнецов и др., 2007; Пхалагов и др., 2009]. Одновременно с этим фронт проявляется в изменениях характеристик сейсмического шума [Adushkin et al., 2008; Loktev, Spivak, 2008], генерация которого происходит в результате упругой реакции земной среды на вариации гравитационного поля атмосферного фронта [Muller, Zurn, 1983].

Вызванные фронтальными возмущениями внутренними гравитационными волнами (ВГВ), скорость распространения которых  $v_g$  превышает скорость продвижения атмосферного фронта  $v_f$  [Грачев и др., 1994; Spivak et al., 2018c], опережают фронт и регистрируются до его прихода в пункты регистрации, что является основанием для разработки прогностических признаков приближающегося сильного атмосферного события. При этом возникает потенциальная возможность оценивать масштаб негативных последствий этого события на основе анализа амплитудных и спектральных характеристик предвестника [Адушкин, Спивак, 2014].

В настоящей работе демонстрируются геофизические эффекты мощных атмосферных фронтов, а также предлагается новый подход к разработке комплексного прогностического признака, основанного на совместном анализе микробарических вариаций и вариаций электрических характеристик и магнитного поля приземной атмосферы в периоды времени, предшествующие приходу опасного по последствиям атмосферного фронта.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использовались цифровые ряды инструментальных наблюдений, выполненных на среднеширотной Геофизической обсерватории “Михнево” (ГФО МНВ) ИДГ РАН<sup>1</sup> (ГЕО: 54.95° с.ш., 37.73° в.д.; СГМ: 51.12° с.ш., 11.79° в.д.) и Центра геофизического мониторинга г. Москвы (ЦГМ) ИДГ РАН (ГЕО: 55.71° с.ш., 37.57° в.д.) в периоды сильных возмущений атмосферы при прохождении холодных атмосферных фронтов, сопровождающихся ураганами, шквалами и сильными грозами. В общей сложности рассмотрено 23 события указанного типа, которые произошли за период 2009–2018 гг.

Анализировались результаты сейсмических наблюдений, регистрации микропульсаций атмосферного давления  $P$  и вариаций напряженности

электрического поля в МНВ и ЦГМ, магнитного поля и атмосферного тока в МНВ [Адушкин, Спивак, 2014]. Регистрация выполнялась в приземном слое атмосферы. Метеорологические параметры атмосферы (температура  $T$  и влажность  $W$  воздуха, атмосферное давление  $P_0$ , скорость ветра  $V$ , мощность солнечного излучения  $S_0$ ) регистрировались с помощью цифровой автоматической метеостанции Davis Vantage Pro2.

Сейсмическая регистрация выполнялась с использованием сейсмометра STS-2 и цифровой сейсмической станции АЦСС-3 в диапазоне частот 0.008–100 Гц.

Микропульсации атмосферного давления амплитудой в диапазоне 0.01–200 Па измерялись с помощью микробарометров МБ-03 (полоса регистрации (по уровню –3 дБ) – 0.0003–10 Гц) [Адушкин и др., 2020].

Напряженность электрического поля (вертикальная компонента  $E$ ) измерялась с помощью электростатического флюксметра ИНЭП, который обеспечивает измерения  $E$  в интервале от 1 В/м до 6–10 кВ/м в зависимости от конкретного экземпляра<sup>2</sup> в частотном диапазоне 0–20 Гц [Адушкин и др., 2018]. Непрерывная регистрация вертикальной компоненты атмосферного тока  $I$  в МНВ осуществлялась с помощью компенсационного регистратора тока с частотой опроса 1 Гц [Барышев и др., 2009]. Вследствие высокой временной вариабельности  $I$  в настоящей работе использовались ряды его абсолютных значений, усредненные по одноминутным интервалам.

Постоянная регистрация трех компонент магнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  в направлениях соответственно:  $x$  – на географический север,  $y$  – на географический восток,  $z$  – вертикальная компонента вниз и их вариаций с периодами, превышающими 1 с, выполнялась с помощью трехкомпонентного магнитометра LEMI-018, обеспечивающего измерения в диапазоне  $\pm 68000$  нТл с разрешением 10 пТл (частота опроса 1 Гц).

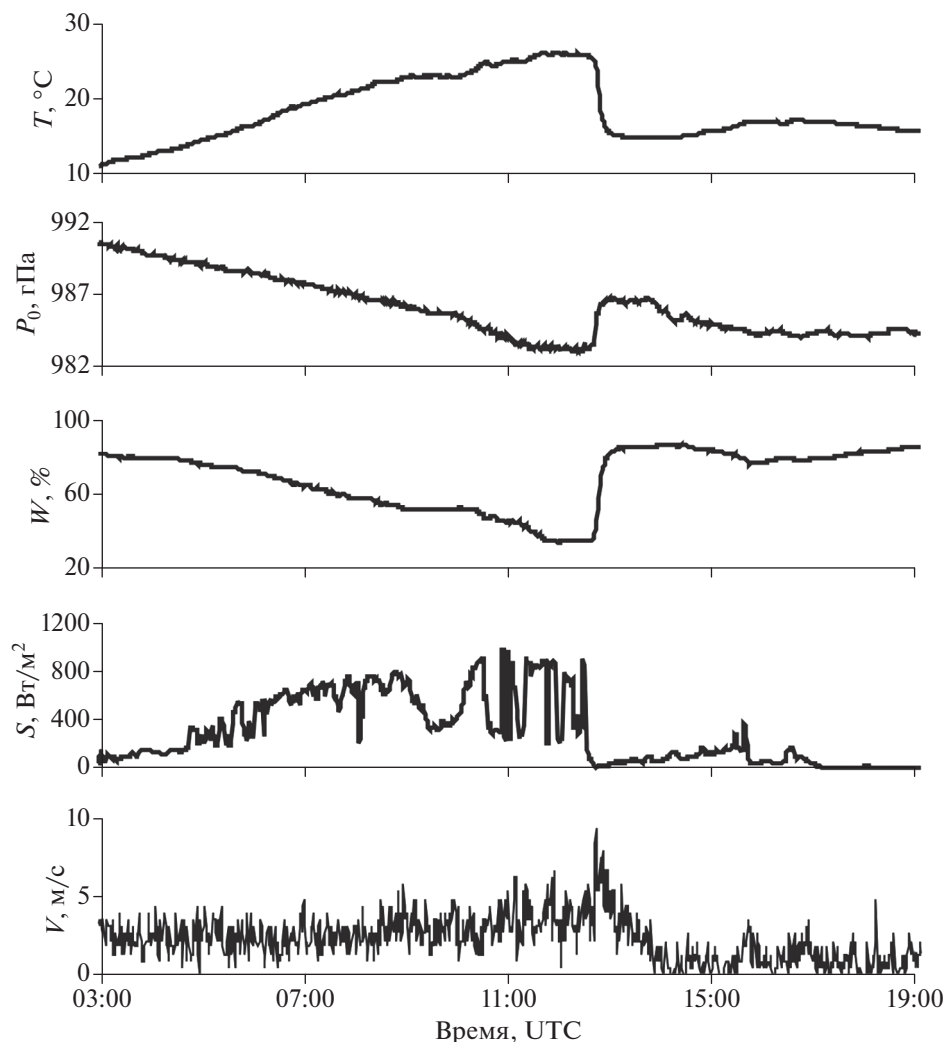
Обработка цифровых рядов с определением амплитудных, временных и спектральных характеристик рассматриваемых геофизических полей выполнялась с использованием методов анализа цифровых рядов и выделения полезных сигналов, предложенных в работе [Хаттон и др., 1989]).

## 3. ПРОЯВЛЕНИЕ МОЩНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Прохождение холодного атмосферного фронта сопровождается резкими изменениями в суточ-

<sup>1</sup> Обсерватория расположена в ~85 км южнее г. Москвы.

<sup>2</sup> В процессе организации постоянного мониторинга экземпляры ИНЭПов периодически сменяются с целью очистки рабочих поверхностей от загрязнения.



**Рис. 1.** Вариации метеопараметров в период прохождения сильного атмосферного фронта 29.05.2017 г. по данным ЦГМ (скорость ветра усреднена по 1 мин интервалу).

ном ходе не только температуры воздуха  $T$ , но также атмосферного давления  $P_0$ , влажности воздуха  $W$ , скорости ветра  $V$  и мощности солнечного излучения  $S_0$ , что является следствием интенсивного формирования, как правило, мощной кучево-дождевой ( $c_b$ ) облачности. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты регистрации метеопараметров в период известного по своим негативным последствиям в г. Москва события – прохождения мощного холодного атмосферного фронта 29.05.2017 г. [Куличков и др., 2019; Spivak et al., 2018b].

Как это видно из рис. 1, холодный атмосферный фронт, распространяющийся с юго-восточного направления, вызвал падение температуры воздуха на  $\sim 10^\circ\text{C}$  и значительные изменения суточного хода метеопараметров, а также и усиле-

ние ветра, порывы которого достигали величины, превышающей 30 м/с.

Воздействие сильного холодного фронта 2-го рода на окружающую среду обусловлено несколькими факторами: 1) резким изменением атмосферного давления, оказывающего механическое действие на земную кору [Muller, Zurn, 1983]; 2) мощными движениями воздушных масс в атмосферной ячейке, порождающими помимо акустико-гравитационных волн (АГВ) и волны на частоте Брента–Вяйсяля и ниже [Данилов, Свертилов, 1991; Грачев и др., 1994; Кашкин, 2013; Куличков и др., 2017; 2019; Курдяева и др., 2019; Романова, Якушкин, 1995; Hines, 1960]; 3) формированием возмущенной области в ионосфере в эпицентральной зоне атмосферной ячейки, что вызывает модификацию ее электронной плотно-

сти и электрические токи и, как следствие, вариации электрических характеристик атмосферы и магнитного поля<sup>3</sup> [Скорород, Лизунов, 2012; Спивак, Рябова, 2022; Федоренко, 2017].

Вызванные фронтальными возмущениями ВГВ распространяются на значительные расстояния вследствие слабого затухания при распространении по атмосферному волноводу и являются значимым фактором, определяющим турбулентный характер возмущения приземной атмосферы на мезомасштабном и мелкомасштабном уровне и соответственно возмущения электрического и магнитного поля [Адушкин и др., 2020]. При этом скорость распространения ВГВ характеризуется величиной в районе 40–60 м/с, что в целом заметно превышает скорость движения холодного фронта 2-го рода, которая, как правило, находится в диапазоне 12–18 м/с и в редких случаях достигает 28 м/с [Атмосфера, 1991; Грачев и др., 1994; Spivak et al., 2018a]. Вследствие этого вызванные атмосферным фронтом микробарические вариации регистрируются до прихода фронта в точку наблюдения.

### 3.1. Отклик сейсмического шума на прохождение атмосферного фронта

Известно, что изменение атмосферного давления вносит определенные возмущения в микросейсмические колебания земной коры [Adushkin et al., 2008; Loktev et al., 1983; Spivak, 2008]. Вариации атмосферного давления, вызываемые мощными атмосферными фронтами, могут достигать по амплитуде 100–150 Па [Вошан, Спивак, 2017; Spivak et al., 2018b]. Это приводит к изменению амплитудных характеристик сейсмического шума. В качестве примера на рис. 2 приведены вариации амплитуды (скорости смещения) сейсмического шума  $A$  в период прохождения мощного холодного атмосферного фронта 29.05.2017 г. Подход фронта к точке регистрации в МНВ зарегистрирован в ~10:45 UTC и вызвал падение температуры воздуха на ~5.5°C. Как это следует из рис. 2б, в это же время наблюдается увеличение  $A$  до ~18 мкм/с. При этом следует особо отметить, что возмущение сейсмического шума в виде заметного увеличения среднеквадратичного отклонения (СКО) регистрируется также и в период, предшествующий приходу фронта (рис. 2в). Эффект, выраженный в увеличении СКО до ~двух фоновых значений, явно проявляется примерно за 3 ч до прихода фронта, что объясняется опережающим распространением вызванного фронтом сейсмического возмущения.

<sup>3</sup> В качестве другого возможного механизма генерации возмущений геомагнитного поля рассматривается также электродинамический эффект при движении электрически заряженных облаков и выпадении осадков [Чекрызов и др., 2019].

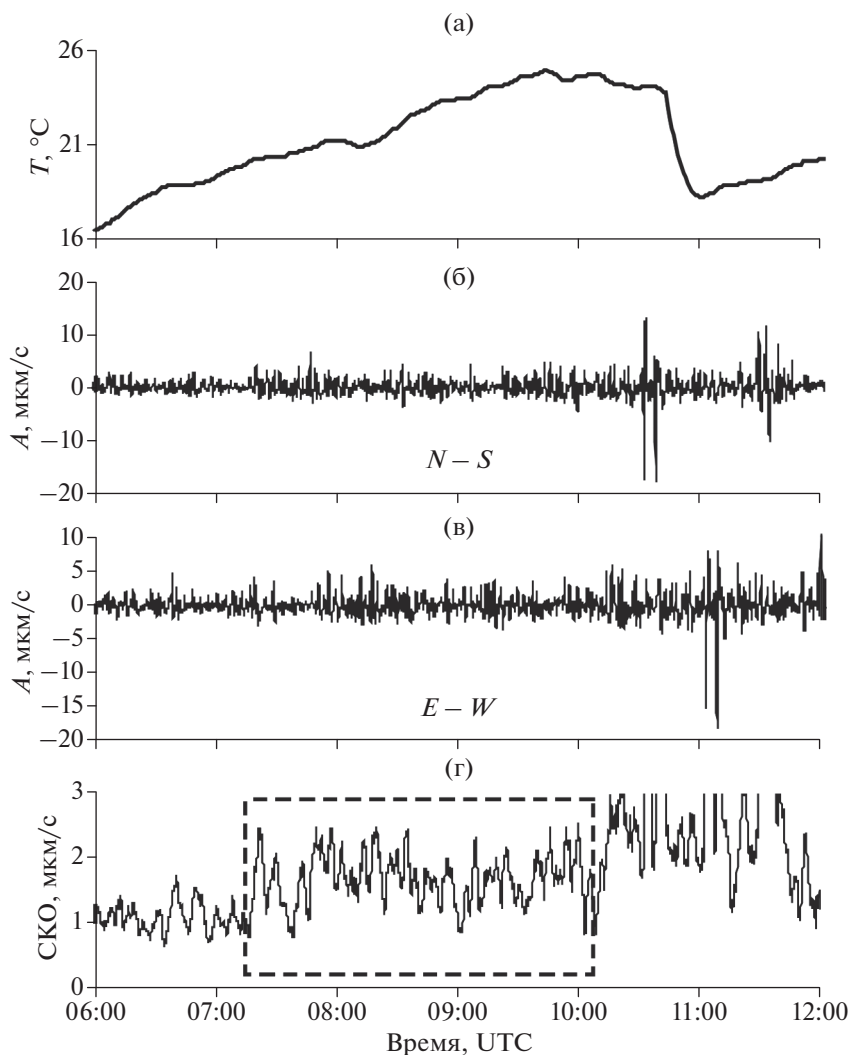
Другой пример характеризует изменение сейсмического шума в период прохождения холодного атмосферного фронта меньшей интенсивности. Фронт 11.07.2015 г. проявился в МНВ примерно в 14:30 UTC (рис. 3) и сопровождался достаточно резким падением температуры воздуха на ~5°C. Так же как и в первом случае наблюдалось увеличение примерно на порядок амплитуды сейсмического шума, осложненное импульсными помехами в диапазоне частот от 4 до 7 Гц (рис. 3 и рис. 4). Частотный состав и поляризационные характеристики импульсных помех позволяют утверждать, что они носят локальный характер. Более того, по данным ISC (International Seismological Centre), в течение 24 ч до обсуждаемого явления не было землетрясений с магнитудой  $m_b > 6$  на расстояниях меньше 110° и с  $m_b > 5$  на расстояниях меньше 70° и, следовательно, импульсные сигналы не связаны с сейсмичностью Земли, а являются следствием приближения атмосферного фронта.

### 3.2. Волновой эффект в атмосфере

Мощные атмосферные фронты, сопровождающиеся ураганами, шквалами и сильными грозами, вызывают значительное увеличение микропульсаций атмосферного давления. В качестве примера на рис. 5 приведена амплитуда барических микропульсаций  $P$  в период прохождения мощного атмосферного фронта 30.06.2018 г. Для сопоставления на том же рисунке приведен ход температуры воздуха  $T$ .

Из рис. 5 следует, что холодный атмосферный фронт, характеризующийся падением температуры воздуха на ~9°C, вызвал увеличение амплитуды микробарических вариаций  $P$  до ~90 Па в период максимального изменения  $T$ . Здесь следует отметить, что сходный с этим характер микробарического эффекта наблюдается при всех рассмотренных в настоящей работе событиях.

Более детальный анализ показывает, что микробарические возмущения, но меньшей амплитуды проявляются в периоды, предшествующие приходу атмосферного фронта. В качестве иллюстрации на рис. 5в приведен фрагмент записи микробарических вариаций в увеличенном масштабе. Как это следует из рис. 5в примерно за 2 ч до максимальных по амплитуде вызванных атмосферным фронтом микробарических вариаций, начиная с ~09:40 UTC, регистрируются повышенные микробарические вариации амплитудой до ~10 Па с периодом ~30 мин. Указанные вариации связаны с приходом в точку наблюдений ВГВ, распространяющихся в стратосферном волноводу в условиях устойчивой стратификации. Эффект возмущения микробарических вариаций до прихода фронта может свидетельствовать о потенциальном наличии краткосрочного акустиче-



**Рис. 2.** Изменение температуры воздуха  $T$  (а), вариаций амплитуд горизонтальных компонент сейсмического шума  $A$  (б), (в) и среднеквадратического отклонения амплитуды сейсмического фона  $SKO$  (г) в период прохождения сильного атмосферного фронта 29.07.2017 г. по данным МНУ (пунктиром выделена область повышенных амплитуд  $SKO$ ).

ского предвестника сильного атмосферного фронта.

### 3.3. Электрические эффекты мощных атмосферных фронтов

Как показывают данные наблюдений, интенсивные атмосферные и ионосферные возмущения, сопровождающие прохождение мощных атмосферных фронтов, вызывают значительные вариации напряженности электрического поля, амплитуда которых достигает 3000–6000 В/м и более. В качестве типичного примера на рис. 6 представлены вариации вертикальной компоненты электрического поля в период прохождения сильного атмосферного фронта через МНУ 29.05.2017 г.

Из рис. 6 следует, что в период максимальной скорости изменения температуры воздуха (рис. 2) наблюдаются значительные вариации атмосферного электрического поля и тока на земной поверхности. Максимальные амплитуды вариаций  $E$  и  $I$  достигают соответственно  $\sim 4800$  В/м и  $\sim 75$  пА/м<sup>2</sup>. При этом следует отметить безгрозово-вой характер рассматриваемого атмосферного фронта.

Анализ вариаций  $E$  в период, предшествующий приходу атмосферного фронта, показывает, что за  $\sim 1.5$ –4 ч до периода максимальных вызванных фронтом вариаций электрического поля регистрируются повышенные вариации  $E$  амплитудой до  $\sim 200$  В/м (рис. 7).

Представляет определенный интерес рассмотрение вариаций электрического поля при про-

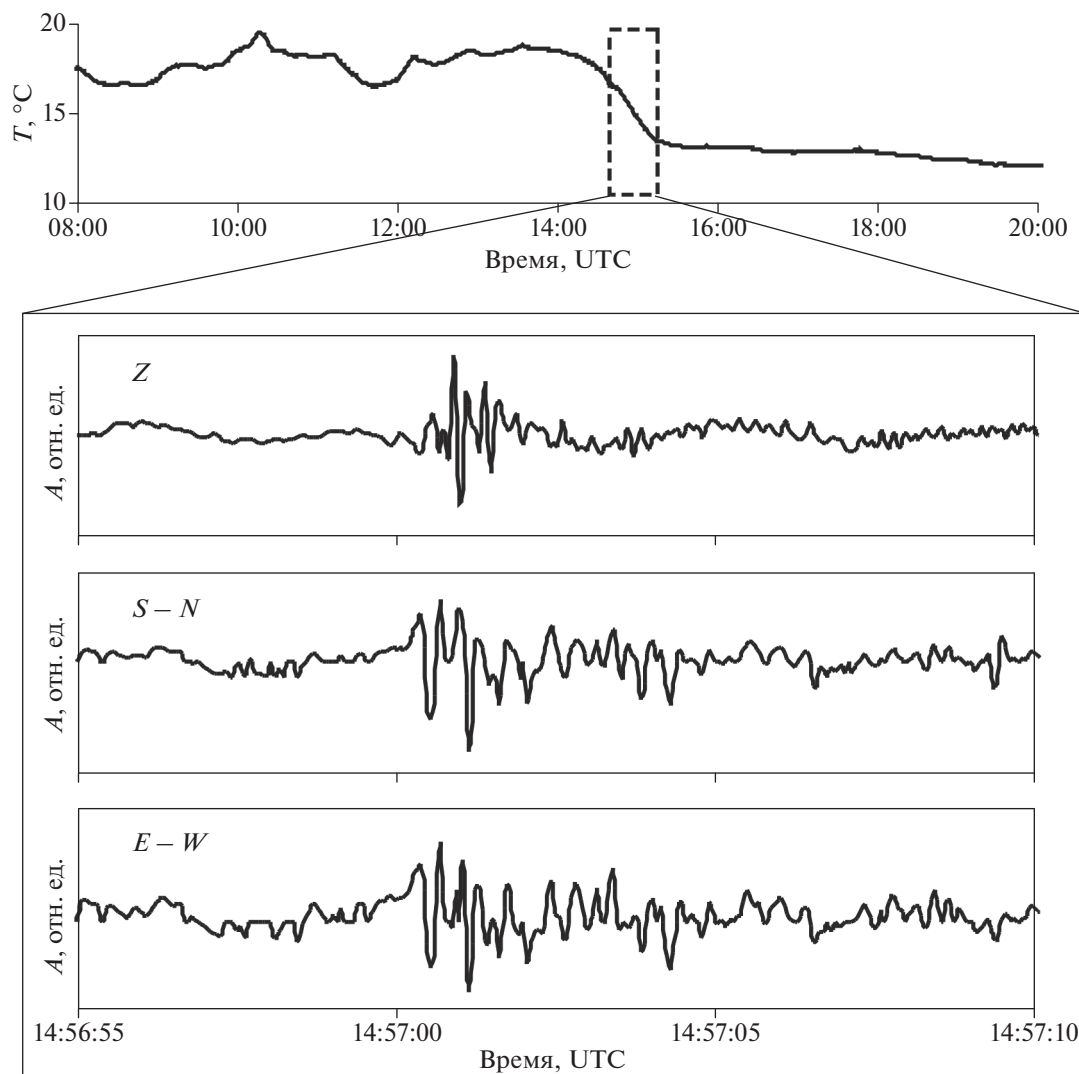
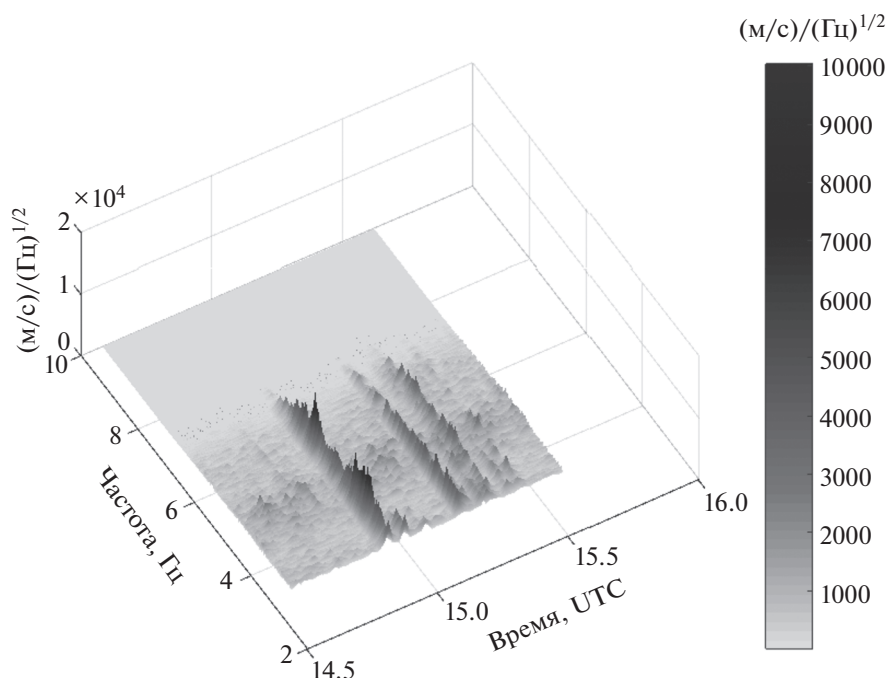


Рис. 3. Изменение температуры воздуха  $T$  и вариаций амплитуды сейсмического фона  $A$  в период прохождения сильного атмосферного фронта 11.07.2015 г. по данным МНУ.

хождении атмосферного фронта с грозовой ячейкой. В этом случае на суточном ходе электрического поля отчетливо проявляются молниевые разряды. Причем, при достаточной чувствительности измерительного канала отчетливо регистрируются удаленные молниевые разряды за некоторое время до прихода атмосферного фронта в точку наблюдений. В качестве примера на рис. 8 представлены вариации  $E$ , зарегистрированные в ЦГМ в период прохождения атмосферного фронта с грозовой ячейкой 18.08.2021 г. Атмосферный фронт, распространяющийся в северо-западном направлении, подошел к ЦГМ в  $\sim 13:42$  UTC и вызвал резкое понижение температуры воздуха у земной поверхности соответственно на  $\sim 11^\circ\text{C}$ . Средняя скорость изменения температуры составила  $\sim 0.17^\circ\text{C}/\text{мин}$  при максимальном значении  $\sim 0.47^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

Характер реакции атмосферного электрического поля на прохождение грозовой ячейки хорошо виден из врезки на рис. 8. Примерно за 10 мин до подхода фронта датчик электрического поля начал регистрировать удаленные молниевые разряды, затем в период с  $\sim 13:41$  до  $\sim 13:51$  UTC был отмечен период локальной, так называемой “сухой”, грозы, во время которой на записях электрического поля хорошо проявлялись молниевые разряды местного происхождения<sup>4</sup>. Затем в период с  $\sim 13:51$  до  $\sim 14:10$  UTC наблюдалось уменьшение  $E$  до отрицательных значений, что было вызвано сильными осадками. Однако и в этом случае на записях электрического поля отчетливо регистрировались молниевые разряды.

<sup>4</sup> Вынесенный рисунок в увеличенном масштабе демонстрирует стадии формирования грозовой ячейки.



**Рис. 4.** Спектрально-временная диаграмма вариаций амплитуды сейсмического фона в период прохождения сильного атмосферного фронта 11.07.2015 г. по данным МНУ.

Общая длительность возмущения электрического поля составила около 1 часа при максимальной амплитуде вариаций  $E$  более 3000 В/м.

### 3.4. Геомагнитные вариации, сопутствующие прохождению мощных атмосферных фронтов

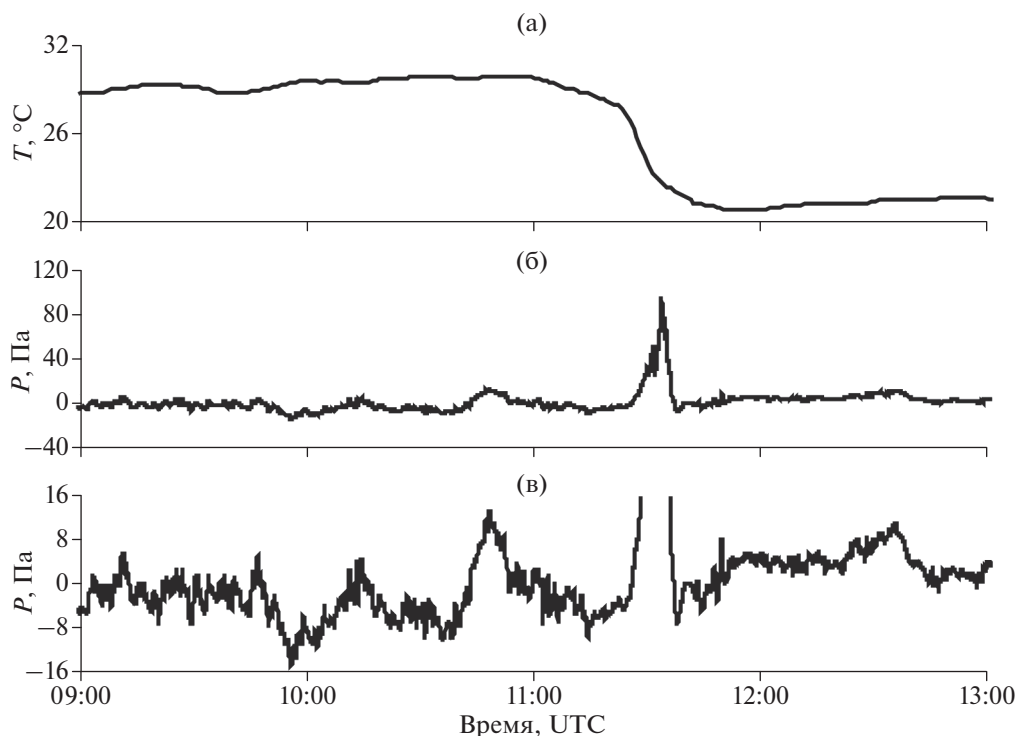
Мощный атмосферный фронт сопровождается увеличенными вариациями индукции геомагнитного поля. В качестве примера рассмотрим геомагнитный эффект холодного атмосферного фронта 12.05.2021 г. Атмосферный фронт проявился резким снижением температуры воздуха в приземной атмосфере в МНУ в период с ~14:15 UTC до

14:30 UTC (рис. 9). В ~14:30 UTC скорость спада температуры уменьшилась с 0.16 до 0.0018°C/мин. Выход температурного режима воздушных масс на стационарный режим состоялся в ~15:45 UTC. Таким образом общее время спада  $T$  составило ~95 мин.

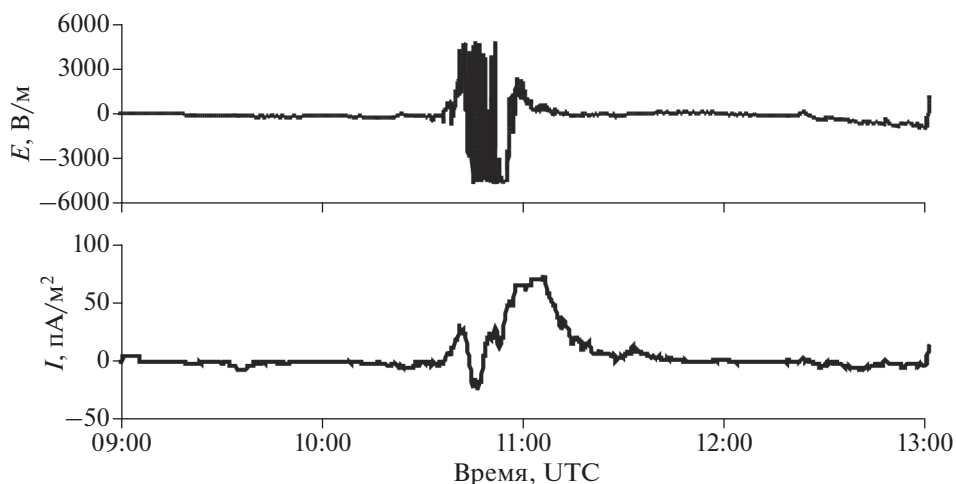
Повышенные знакопеременные вариации горизонтальной, наиболее чувствительной к внешним возмущениям, компоненты индукции магнитного поля  $B_H = \{B_x^2 + B_y^2\}^{1/2}$  зарегистрированы, начиная с ~14:40 UTC, и продолжались в течение ~70 мин до ~15:50 UTC. При этом вариации  $B_H$  характеризовались периодом ~25 мин и максимальной амплитудой ~75 нТл.

**Таблица 1.** Значение стационарного (МНУ)  $K$ -индекса магнитной активности

Дата	Время суток (UTC)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
16.08.2021 г.	2	1	2	1	3	2	1	2
17.08.2021 г.	1	1	0	3	2	2	0	2
18.08.2021 г.	2	1	1	2	1	1	2	0
19.08.2021 г.	0	0	0	2	2	1	1	1
20.08.2021 г.	0	1	2	2	3	3	2	0



**Рис. 5.** Изменение температуры воздуха  $T$  (а); амплитуды микробарических вариаций  $P$  (б) в период прохождения сильного атмосферного фронта 30.06.2018 г. по данным МНУ; (в) – фрагмент записи микробарических вариаций в увеличенном масштабе.



**Рис. 6.** Вариации вертикальных компонент электрического поля  $E$  и атмосферного тока  $I$  в период прохождения сильного атмосферного фронта 29.05.2017 г. по данным МНУ.

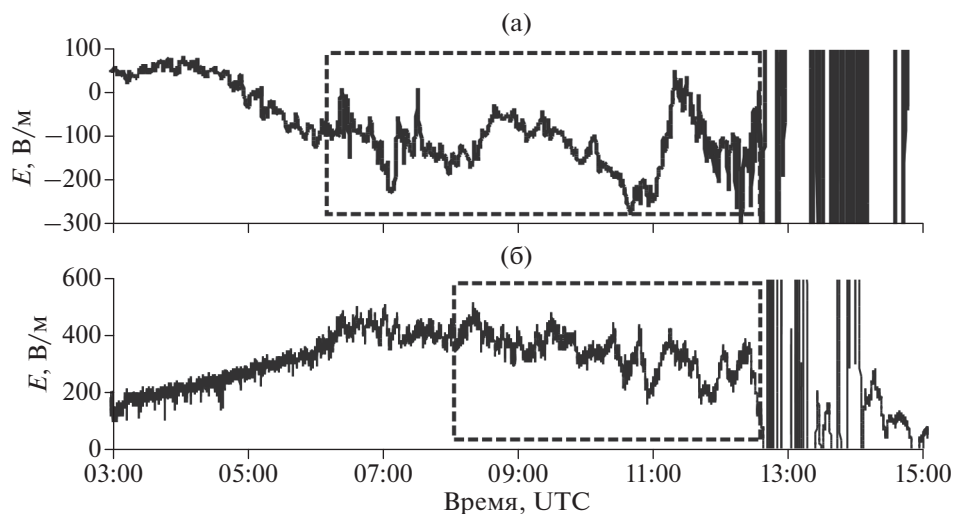
Отдельный интерес представляют геомагнитные вариации, вызванные прохождением грозовой ячейки. В качестве примера на рис. 10 представлены вариации  $B_H$ , зарегистрированные в ЦГМ в период прохождения грозового атмосферного фронта 18.08.2021 г. (рис. 8).

Следует отметить, что рассматриваемые сутки, как и период времени с 16.08.2021 г. по 20.08.2021 г.

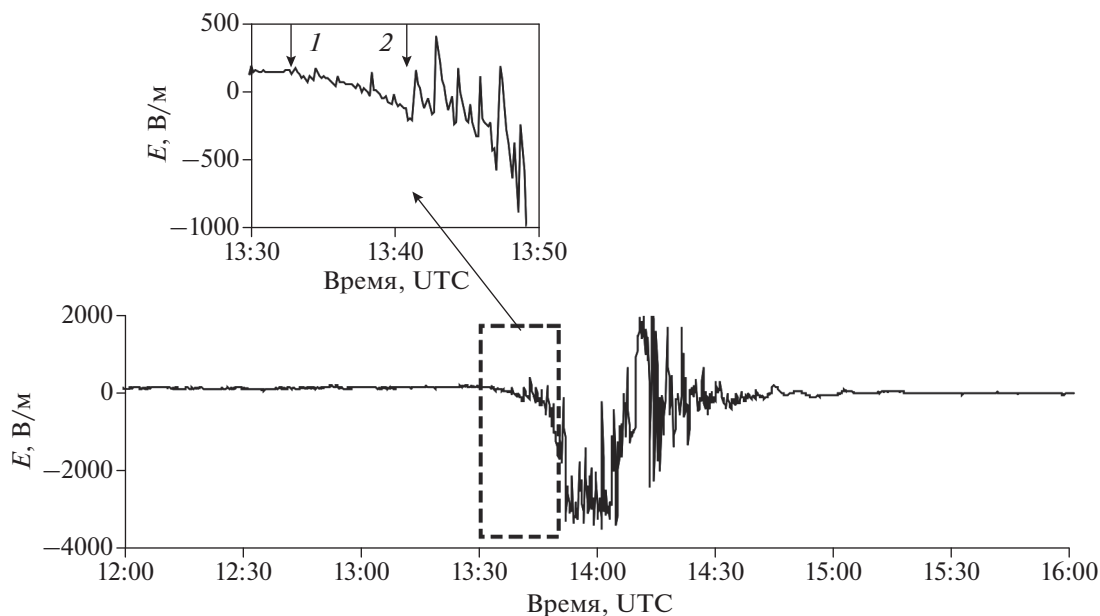
характеризовались низкой геомагнитной активностью (величина стационарного  $K$ -индекса магнитной активности (МНУ) приведена в табл. 1.

Из рис. 10 следует, что атмосферный фронт вызвал увеличение  $B_H$  на фоне естественных вариаций в виде положительной бухты в течение примерно 50–55 мин. При этом максимальная амплитуда вызванной вариации составила  $\sim 10$  нТл.





**Рис. 7.** Вариации электрического поля в периоды, предшествующие приходу атмосферного фронта в МНВ (а) и ЦГМ (б) 29.05.2017 г. (пунктиром выделена область повышенных вариаций  $E$  перед приходом атмосферного фронта).

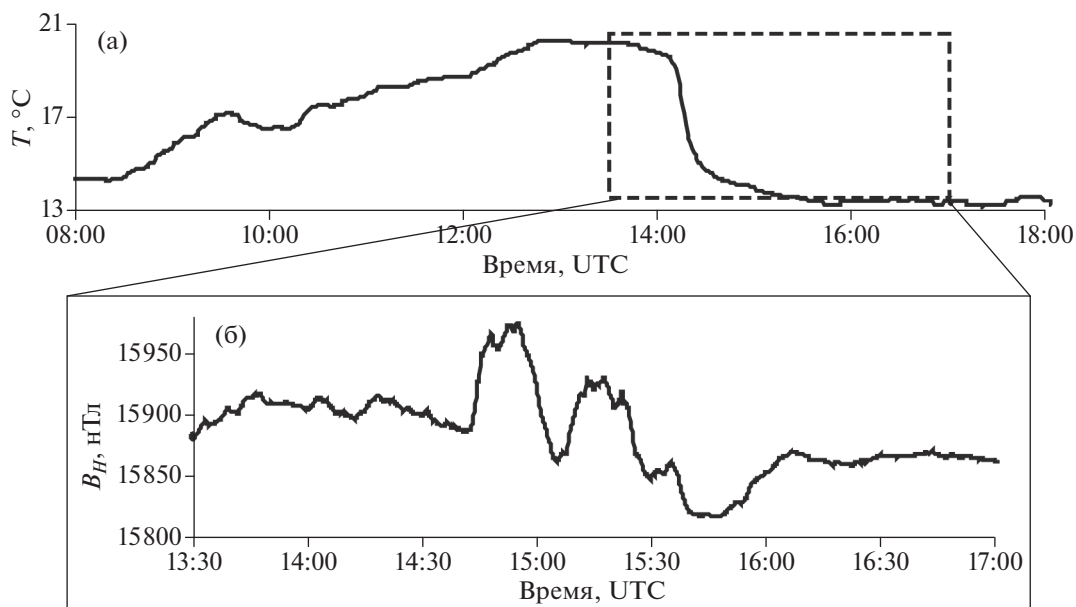


**Рис. 8.** Вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля в приземной атмосфере при прохождении холодного атмосферного фронта 18.08.2021 г. по данным ЦГМ (стрелками 1 и 2 на врезке обозначены начала интервалов регистрации удаленных и местных молниевых разрядов).

#### 4. ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ МОЩНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Как отмечалось выше, вызванные мощным атмосферным фронтом ВГВ распространяются на значительные расстояния вследствие слабого затухания при распространении по атмосферным волноводам и являются значимым фактором, определяющим турбулентный характер возмуще-

ния приземной атмосферы на мезомасштабном и мелкомасштабном уровне и соответственно возмущения электрического и магнитного поля [Адушкин и др., 2020]. При этом указанные ВГВ могут регистрироваться задолго до прихода фронта в точку наблюдения. Одновременно с этим в предшествующий приходу фронта период регистрируются, как отмечалось выше, волны, которые распространяются в стратосферном волноводе в условиях устойчивой стратификации.



**Рис. 9.** Изменение температуры воздуха у земной поверхности  $T$  (а) и вызванные вариации  $B_H$  (б) в МНВ в период прохождения холодного атмосферного фронта 12.05.2021 г.

Анализ данных настоящей работы свидетельствует о том, что действительно наряду со значительными возмущениями геофизических полей при прохождении сильного холодного фронта и меньшими по амплитуде возмущениями непосредственно перед ним, регистрируются также геофизические эффекты в виде акустических сигналов, а также геомагнитных вариаций и вариаций электрических характеристик атмосферы за несколько часов до прихода фронта.

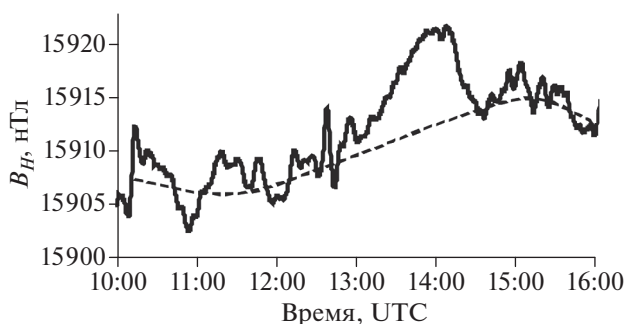
Простые оценки показывают, что при разности скорости распространения ВГВ ( $v_g$ ) и скорости продвижения холодного атмосферного фронта ( $v_f$ ) в 15–40 м/с [Адушкин и др., 2020; Грачев и др., 1994; Spivak et al., 2018с] возможна регистрация ВГВ предвестника и сопутствующих геофизиче-

ских эффектов за 5–8 ч до прихода фронта в точку наблюдений.

В качестве примера рассмотрим результаты инструментальных наблюдений, выполненных в период события 16.07.2019 г. Прохождение мощного холодного атмосферного фронта 2-го рода зарегистрировано в МНВ в ~13:00 UTC (рис. 11). Фронт, распространяющийся с юго-восточного направления, подошел к МНВ в ~12:50 UTC и вызвал резкое понижение температуры воздуха  $T$  у земной поверхности на ~8°C. Как это видно из рис. 11, замещение теплых воздушных масс холодными привело также к резкому увеличению атмосферного давления  $P_0$ .

Как это видно из рис. 11, период прохождения атмосферного фронта характеризуется повышенными микробарическими вариациями  $P$  с амплитудой ~60 Па. Одновременно с этим зарегистрированы сильные вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля  $E$  амплитудой ~4000 В/м и атмосферного тока  $I$  амплитудой ~80 пА/м<sup>2</sup>.

Прохождение фронта сопровождалось также магнитным эффектом: в период прохождения фронта было зарегистрировано резкое повышение амплитуды наиболее чувствительной к внешним возмущениям горизонтальной компоненты магнитного поля  $B_H$ , а также геомагнитные пульсации в широкой полосе частот. На рис. 12 приведен фрагмент спектра геомагнитных пульсаций в диапазоне 0–4 Гц за 16.07.2019 г., который демонстрирует повышенные вариации магнитного поля в диапазоне частот до 4 Гц в период прохожде-



**Рис. 10.** Вариации горизонтальной компоненты индукции геомагнитного поля в период прохождения грозового фронта 18.08.2021 г. (пунктир – суточный ход  $B_H$ ).

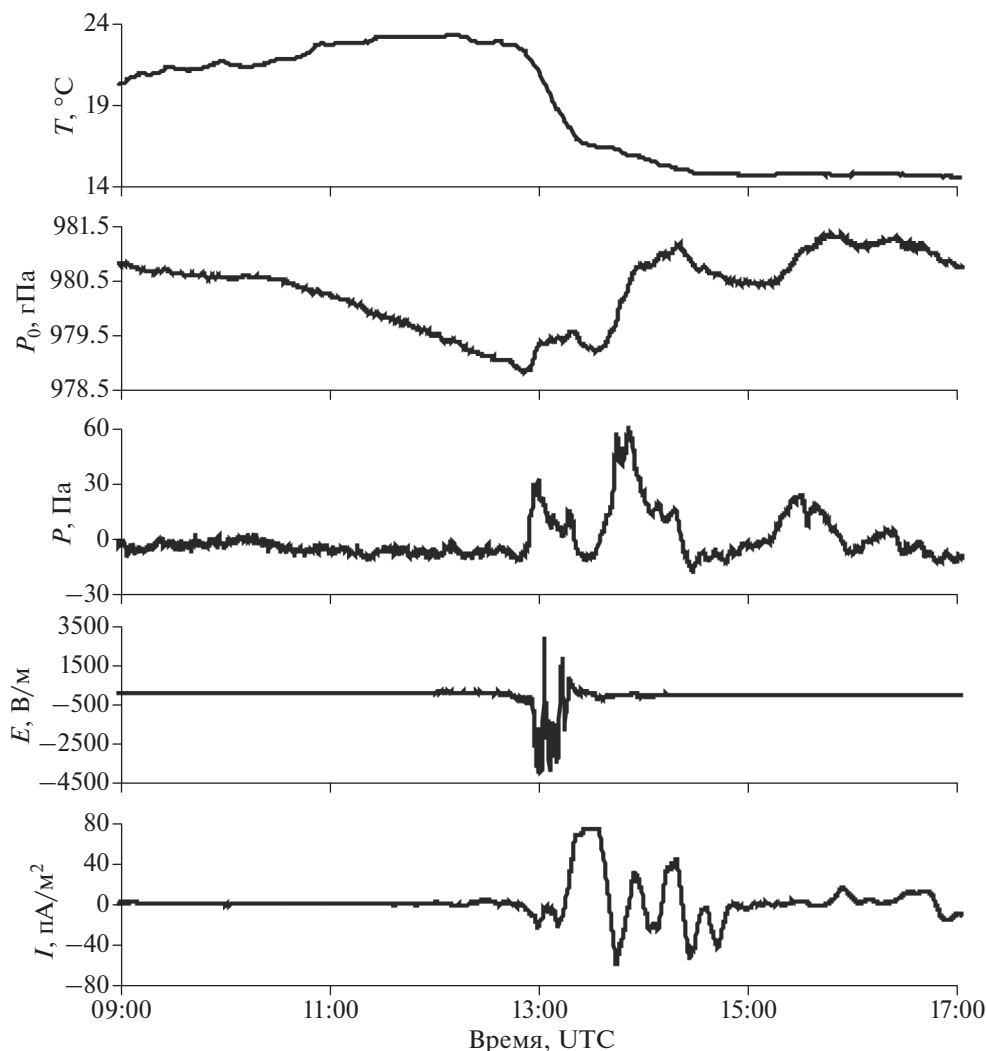


Рис. 11. Характеристики холодного атмосферного фронта 16.07.2019 г. по данным МНУ.

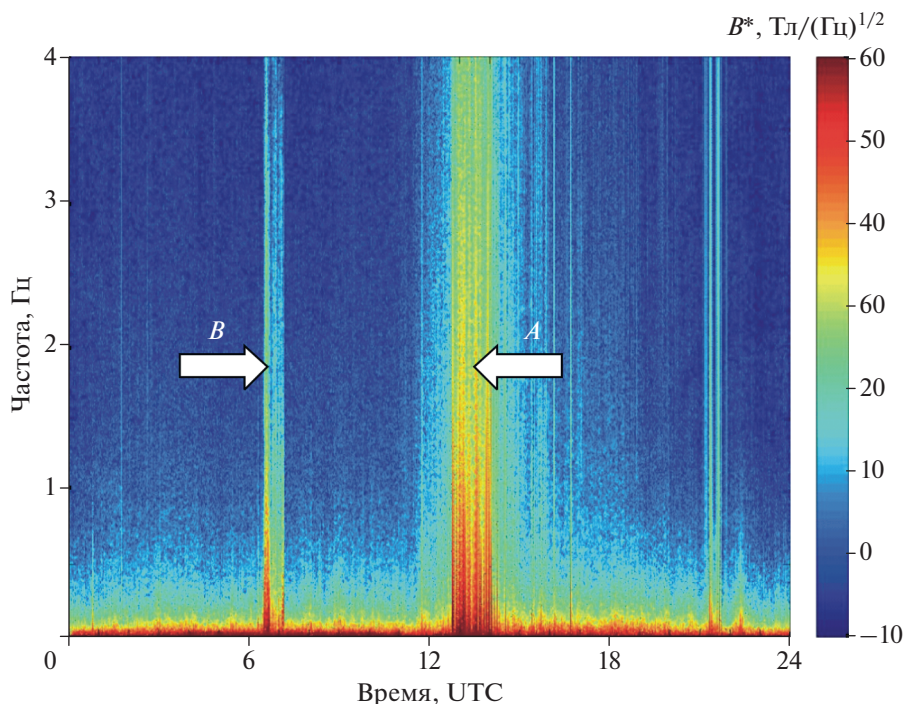
ния атмосферного фронта (вызванные вариации отмечены в данном случае стрелкой А).

Анализ результатов регистрации в периоды времени, предшествующие приходу фронта, показывает, что в ~6:10 UTC в МНУ (рис. 13) наблюдаются аномальные микробарические вариации, которые с учетом времени прихода допустимо рассматривать в качестве вызванных фронтом внутренних гравитационных волн, распространяющихся в атмосферном волноводе со скоростью ~50 м/с, а также вариации электрических характеристик атмосферы ( $E$  и  $I$ ) и вариации  $B_H$  (рис. 13). В этот же период времени регистрируются характерные геомагнитные пульсации (рис. 12).

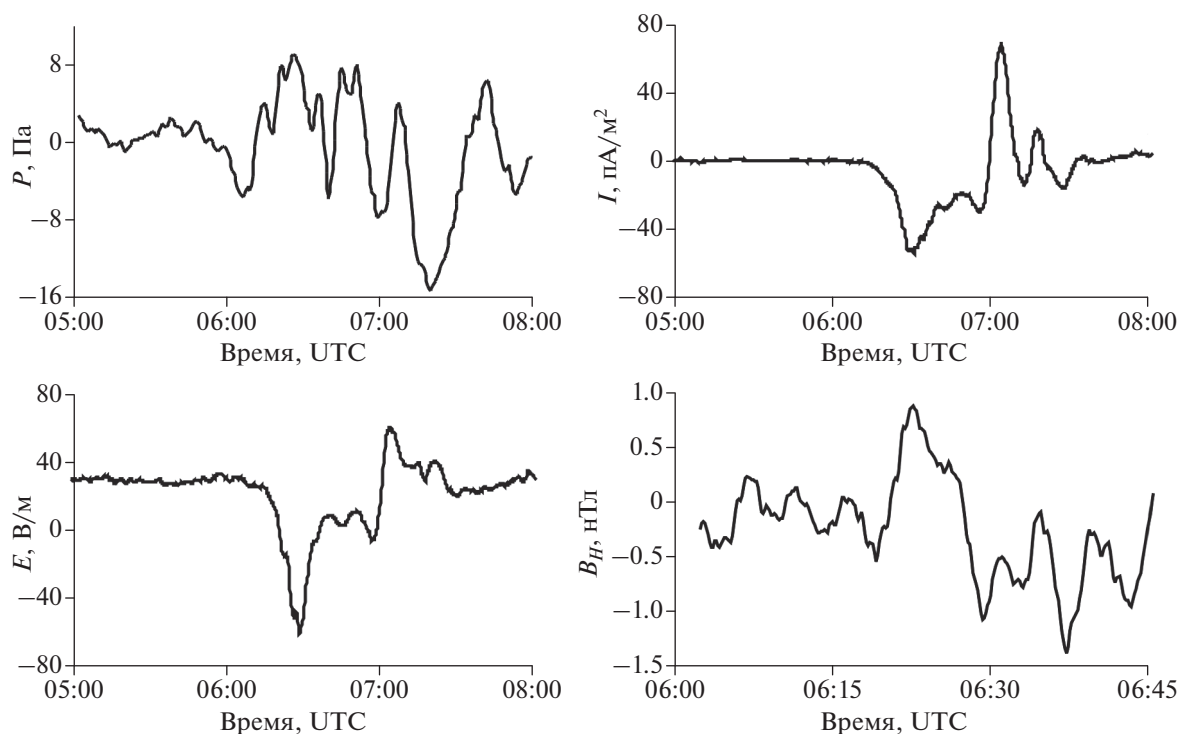
В целом рассматриваемые вариации  $P$ ,  $E$ ,  $I$  и  $B_H$  регистрируются примерно за 4–6 часов до прихода мощных атмосферных фронтов и могут служить в качестве их прогностических признаков.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

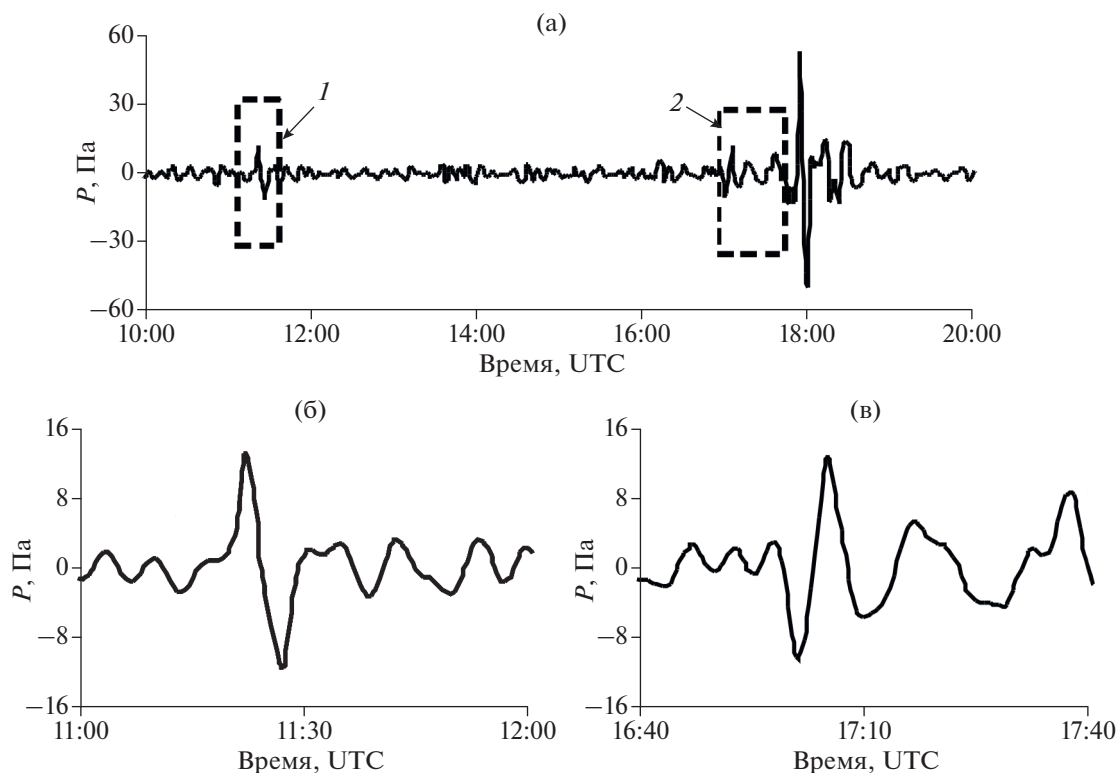
Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что сильные атмосферные возмущения фронтального типа с развитой атмосферной ячейкой, способной вызвать погодные коллизии, сопровождаются геофизическими эффектами не только в период прохождения атмосферного фронта через точку наблюдений, но также за достаточно продолжительный промежуток времени до прихода фронта. Обобщая результаты наблюдений, можно констатировать, что за 5–8 ч до прихода мощной активной атмосферной ячейки регистрируются повышенные вариации амплитуды акустических колебаний, напряженности электрического поля, вертикального атмосферного тока и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, вызванные акустическим сигналом, распространяющимся по атмосферному волноводу. При этом указанные возмущения



**Рис. 12.** Динамический спектр геомагнитных пульсаций по данным МНУ за 16.07.2019 г.; *A* – геомагнитные пульсации в период прохождения мощного атмосферного фронта; *B* – в период возмущений, вызванных приходом акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу.



**Рис. 13.** Микробарические пульсации *P* (за вычетом тренда), вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля *E*, вертикального атмосферного тока *I* и горизонтальной компоненты геомагнитного поля *B<sub>H</sub>* в период прихода акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу, по данным МНУ.



**Рис. 14.** Микробарические вариации, вызванные прохождением сильного атмосферного фронта 09.06.2009 г. (а); результаты фильтрации исходного цифрового ряда в диапазоне периодов 5–15 мин для участков 1-го (б) и 2-го (в) сигналов.

регистрируются практически синхронно. Последнее приводит к выводу, что в этом случае электрический и магнитный эффект имеет локальный характер и связан с возмущением электродинамических процессов в ионосфере в области, расположенной непосредственно над точкой регистрации. Анализ данных наблюдений показывает, что действительно спектры ВГВ содержат составляющие с частотами, близкими к частоте Брента–Вяйсяля, которая свидетельствует о наличии в атмосфере колебаний типа АГВ, оказывающих возмущающее влияние на ионосферу [Адушкин и др., 2020; Гохберг, Шалимов, 2008; Федоренко, 2017; Шалимов и др., 2019].

Это относится также к вариациям электрических характеристик и магнитного поля, которые наблюдаются непосредственно перед приходом сильного атмосферного фронта. И в этом случае ВГВ, распространяющиеся в пограничном слое атмосферы в условиях устойчивой стратификации, содержат колебания с частотами, близкими к частоте Брента–Вяйсяля.

В качестве характерного примера рассмотрим микробарические вариации, сопутствующие сильному атмосферному фронту 09.06.2009 г. (рис. 14). Атмосферный фронт проявился в МНВ в ~18:00 UTC и сопровождался повышенными барическими вариациями амплитудой ~55 Па. Как

это видно из рис. 14, в ~11:20 UTC в МНВ зарегистрирован сигнал (1), связанный с ВГВ, распространяющимися по атмосферному волноводу. Примерно за 1 час до прихода фронта в МНВ зарегистрированы колебания (2), вызванные волнами, распространяющимися в пограничном слое атмосферы в условиях устойчивой стратификации.

Спектральный анализ свидетельствует о том, что в колебаниях 1 и 2 содержатся спектральные составляющие в окрестности частоты Брента–Вяйсяля. Это хорошо видно из рис. 14б и рис. 14в, на которых представлены результаты фильтрации исходного цифрового ряда в диапазоне периодов 5–15 мин соответственно для участков 1-го и 2-го сигналов.

Отмеченные волновые движения в атмосфере в периоды, предшествующие приходу мощных атмосферных фронтов, и сопровождающие их геомагнитные вариации и возмущения электрических характеристик атмосферы могут рассматриваться в качестве прогностических признаков приближающихся опасных атмосферных явлений.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные наблюдений свидетельствуют о том, что мощные атмосферные фронты вызывают не

только изменения метеорологических характеристик, но также значимые вариации геофизических полей у земной поверхности.

Одновременно с этим в периоды, предшествующие приходу потенциально опасных атмосферных фронтов, вызывающих такие явления, как ураганы, шквалы и сильные грозы, наблюдаются регистрируемые инструментально микробарические вариации, вариации электрического поля и атмосферного тока, увеличение амплитуды микросейсмического шума, а также геомагнитные эффекты за 5–8 ч до прихода фронта в точку наблюдений. Аналогичные эффекты регистрируются в период за 1.5–4 ч до прихода фронта.

По мнению авторов, эти эффекты при накоплении соответствующей статистики, могут рассматриваться в качестве прогностических признаков сильных возмущений атмосферы с негативными для человека и инфраструктуры последствиями. Однако при этом следует отметить трудность использования для прогностических целей сейсмических данных вследствие мешающего действия глобальной сейсмичности.

Полученные данные могут оказаться полезными при решении задач, связанных с установлением характеристик природных явлений и процессов, установлением источников аномального поведения полей и условий, определяющих взаимодействия между геосферами. Результаты работы могут быть также использованы при разработке теоретических и расчетных моделей опасных атмосферных явлений в виде ураганов, шквалов и сильных гроз.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по государственному заданию № 1220329000185-5 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС. 2014. 360 с.

Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС. 2018. 459 с.

Адушкин В.В., Спивак А.А. Проблемы взаимодействия геосфер и физических полей в приповерхностной геофизике // Физика Земли. 2019. № 1. С. 4–15.

Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2020. 332 с.

Адушкин В.В., Спивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // Физика Земли. 2021. № 5. С. 6–16.

Алексеева А.А. Прогноз ураганов ветров в тропических циклонах на территории России // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 5–15.

Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова. М.: Гидрометеоздат. 1991. 510 с.

Барышев В.И., Вааг Л.Л., Гаврилов Б.Г., Полетаев А.С. Датчик приземного вертикального тока атмосферы. Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС. 2009. С. 358–364.

Воцан О.Н., Спивак А.А. Вариации электрического поля в приземной атмосфере в результате прохождения холодных атмосферных фронтов. Динамические процессы в геосферах. Вып. 9. М.: ГЕОС. 2017. С. 79–87.

Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. М.: Наука. 2008. 296 с.

Грачев А.И., Данилов С.Д., Куличков С.Н., Свертилов А.И. Основные характеристики внутренних гравитационных волн в нижней атмосфере от конвективных штормов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 759–767.

Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Прогноз грозовой активности с помощью модели электризации кучево-дождевых облаков // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 5–19.

Данилов С.Д., Свертилов А.И. Внутренние гравитационные волны, генерируемые при прохождении гроз // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27. № 3. С. 234–241.

Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 10. С. 908–916.

Куличков С.Н., Цыбульская Н.Д., Чунгузов И.П., Гордин В.А., Быков Ф.Л., Чуличков А.И., Перепелкин В.Г., Буш Г.А., Голикова Е.В. Изв. РАН. Исследование внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в Московском регионе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 455–469.

Куличков С.Н., Чунгузов И.П., Попов О.Е., Перепелкин В.Г., Голикова Е.В., Буш Г.А., Репина И.А., Цыбульская Н.Д., Горчаков Г.И. Внутренние гравитационные и инфразвуковые волны во время урагана в Москве 29 мая 2017 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 2. С. 32–40.

Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И. О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки // Докл. РАН. 2007. Т. 412. № 4. С. 547–551.

Курдяева Ю.А., Куличков С.Н., Кшевещкий С.П., Борчевкина О.П., Голикова Е.В. Вертикальное распространение акустико-гравитационных волн от атмосферных фронтов в верхнюю атмосферу // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 3–12.

Пхалагов Ю.А., Ипполитов И.И., Нагорский П.М., Одинцов С.Л., Панченко М.В., Смирнов С.В., Ужegov В.Н. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 25–30.

Романова Н.Н., Якушкин И.Г. Внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере и источники их генерации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31. № 2. С. 163–186.

Скорород Т.В., Лизунов Г.В. Локализованные пакеты акустико-гравитационных волн в ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52. № 1. С. 93–98.

Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Соловьев С.П., Харламов В.А. Прогностические признаки опасных ат-



- мосферных явлений в геофизических полях. Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2019. С. 448–454.
- Спивак А.А., Рябова С.А. Геофизические эффекты сильных атмосферных фронтов // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 1. С. 24–29.
- Федоренко Ю.П. Возбуждение наземных геомагнитных пульсаций Pc5 акустико-гравитационными волнами // Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23. № 3. С. 12–37.
- Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика: Пер. с англ. М.: Мир. 1989. 216 с.
- Чекрыжов В.М., Свиркунов П.Н., Козлов С.В. Влияние циклонической активности на возмущение геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59. № 1. С. 59–68.
- Шалимов С.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С., Ольшанская Е.В. Воздействие землетрясений и цунами на ионосферу // Физика Земли. 2019. № 1. С. 180–198.
- Adushkin V.V., Loktev D.N., Spivak A.A. The effect of baric disturbances in the atmosphere on microseismic // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2008. V. 44. № 6. P. 510–517.
- Hines C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. 1960. V. 38. 1441–1481.
- Loktev D.N., Spivak A.A. Variations in the high-frequency component of a microseismic background during baric perturbations in the atmosphere // Doklady Earth Sciences. 2008. V. 418. № 1. P. 136–139.
- Müller T., Zürn W. Observations of gravity change during the passage of cold fronts // J. Geophys. Res. 1983. V. 53. P. 155–160.
- Climate change 2021. The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessment Report. Geneva. 2021. 3949 p.
- Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Soloviev S.P., Kharlamov V.A. Acoustic and electric precursors of strong thunderstorm events under megalopolis conditions // Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics. 2018a. V. 54. № 7. P. 112–118.
- Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Kharlamov V.A. Variations in geophysical fields during hurricanes and squalls // Doklady Earth Sciences. 2018b. V. 480. Part 2. P. 788–791.
- Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Soloviev S.P., Kharlamov V.A., Soloviev A.V. Acoustic and electric field variations during strong frontal disturbances propagation. Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2–5 July 2018c. Tomsk, Russian Federation. 2018. 10833Z. <https://doi.org/10.1117/12.2502330>

## Seismic, Atmospheric-Wave, Electrical and Magnetic Effects of Powerful Atmospheric Fronts

A. A. Spivak<sup>a,\*</sup>, V. M. Ovtchinnikov<sup>a</sup>, Yu. S. Rybnov<sup>a</sup>, S. A. Riabova<sup>a</sup>, and V. A. Kharlamov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: aaspivak100@gmail.com*

Disturbances of seismic noise, magnetic field, electrical characteristics of the surface atmosphere and microbaric variations caused by the passage of cold atmospheric fronts of the 2nd kind are discussed. A complex prognostic sign of strong atmospheric fronts, potentially dangerous in the form of hurricanes, squalls and severe thunderstorms, based on the analysis of joint variations of the electric field and vertical current of the surface atmosphere, magnetic field and micropulsations of atmospheric pressure in the period preceding the onset of the most intense manifestations of these phenomena, is proposed. The data obtained can contribute to improving the reliability of the short-term forecast of dangerous atmospheric phenomena.

**Keywords:** atmospheric front, seismic noise, acoustic vibrations, acoustic-gravitational waves, electric field, atmospheric current, magnetic field, variations, prognostic feature