

УДК 528.2:550.341:550.24

КОМПЛЕКСНЫЙ ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК ОПАСНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

© 2022 г. А. А. Спивак^{1,*}, Ю. С. Рыбнов¹, С. А. Рябова¹

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 07.12.2021 г.

Поступило 16.12.2021 г.

После доработки 04.02.2022 г.

Принято к публикации 07.02.2022 г.

Предложен комплексный прогностический признак опасных атмосферных явлений 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 по последствиям сильных атмосферных явлений.

Ключевые слова: атмосферный фронт, акустические колебания, электрическое поле, атмосферный ток, магнитное поле, вариации

DOI: 10.31857/S2686739722050152

Изменение климата и, как следствие, беспрецедентное увеличение в последние годы количества опасных атмосферных явлений, таких как ураганы, шквалы, ливни и сильные грозы с негативными, а в ряде случаев катастрофическими, последствиями вызывает необходимость разработки новых подходов к формулировке их прогностических признаков [1, 2]. Представляется перспективным в качестве одного из таких подходов рассматривать наряду с метеорологическими геофизические эффекты опасных природных событий [3–7].

Опасные атмосферные явления возникают в подавляющем большинстве случаев в холодной фронтальной зоне циклонов. В связи с этим с целью формулировки их прогностических признаков представляет интерес рассмотрение вариаций геофизических полей в периоды, предшествующие приходу в точку наблюдения в первую очередь холодных атмосферных фронтов 2-го рода.

В настоящей работе на основе анализа результатов инструментальных наблюдений установлены характерные микробарические вариации, а также возмущения магнитного поля и электрических характеристик приземной атмосферы, регистрируемые за 1–6 ч до наступления опасных по последствиям проявлений сильных атмосферных

событий. Представляется, что указанные эффекты в совокупности могут рассматриваться в качестве комплексного прогностического признака приближающегося опасного явления.

Экспериментальной основой для выполнения настоящих исследований послужили результаты инструментальных наблюдений, выполненных синхронно в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНВ) ИДГ РАН (54.94° с.ш.; 37.73° в.д.) и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы (ЦГМ) ИДГ РАН (55.71° с.ш.; 37.57° в.д.) [6, 8–10]. Рассматривались геофизические эффекты в периоды 34 наиболее мощных холодных атмосферных фронтов, зарегистрированных в 2015–2021 гг. [6]. При выборе событий учитывалось отсутствие локальных техногенных, а также глобальных природных возмущений электрического и геомагнитного полей (станционный K -индекс магнитной активности не превышал 2).

Мощные конвективные потоки над фронтальной поверхностью холодного фронта вызывают формирование атмосферной ячейки, характеризующейся концентрированными вертикальными и спиралеобразными движениями воздушных масс. Формирование фронтальной ячейки происходит в несколько этапов: зарождение, развитие, достижение максимальных размеров и распад [11]. При достижении определенного размера такая ячейка генерирует акустико-гравитационные (АГВ) и внутренние гравитационные волны (ВГВ) [12, 13]. Воздействие АГВ на ионосферу вызывает модификацию ее электронной плотности

¹Институт динамики геосфер
им. академика М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия
*E-mail: aaspivak100@gmail.com

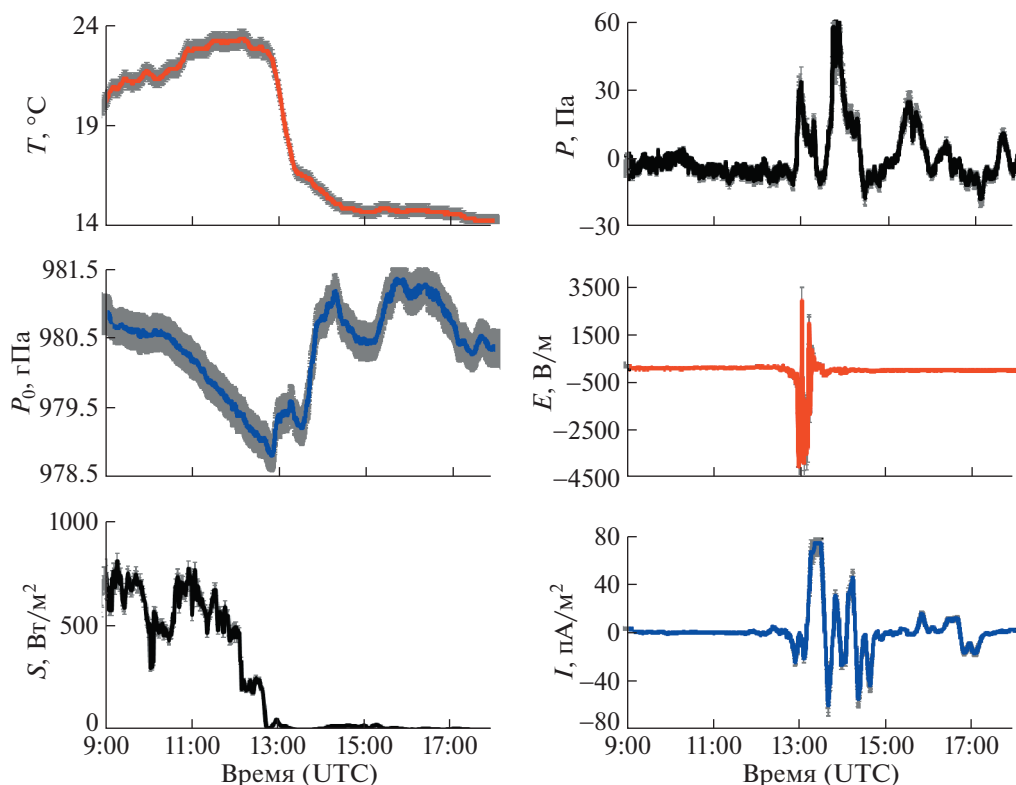


Рис. 1. Характеристики холодного атмосферного фронта 16.07.2019 г. по данным МНВ; здесь и на следующих рисунках серыми планками отмечен диапазон неопределенности данных.

и электрические токи и, как следствие, вариации электрического и магнитного полей¹.

ВГВ распространяются на значительные расстояния вследствие слабого затухания при распространении по атмосферным волноводам и являются значимым фактором, определяющим турбулентный характер возмущения приземной атмосферы на мезомасштабном и мелкомасштабном уровне и соответственно возмущения электрического и магнитного поля [15]. При этом скорость распространения ВГВ характеризуется величиной в районе 50 м/с [5, 16], что в целом заметно превышает скорость движения холодного фронта 2-го рода, которая, как правило, находится в диапазоне 14–18 м/с и в редких случаях достигает 28 м/с [11]. Вследствие этого вызванные атмосферным фронтом микробарические вариации регистрируются до прихода фронта в точку наблюдения.

Анализ данных настоящей работы свидетельствует о том, что наряду с сильными возмущениями геофизических полей непосредственно в период прохождения холодного фронта [6, 17] реги-

стрируются также более слабые геомагнитные вариации и вариации электрических характеристик атмосферы (напряженность электрического поля и атмосферный ток) до прихода фронта. При этом указанные вариации полей в большинстве случаев наблюдаются в момент прихода внутренних акустико-гравитационных волн, распространяющихся по атмосферному волноводу, а также непосредственно перед атмосферным фронтом в результате возмущений, вызванных распространением возмущающих сигналов в пограничном слое атмосферы в условиях устойчивой стратификации.

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. 1). Фронт, распространяющийся с юго-восточного направления, двигался со скоростью ~30 км/ч, подошел к МНВ в ~12:50 UTC и вызвал резкое понижение температуры воздуха T_0 у земной поверхности на ~8°C. Как это видно из рис. 1, замещение теплых воздушных масс холодными привело также к резкому увеличению атмосферного давления P_0 и столь же резкому уменьшению солнечного излучения S , что свидетельствует о фор-

¹ В качестве другого возможного механизма генерации возмущений геомагнитного поля рассматривается также электродинамический эффект при движении электрически заряженных облаков и выпадении осадков [14].

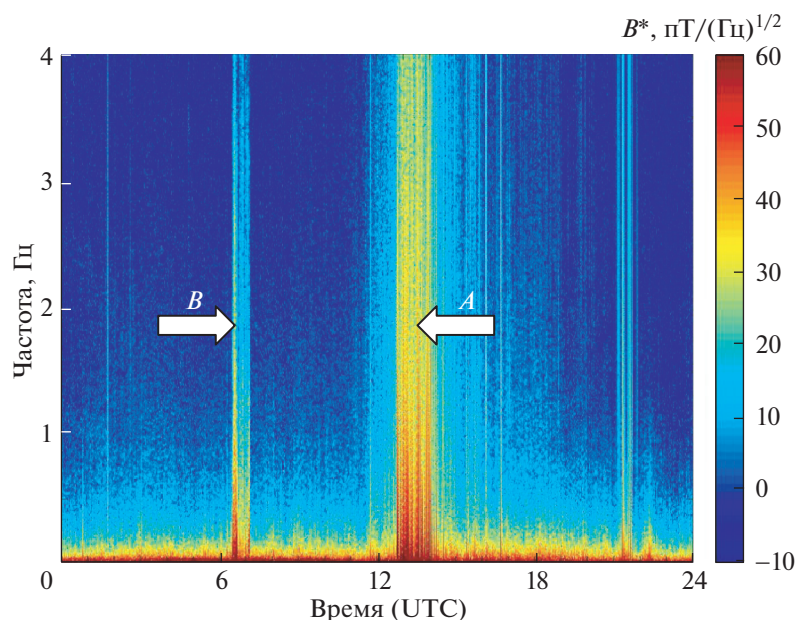


Рис. 2. Динамический спектр геомагнитных пульсаций по данным МНВ за 16.07.2019 г. *A* – геомагнитные пульсации в период прохождения мощного атмосферного фронта, *B* – в период возмущений, вызванных приходом акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу.

мировании мощной кучевой облачности (*Cb*), составившей основу активной фронтальной атмосферной ячейки.

Следует отметить, что период прохождения атмосферного фронта характеризуется повышенными микробарическими вариациями P с амплитудой ~ 60 Па (рис. 1). Одновременно с этим электродинамические процессы в активной ячейке и в области ионосферы над пунктом регистрации в результате воздействия на нее акустико-гравитационных волн вызвали также сильные вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля E амплитудой ~ 4000 В/м и атмосферного тока I амплитудой ~ 80 пА/м².

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. 2 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 Гц² в период прохожде-

² В ряде исследований, например [19], показано, что грозовая активность вызывает сильные колебания магнитного поля Земли в УНЧ-диапазоне (частоты менее 5 Гц), которые, как предполагается, связаны с активацией гидромагнитных волн в ионосфере УНЧ-токами во время грозы.

ния атмосферного фронта³ (вызванные вариации отмечены в данном случае стрелкой *A*).

Анализ результатов регистрации в периоды времени, предшествующие приходу фронта, показывает, что в $\sim 6:10$ UTC в МНВ (рис. 3) и в $\sim 6:24$ UTC в ЦГМ наблюдаются аномальные микробарические вариации, которые с учетом разницы времен прихода допустимо рассматривать в качестве вызванных фронтом внутренних гравитационных волн (скорость распространения ~ 50 м/с). Характерно, что в этот же период времени также наблюдаются вариации электрических характеристик атмосферы (рис. 3), вариации B_H (рис. 4) и характерные геомагнитные пульсации⁴ (рис. 2). В целом рассматриваемые вариации P , E , I и B_H регистрируются примерно за 4–6 ч до прихода мощных атмосферных фронтов и могут служить в качестве их прогностических признаков.

При подходе мощных фронтов к пункту регистрации на расстояния 100–200 км в ряде случаев наблюдаются вариации геофизических полей, вызванные распространением возмущающих сигналов в пограничном слое атмосферы. В качестве примера рассмотрим известное по своим негативным последствиям в Москве событие

³ Атмосферный фронт сопровождался грозовой активностью, временные интервалы которой соответствуют УНЧ-вариациям магнитного поля.

⁴ Пульсации могут быть следствием электродинамических процессов, вызванных в ионосфере над точкой регистрации ВГВ, спектральные составляющие которых содержат частоты Брента–Вяйсяля [12, 15].

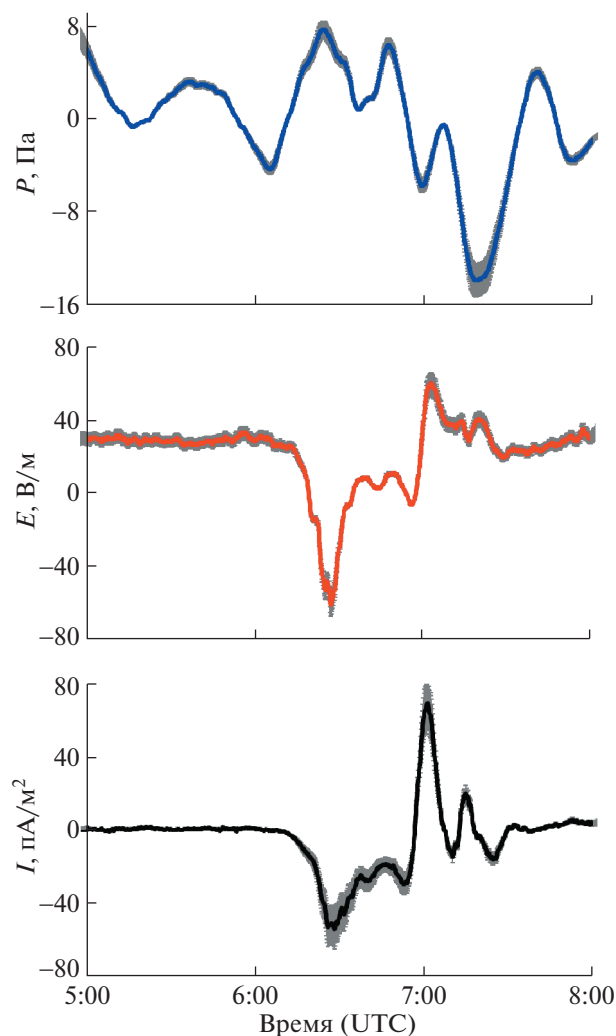


Рис. 3. Микробарические пульсации за вычетом тренда, вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля E и вертикального атмосферного тока I в период прихода акустического сигнала, распространяющегося по атмосферному волноводу, по данным МНВ за 16.07.2019 г.

29.05.2017 г. [18]. Мощный холодный атмосферный фронт распространялся с юго-восточного направления и вызвал в МНВ в 10:40 UTC резкое падение температуры воздуха на $\sim 5.5^\circ\text{C}$. Через некоторое время фронт подошел к Москве и вызвал в ЦГМ резкое падение температуры воздуха на $\sim 10.5^\circ\text{C}$ в 12:35 UTC. При этом фронт сопровождался сильными волновыми движениями в атмосфере (порывы ветра достигали 31 м/с), что привело к человеческим жертвам и нанесло значительный урон экологии Москвы в виде вывала большого количества деревьев и локальных разрушений строительных и других конструкций. По всем проявлениям в этот момент развитие фронтальной атмосферной ячейки достигло максимума. В период прохождения фронта в МНВ и

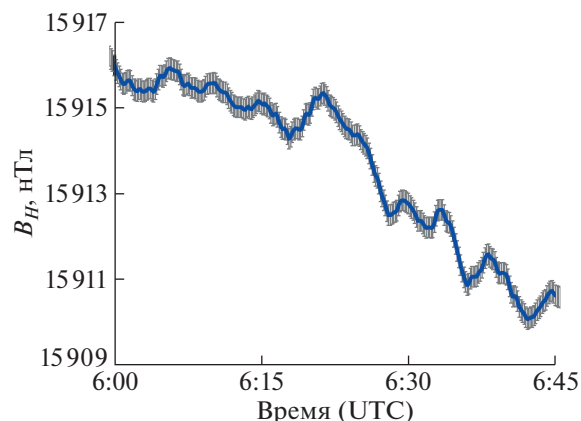


Рис. 4. Вариации геомагнитного поля, вызванные акустическим сигналом, распространяющимся по атмосферному волноводу (данные за 16.07.2019 г.).

ЦГМ, помимо повышенных микробарических вариаций, были зарегистрированы сильные возмущения электрического поля амплитудой ~ 4000 В/м, в МНВ – вариации I амплитудой ~ 80 пА/м² и вариации B_H амплитудой до 20 нТл.

Одновременно с этим за ~ 2 –4 ч до прихода фронта в пунктах регистрации наблюдались повышенные вариации геофизических полей с периодом 20–30 мин (рис. 5), которые вызваны возмущениями, связанными с воздействием на атмосферу акустических сигналов, распространяющихся в пограничном слое атмосферы.

Полученные в настоящей работе данные свидетельствуют о том, что сильные атмосферные возмущения фронтального типа сопровождаются геофизическими эффектами не только в период прохождения активной атмосферной ячейки через точку наблюдений, но также за достаточно продолжительный промежуток времени до прихода фронта. Обобщая результаты наблюдений⁵, можно констатировать, что за 4–6 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. За 2–3 ч до прихода активной ячейки наблюдаются повышенные вариации геофизических полей, связанные с распространением возмущающего акустического сигнала по пограничному атмосферному слою.

По мнению авторов, отмеченные эффекты при накоплении соответствующей статистики

⁵ В период событий 16.07.2019 г. и 29.05.2017 г., представленных в статье в качестве примера, а также и в периоды событий из списка [6].

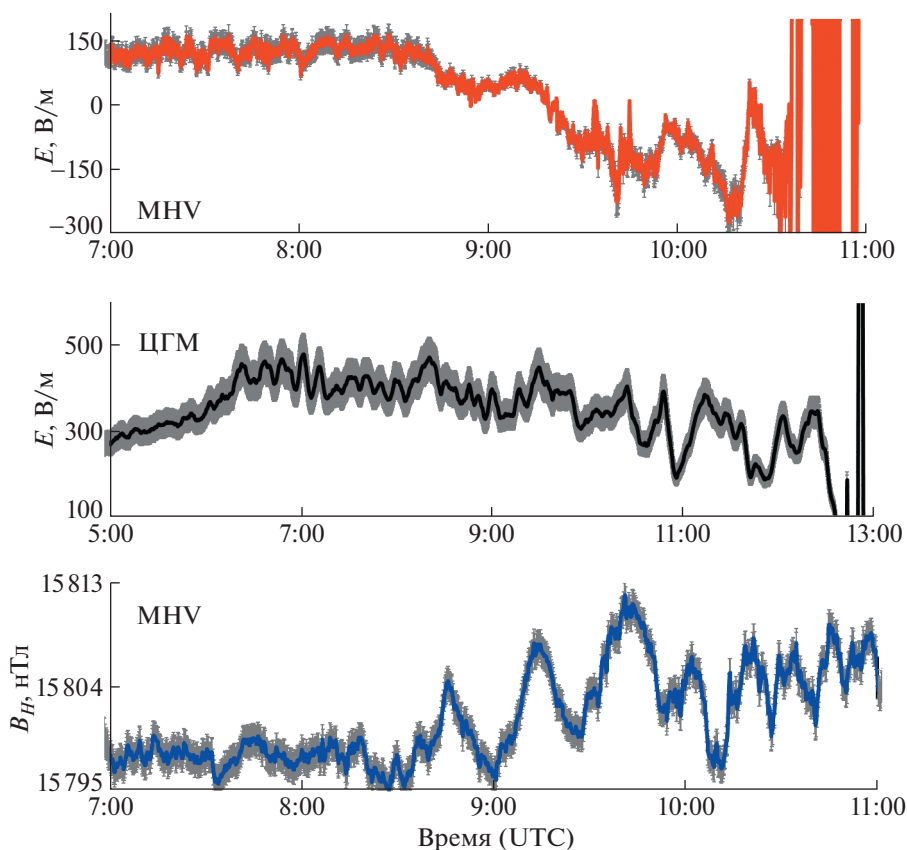


Рис. 5. Вариации электрического поля в МНВ и ЦГМ и магнитного поля в МНВ в период прихода в точки наблюдения акустического сигнала, распространяющегося по пограничному слою атмосферы (данные за 29.05.2017 г.).

могут рассматриваться в качестве прогностического признака⁶ сильных возмущений атмосферы с негативными для человека и инфраструктуры последствиями.

Результаты работы могут быть использованы также при разработке теоретических и расчетных моделей опасных атмосферных явлений в виде ураганов, шквалов и сильных гроз.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию № 1021052706233-4-1.5.4 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях” (FMWN-2022-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change 2021. The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessment Report. Geneva, 2021. 3949 p.

⁶ Здесь следует отметить, что кроме рассматриваемых в работе вариаций геофизических полей в приземном слое атмосферы в период атмосферных фронтов, имеются данные о резком изменении потока мюонов в тропосфере в период грозовой активности, например [20].

2. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 г. М.: Росгидромет, 2021. 205 с.
3. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В.* Динамика спектра вариаций атмосферно-электрического поля в предгрозовой атмосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25. № 2. С. 132–136.
4. *Кузнецов В.В., Чернева Н.В., Дружин Г.И.* О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки // *ДАН*. 2007. Т. 412. № 4. С. 547–551.
5. *Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Акустические и электрические предвестники сильных грозовых явлений в условиях мегаполиса // *Геофизические процессы и биосфера*. 2017. Т. 16. № 4. С. 81–91.
6. *Спивак А.А., Рябова С.А.* Геофизические эффекты сильных атмосферных фронтов // *Доклады академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 502. № 1. С. 24–29.
7. *Bennet A.J., Harrison R.G.* Atmospheric Electricity in Different Weather Conditions // *Weather*. 2007. V. 62. P. 277–283.
8. *Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю.* “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // *Физика Земли*. 2016. № 1. С. 108–120.

9. *Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А.* Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.
10. *Барышев В.И., Ваг Л.Л., Гаврилов Б.Г., Полетаев А.С.* Датчик приземного вертикального тока атмосферы // Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2009. С. 358–364.
11. Атмосфера. Справочник / Под ред. Ю.С. Седунова. М.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
12. *Федоренко Ю.П.* Возбуждение наземных геомагнитных пульсаций Pc5 акустико-гравитационными волнами // Космическая наука и технология. 2017. Т. 23. № 3. С. 11–37.
13. *Куличков С.Н., Цыбульская Н.Д., Чунгузов И.П. и др.* Исследование внутренних гравитационных волн от атмосферных фронтов в московском регионе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 4. С. 455–469.
14. *Чекряжов В.М., Сvirкунов П.Н., Козлов С.В.* Влияние циклонической активности на возмущение геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронаука. 2019. Т. 59. № 1. С. 59–68.
15. *Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А.* Инфразвук в атмосфере. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2020. 332 с.
16. *Грачев А.И., Данилов С.Д., Куличков С.Н., Свертилов А.И.* Основные характеристики внутренних гравитационных волн в нижней атмосфере от конвективных штормов // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 6. С. 759–767.
17. *Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А.* Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
18. *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 Int. Symp. Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2–5 July 2018. Tomsk, Russian Federation. 2018. 10833Z (13 December 2018). <https://doi.org/10.1117/12.2502330>
19. *Fraser-Smith A.C., Kjono S.N.* The ULF Magnetic Fields Generated by Thunderstorms: A Source of ULF Geomagnetic Pulsations? // Radio Science. 2014. V. 49. No. 12. P. 1162–1170.
20. *Kozyrev A.V., Barbashina N.S., Belyakova T.A., Pavlyukov J.B., Petrukhin A.A., Serebryannik N.I., Shutenko V.V., Yashin I.I.* Studies of Thunderstorm Events Based on the Data of Muon Hodoscope URAGAN and Meteorological Radar DMRL-C // Physics Procedia. 2015. V. 74. P. 486–492.

COMPLEX PROGNOSTIC FEATURE OF DANGEROUS ATMOSPHERIC EVENTS

A. A. Spivak^{a, #}, Yu. S. Rybnov^a, and S. A. Riabova^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: aaspivak100@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin December 7, 2021.

Complex prognostic feature of dangerous atmospheric phenomena in the form of hurricanes, squalls and severe thunderstorms is proposed, based on the analysis of joint variations in the electric field and vertical current of the surface atmosphere, magnetic field and atmospheric pressure micropulsations in the period preceding the onset of the most intense manifestations of these phenomena. The data obtained can help to improve the reliability of short-term predictions of dangerous consequences of strong atmospheric phenomena.

Keywords: atmospheric front, acoustic oscillations, electric field, atmospheric current, magnetic field, variations