

УДК 550.3

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ ПРИ МАГНИТНЫХ БУРЯХ

© 2021 г. А. А. Спивак^{1,*}, Ю. С. Рыбнов¹, С. А. Рябова¹, В. А. Харламов¹

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 15.01.2021 г.

Поступило 01.02.2021 г.

После доработки 19.02.2021 г.

Принято к публикации 22.02.2021 г.

Приведены результаты анализа данных инструментальных наблюдений за микробарическими вариациями атмосферного давления, выполненных в Геофизической обсерватории “Михнево” и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН в периоды сильных геомагнитных возмущений. На примере 57 событий показано, что при магнитных бурях (индекс геомагнитной активности $K_p \geq 5$) наблюдаются повышенные микробарические вариации амплитудой от 2 до 20 Па в диапазоне периодов 20–80 мин, а также с частотами, близкими к частоте Брента–Вяйсяля. Показано, что спектр вызванных магнитными бурями микробарических вариаций содержит несколько квазигармонических составляющих. Максимальная амплитуда акустических колебаний лежит в диапазоне от 2 до 20 Па при максимальных амплитудах магнитного возмущения от 15 до 200 нТл.

Ключевые слова: магнитные бури, акустические колебания, атмосфера, микробарические вариации, спектр

DOI: 10.31857/S2686739721060165

Результаты инструментальных наблюдений свидетельствуют о наличии постоянно присутствующих в атмосфере Земли длиннопериодных и короткопериодных микробарических вариаций. Источниками указанных вариаций являются природные процессы (землетрясения, вулканические извержения, прохождение атмосферных фронтов и т.д.) и процессы техногенного происхождения (взрывы разного предназначения, наземный и воздушный транспорт, работающая техника и т.д.) [1–3]. Вызывают возмущение естественного микробарического поля также источники космического происхождения, связанные с вхождением космических тел в атмосферу, солнечными затмениями, полярными сияниями и т.д. [2, 4, 5]. Интерес к изучению микробарических вариаций связан с возможностью их использования для определения характеристик и всестороннего описания вызывающих их явлений и процессов, а также общей динамики атмосферы Земли. Немаловажной является также практическая сторона таких исследований. Данные о микробарических вариациях востребованы при разработке прогностических признаков опасных природных явлений (землетрясения, ураганы,

шквалы, сильные грозовые явления) и при определении условий и механизмов возбуждения ионосферы, а также описании распространения акустических волн в земной атмосфере [3, 6].

Среди многочисленных источников возбуждения микробарических вариаций в атмосфере нас заинтересовали сильные геомагнитные возмущения, проявляющиеся в виде магнитных бурь.

В настоящем сообщении рассматриваются некоторые характеристики микробарических вариаций в атмосфере Земли, сопутствующие магнитным бурям. В качестве исходных данных использовались ряды инструментальных наблюдений за геомагнитными вариациями в Геофизической обсерватории “Михнево” (МНВ) и микропульсациями атмосферного давления в МНВ и в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН (ЦГМ) [7, 8].

Наблюдения за вариациями компонент индукции магнитного поля¹ B_x , B_y и B_z выполнялись с помощью трехкомпонентного феррозондового цифрового магнетометра LEMI-018, обеспечивающего регистрацию в диапазоне ± 68000 нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с^{-1}). Микропульсации атмосферного давления P и акустические колебания регистрировались с по-

¹ Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: aaspivak100@gmail.com

¹ Координаты: x – север-юг, y – восток-запад, z – вертикально вниз.

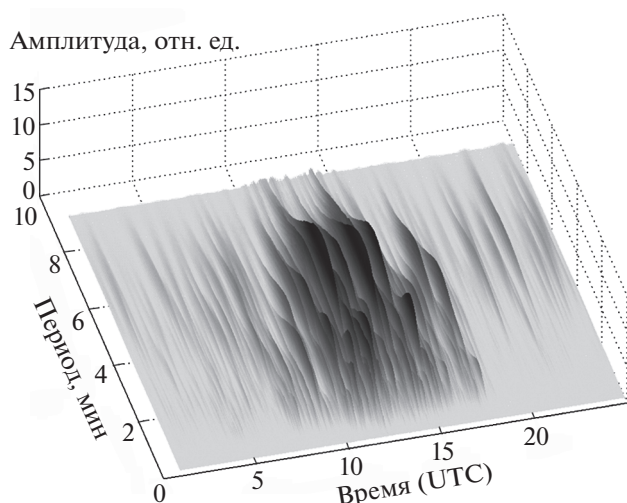


Рис. 1. Вейвлет-скалограмма микробарических колебаний в период магнитной бури 25.10.2016 г.

мощью микробарометров МБ-02 в диапазоне частот 0.05–30 Гц и с помощью микробарометров МБ-03 в диапазоне частот² 0.0008–10 Гц (микробарометры обеспечивали регистрацию в диапазоне 0.02–200 Па с точностью не хуже 10%). Выделение полезного сигнала на фоне естественных микробарических вариаций осуществлялось на основе авторегрессионной фильтрации [9]. Одновременно с помощью цифровой автоматической метеостанции Davis Vantage Pro2 регистрировались метеорологические параметры: скорость ветра, атмосферное давление, температура и влажность воздуха в приземной атмосфере.

Анализировались данные, полученные в период 2016–2019 гг. при магнитных бурях с индексом геомагнитной активности $K_p \geq 5$. Результаты регистрации в виде привязанных ко времени t цифровых рядов $P(t)$ накапливались на жестких носителях и выкладывались на сайте ИДГ РАН (www.idg-sorm.chph.gas.ru) в графическом и цифровом видах. С целью более качественного выделения сопутствующих магнитным бурям акустических сигналов выбирались данные, полученные в периоды, характеризующиеся спокойной метеобстановкой: отсутствием сильных атмосферных возмущений в виде ураганов и шквалов, а также атмосферных фронтов. В общей сложности рассмотрено 57 событий (табл. 1).

Возникновение акустических возмущений в атмосфере Земли в период сильных геомагнитных вариаций связано с воздействием авроральных токов, вызванных солнечной активностью, на нейтральную атмосферу. Движение электри-

чески заряженных частиц в геомагнитном поле под действием силы Лоренца передается посредством столкновений нейтральному газу, вызывая генерацию механических колебаний, распространяющихся по атмосфере в виде акустических волн [10]. В качестве другого механизма генерации механических колебаний нейтралов рассматривается Джоулев нагрев нижней части термосферы в приполярных областях и на авроральных широтах, что также вызывает механические колебания в результате формирующейся циркуляции воздушных масс [11]. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что возбужденные атмосферные волны способны распространяться из авроральной зоны во всех направлениях со скоростью приблизительно 400–500 м/с, и могут достигать с некоторой задержкой по времени даже низких широт в зависимости от их энергии и атмосферных условий на трассе распространения [3, 10].

Полученные в настоящей работе данные расширяют в ряде деталей представления о вызванных магнитными бурями акустических возмущениях. В известных работах, как правило, основное внимание уделяется генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) [3, 6, 10–12]. Действительно, как показывают результаты настоящих исследований, во всех случаях сильных геомагнитных возмущений наблюдаются АГВ с частотами, близкими к частоте Брента–Вяйсяля. В качестве типичного примера на рис. 1 приведена вейвлет-скалограмма³ акустического сигнала, сопутствующего магнитной буре 25.10.2016 г. (индекс геомагнитной активности $K_p = 6$, стационарный K -индекс 7 по данным МНВ). Из рис. 1 видно, что в период магнитной бури в диапазоне периодов 2–8 мин (диапазон частот ~ 0.002 – 0.008 Гц) действительно регистрируются повышенные амплитуды микробарических вариаций. Однако при этом необходимо отметить, что вызванный магнитными бурями акустический сигнал не ограничивается АГВ. Наряду с АГВ магнитные бури вызывают атмосферные колебания с существенно большими периодами. На рис. 2 и 3 представлены вызванный рассматриваемым событием акустический сигнал, зарегистрированный в двух пунктах (МНВ и ЦГМ), и соответственно его спектр. Для сравнения на рис. 2 приведены вариации наиболее чувствительной к внешнему воздействию горизонтальной компоненты магнитного поля $B_H = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$ по данным МНВ.

Как это следует из рис. 2, геомагнитные возмущения в виде не сильно выраженного внезапного начала магнитной бури проявились, начиная с $\sim 09:30$ UTC, основная фаза магнитной бури пришла на период с $\sim 10:00$ UTC до $\sim 15:00$ UTC. Из

² В зависимости от значимости выделения на уровне фона нижняя граница регистрируемого диапазона частот составляет: для 25 дБ – 0.00083 Гц, для 5 дБ – 0.0002 Гц.

³ В настоящей работе использовался комплексный вейвлет Морле.

Таблица 1. Перечень магнитных бурь

№ п/п	Дата	UTC	К	К _p	B ₀ , нТл	P*, Па	№ п/п	Дата	UTC	К	К _p	B ₀ , нТл	P*, Па	№ п/п	Дата	UTC	К	К _p	B ₀ , нТл	P*, Па
1	21.01.2016	15–18	5	6	70	3	20	31.01.2017	12–15	5	5	15	6	39	13.10.2017	12–15	5	6	20	3
2	24.02.2016	15–24	5	5	35	3	21	01.02.2017	15–18	6	5	60	4	40	24.10.2017	12–18	6	5	45	4
3	06.03.2016	18–24	5	6	105	8	22	02.02.2017	15–18	5	5	55	3	41	08.11.2017	12–15	6	6	40	3
4	07.03.2016	18–24	5	5	65	3	23	01.03.2017	12–18	5	6	50	4	42	21.11.2017	15–18	5	5	80	6
5	11.03.2016	12–15	5	5	50	4	24	02.03.2017	12–15	5	5	50	7	43	05.12.2017	12–18	5	5	60	3
6	15.03.2016	18–21	5	5	85	4	25	03.03.2017	15–18	5	5	45	4	44	12.12.2017	18–21	5	5	45	11
7	12.04.2016	09–12	6	5	40	5	26	06.03.2017	12–15	5	5	105	20	45	27.02.2018	0–3	5	5	15	2
8	05.06.2016	12–15	5	5	75	20	27	27.03.2017	21–24	6	6	45	10	46	18.03.2018	18–24	5	6	60	7
9	29.09.2016	15–18	6	5	105	10	28	31.03.2017	15–18	5	5	60	6	47	24.04.2018	18–21	5	6	100	3
10	30.09.2016	18–21	6	5	122	20	29	01.04.2017	15–18	5	4	30	5	48	07.10.2018	15–21	5	5	40	6
11	13.10.2016	15–21	6	6	65	7	30	22.04.2017	15–18	6	6	100	10	49	28.02.2019	12–15	5	5	60	5
12	25.10.2016	12–18	7	6	80	14	31	23.04.2017	12–15	5	5	75	5	50	01.03.2019	15–18	5	5	30	8
13	27.10.2016	15–18	5	5	70	3	32	03.06.2017	15–18	5	5	40	9	51	11.05.2019	9–12	5	5	45	5
14	24.11.2016	12–15	5	5	35	15	33	17.07.2017	15–18	5	6	60	2	52	14.05.2019	6–9	5	6	70	2
15	25.11.2016	15–18	5	5	70	5	34	31.08.2017	12–15	5	5	50	5	53	08.06.2019	18–21	5	5	60	5
16	07.12.2016	18–21	5	5	90	11	35	08.09.2017	12–15	7	8	200	6	54	09.07.2019	18–21	5	5	45	6
17	08.12.2016	15–21	5	5	45	4	36	14.09.2017	15–18	5	5	40	5	55	05.08.2019	9–15	5	5	83	12
18	09.12.2016	18–21	5	5	75	5	37	27.09.2017	18–24	6	6	140	8	56	31.08.2019	9–12	5	6	70	3
19	22.12.2016	18–21	5	5	70	4	38	30.09.2017	12–15	5	5	80	4	57	01.09.2019	15–18	5	5	50	3

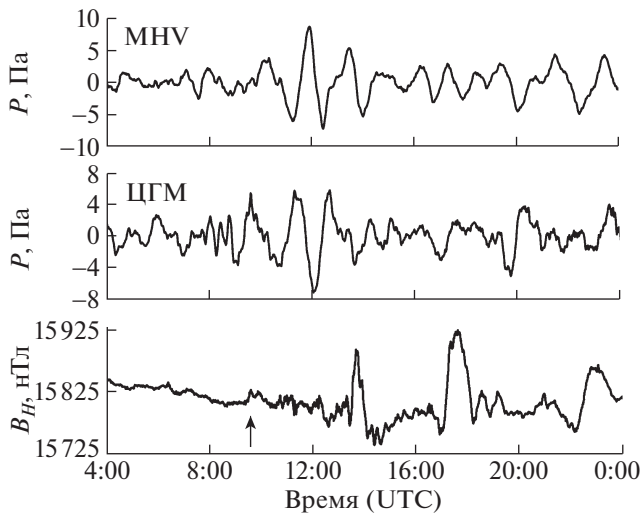


Рис. 2. Вариации микробарических колебаний, зарегистрированных в МНВ и ЦГМ в период магнитной бури 25.10.2016 г.

рис. 2 также видно, что в обоих пунктах наблюдений повышенные микробарические вариации возникают примерно в одно время, близкое к моменту возникновения внезапного начала магнитной бури, и характеризуются максимальными вариациями P амплитудой $\sim 7\text{--}9$ Па в начальный период развития сильного геомагнитного возмущения. Видимый период сигналов, выделенных из исходных записей в полосе частот $\sim 0.00015\text{--}0.005$ Гц, составляет ~ 66 мин (частота ~ 0.00025 Гц). Интересно также отметить, что наиболее сильные микробарические вариации вызываются не в период наибольших вариаций магнитного поля, а следуют сразу за внезапным началом магнитной бури.

Анализ спектральных характеристик сигнала показывает, что наряду с основной частотой ~ 0.00025 Гц в спектре акустического сигнала отчетливо выделяются и другие квазигармонические составляющие, в частности наиболее ярко представлены пики с частотами ~ 0.0007 и ~ 0.0014 Гц (периоды соответственно ~ 24 и ~ 12 мин). Наличие нескольких характерных частот на спектрах акустических сигналов свидетельствует о более сложном, чем это обычно представляется [4, 13], характере возбуждения акустических колебаний в атмосфере в период магнитных бурь.

Амплитуды вызванных магнитными бурями акустических сигналов приведены в табл. 1 в виде максимальных амплитуд P^* . Максимальная амплитуда акустических колебаний лежит в широком диапазоне значений от 2 до 20 Па при максимальных амплитудах магнитного возмущения от 15 до 200 нТл. Для получения статистически обоснованной зависимости величины отклика в виде акустического сигнала от величины магнитного

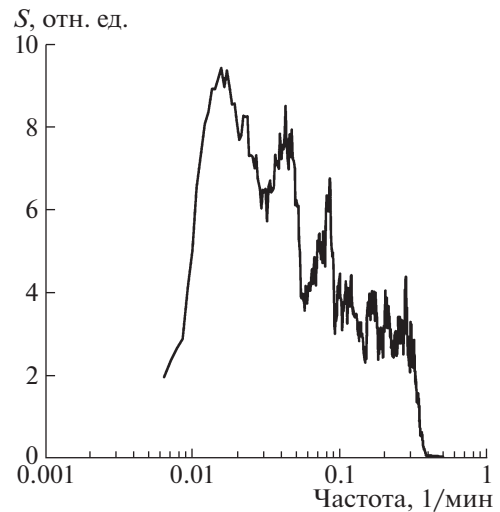


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности микробарических колебаний S от частоты в период магнитной бури 25.10.2016 г.

возмущения необходимо дальнейшее накопление экспериментального материала.

Результаты настоящих исследований свидетельствуют о том, что в периоды всех рассмотренных магнитных бурь наблюдаются повышенные микробарические вариации, хорошо выраженные на фоне естественных колебаний атмосферного давления. Амплитуда указанных вариаций, как это следует из данных табл. 1, изменяется в широких пределах: от 2 до 20 Па. При этом следует особо отметить, что амплитуда вызванных вариаций при сходных значениях K -индекса может отличаться в ~ 6 раз, что может свидетельствовать, в частности, о возможном влиянии локальных геофизических условий в месте регистрации.

Установленные особенности акустического отклика на сильные геомагнитные возмущения в виде наличия нескольких характерных квазигармонических составляющих в спектре и несовпадения максимальных микробарических вариаций и максимальных вариаций магнитного поля необходимо иметь в виду в дальнейшем при разработке конкретных моделей преобразования энергии электрофизической природы в энергию механических колебаний.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию (тема АААА-А-19-119021890067-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Infrasound monitoring for atmospheric studies / Eds. Le Pichon A., Blanc E., Hanchecorue A. Springer International Publishing, Dordrecht, 2010. 1167 p.
3. *Liszka L.* Infrasound: A Summary of 35 Years of Research. IRF Scientific Report 291. Swedish Institute of Space Physics. Umea, Sweden, 2007. 150 p.
4. *Wilson C.R.* Infrasonic Wave Generation by Aurora // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1975. V. 37. P. 973–988.
5. *Chrzanowski P., Young J.M., Greene G.* Infrasonic Pressure Waves Associated with Magnetic Storms // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1962. V. 17. Suppl. A-II.
6. *Testud J.* Gravity Waves Generated during Magnetic Substorms // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1970. V. 11. P. 1793–1805.
7. *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.
8. *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.
9. *Карташов В.М., Тихонов В.А., Воронин В.В., Селезнев И.С.* Авторегрессионные фильтры подавления помех в системах акустического зондирования атмосферы // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* Харьков, 2019. Вып. 196. С. 106–111.
10. *Chimonas G., Hines C.O.* Atmospheric Gravity Waves Launched by Auroral Currents // *Planetary and Space Science*. 1970. V. 18. P. 565–582.
11. *Черногор Л.Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. Т. 8. № 1. С. 59–106.
12. *Wilson C.R.* Auroral Infrasonic Waves and Poleward Expansions of Auroral Substorms at Inuvik, N.W.T., Canada // *Geophysical Journal International*. 1971. No 1–4. P. 179–181.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb03391.x>
13. *Pasko V.P.* Infrasonic Waves Generated by Supersonic Auroral Arcs // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. L19105.
<https://doi.org/10.1029/2012GL053587>

WAVE DISTURBANCES IN THE NEAR-SURFACE ATMOSPHERE DURING MAGNETIC STORMS

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

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

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

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin January 15, 2021

During periods of strong geomagnetic disturbances, the results of the analysis of data from instrumental observations of microbaric variations in atmospheric pressure, carried out at the Mikhnevo Geophysical Observatory and at the Center of Geophysical Monitoring in Moscow of IDG RAS, are presented. Using 57 events as an example, it was shown that during magnetic storms (index of geomagnetic activity $K_p \geq 5$), increased microbaric variations with an amplitude from 2 to 20 Pa are observed in the range of periods from 20 to 80 min, as well as with frequencies close to the Brent-Väisälä frequency. It is shown that the spectrum of microbaric variations caused by magnetic storms contains several quasi-harmonic components. The maximum amplitude of acoustic vibrations is in the range from 2 to 20 Pa with the maximum amplitudes of magnetic disturbance from 15 to 200 nT.

Keywords: magnetic storms, acoustic vibrations, atmosphere, microbaric variations, spectrum