

УДК 550.386

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2021 г. С. А. Рябова^{1,*}, А. А. Спивак¹

Представлено академиком В. В. Адушкиным 19.08.2020 г.

Поступило 25.09.2020 г.

После доработки 28.10.2020 г.

Принято к публикации 14.12.2020 г.

Анализируются результаты инструментальных наблюдений за вариациями электрического поля и атмосферного тока в приземной атмосфере во время 58 сильных магнитных бурь за период 2016–2019 гг., по данным среднеширотной геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН. Показано, что геомагнитные возмущения со стационарным K -индексом магнитной активности, превышающим 5, сопровождаются вариациями вертикальной компоненты электрического поля Земли. При этом установлен разный характер вариаций: в одних случаях регистрируется бухтообразное увеличение или уменьшение электрического поля, в других – знакопеременное изменение увеличенной амплитуды. В целом амплитуда вариаций электрического поля характеризуется величиной 5–580 В/м. Одновременно с этим в периоды магнитных бурь регистрируются повышенные вариации атмосферного тока амплитудой до 80 пА/м². Представленные результаты дополняют соответствующую базу данных и могут представлять интерес при совершенствовании известных и разработке новых моделей взаимодействия и преобразования геофизических полей и их верификации.

Ключевые слова: магнитные бури, вариации электрического поля, атмосферный ток

DOI: 10.31857/S2686739721030099

Среди многочисленных факторов, определяющих вариации электрического поля в приземном слое атмосферы, особо следует выделить геомагнитные возмущения, проявляющиеся в виде сильных магнитных бурь. Магнитные бури вызывают усиление ионосферного электрического поля, что приводит к вариациям градиента потенциала электрического поля у земной поверхности [1, 2]. Влияние магнитных бурь на электрическое поле атмосферы изучалось в большинстве работ в условиях авроральных и субполярных широт, где эффект проявляется более ярко [3–6]. Немногочисленные исследования связаны с описанием указанного эффекта для условий средних широт [7, 8]. Следует отметить, что вопрос, касающийся связи между геомагнитными вариациями и атмосферным электричеством, в настоящее время не решен в полной мере. Для построения адекватных моделей наблюдаемого явления требуется существенное пополнение соответствующей базы данных за счет результатов инструментальных наблюдений.

В настоящем сообщении рассматриваются сопутствующие магнитным бурям вариации вертикальных компонент напряженности электрического поля E и атмосферного тока I в приземном слое атмосферы по данным среднеширотной Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН (МНВ; 54.94° с.ш.; 37.73° в.д.) [9] и Центра геофизического мониторинга г. Москвы (ЦГМ; 55.71° с.ш.; 37.57° в.д.) [10]. Анализируются данные за период 2017–2019 гг., полученные в дни, характеризующиеся условиями, близкими к так называемым “условиям хорошей погоды” (отсутствия осадков, тумана, плотной низкой облачности, сильного ветра, скорость которого превышает 6 м/с и т.д. [11]), а также отсутствием сильных локальных возмущений электрического поля, камуфлирующих эффект от магнитных бурь (грозовые ячейки, прохождение атмосферных фронтов, возмущения техногенной природы и т.д.). Результаты регистрации выложены на сайте ИДГ РАН в графическом и цифровом виде.

Измерения компонент индукции магнитного поля¹ B_x , B_y и B_z выполнялись с помощью феррозондового цифрового магнетометра LEMI-018, обеспечивающего регистрацию в диапазоне

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: riabovasa@mail.ru

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

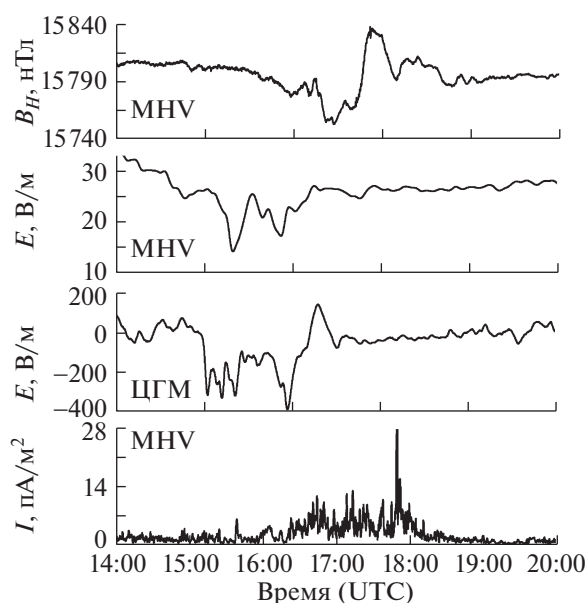


Рис. 1. Вариации горизонтальной компоненты магнитного поля B_H , вертикальной компоненты напряженности электрического поля E и усредненного за период 30 с модуля вертикального атмосферного тока I в приземной атмосфере в период магнитной бури 12.12.2017 г. по данным МНВ и ЦГМ.

$\pm 68\,000$ нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 Гц). Измерения напряженности электрического поля и вертикального атмосферного тока осуществлялись соответственно с помощью статического флюксметра ИНЭП [12] в диапазоне частот 0–20 Гц и компенсационного регистратора тока [13] с частотой выборки 1 Гц. Привлекались данные, полученные в дни, характеризующиеся повышенной геомагнитной активностью. В общей сложности за период 2016–2019 гг. было рассмотрено 58 событий со стационарным K -индексом геомагнитной активности (по данным МНВ) от 5 до 7 (табл. 1).

Анализ имеющихся данных свидетельствует о наличии хорошо выраженных вариаций электрического поля в периоды сильных магнитных бурь [1]. При этом отмечается, что вызванные вариации электрического поля проявляются чаще либо в виде резкого кратковременного, либо бухтообразного уменьшения E относительно суточного хода [7, 14]. Вместе с тем в ряде случаев наблюдаются положительные отклонения в E (положительные возмущения), что характерно для утреннего сектора Земли [14]. Наибольший эффект от магнитосферных возмущений в вариациях электрического поля наблюдается в главную фазу магнитных бурь [7]. Вызванные вариации электрического поля рассматривались, как правило, относительно среднесуточного хода E . Однако в настоящей работе вследствие высокой суточной

вариабельности E вариации напряженности электрического поля, сопровождающие магнитные бури, рассматривались в абсолютных величинах. Анализ показал, что наряду с отрицательными и положительными в периоды магнитных бурь наблюдаются также знакопеременные возмущения электрического поля. При этом характер вариаций E и I в МНВ и ЦГМ одинаков по морфологии. Ниже будут рассмотрены примеры вариаций E , сопутствующих магнитным бурям.

На рис. 1 совместно с вариацией горизонтальной компоненты магнитного поля $B_H = (B_x^2 + B_y^2)^{1/2}$ в период магнитной бури 12.12.2017 г. приведены вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля E по данным МНВ и ЦГМ. Магнитная буря 12.12.2017 г. зарегистрирована в период с 16:00 до 21:00 UTC. При этом основная фаза события, в которой вариация горизонтальной компоненты магнитного поля B_H характеризовалась величиной ~ 65 нТл, а вертикальной компоненты B_z величиной ~ 27 нТл, пришлась на период $\sim 18:30$ – $20:20$ UTC. Восстановительная фаза бури длилась до $\sim 22:00$ UTC. Согласно данным МНВ стационарный индекс магнитной активности $K = 5$ для периода 18:00–21:00 UTC (табл. 2).

Данные рис. 1 свидетельствуют о том, что основные вариации электрического поля наблюдались на начальном периоде развития магнитной бури. В целом электрический эффект магнитной бури можно характеризовать как бухтообразное отрицательное возмущение. При этом следует отметить, что существенно больший эффект наблюдался в условиях ЦГМ, где амплитуда изменения вертикальной компоненты напряженности электрического поля составила ~ 400 В/м. Подобного вида эффект наблюдался в 19 из 58 случаев, приведенных в табл. 1.

На рис. 2 приведены вариации вертикальной компоненты напряженности электрического поля E , зарегистрированные в МНВ в период двух магнитных бурь 28.02.2019 г. (см. табл. 1). Для сравнения на рис. 2 представлены также вариации B_H . Основная фаза первого события, в которой вариация горизонтальной компоненты магнитного поля B_H характеризовалась величиной ~ 60 нТл, а вертикальной компоненты B_z величиной ~ 35 нТл, пришлась на период $\sim 14:00$ – $15:20$ UTC. В этом случае основные вариации электрического поля, зарегистрированные при первой магнитной буре, имеют вид положительной бухты и наблюдаются в период $\sim 13:00$ – $15:00$ UTC. Вызванные вариации E начались примерно в середине начальной фазы развития магнитной бури, захватив начальный период ее основной фазы. Амплитуда изменения вертикальной компоненты напряженности электрического поля составила ~ 170 В/м. Вариации E в период второй

Таблица 1. Перечень магнитных бурь с указанием максимальных амплитуд вариации B_H , E , I

№ п/п	Дата	Время суток, UTC	K	Максимальная амплитуда вариации B_H , нТл	Максимальная амплитуда вариации E , В/м	Максимальная амплитуда вариации I , пА/м ²
1	21.01.2016	15–18	5	70	175	2
2	24.01.2016	15–24	5	35	95	2
3	06.03.2016	18–24	5	105	65	5
4	07.03.2016	18–24	5	65	85	14
5	11.03.2016	12–15	5	50	5	4
6	15.03.2016	18–21	5	85	320	2
7	12.04.2016	09–12	6	40	25	6
8	05.06.2016	12–15	5	75	580	15
9	29.09.2016	15–18	6	105	100	3
10	30.09.2016	18–21	6	122	75	20
11	13.10.2016	15–21	6	65	60	2
12	25.10.2016	12–18	7	80	20	1
13	27.10.2016	15–18	5	70	140	3
14	24.11.2016	12–15	5	35	190	4
15	25.11.2016	15–18	5	70	55	2
16	07.12.2016	18–21	5	90	45	40
17	08.12.2016	15–21	5	45	10	3
18	09.12.2016	18–21	5	75	6	10
19	22.12.2016	18–21	5	70	5	3
20	07.01.2017	12–15	5	40	60	4
21	26.01.2017	15–21	5	25	180	4
22	31.01.2017	12–15	5	15	70	2
23	01.02.2017	15–18	6	60	10	5
24	02.02.2017	15–18	5	55	50	2
25	17.02.2017	15–18	5	20	15	10
26	01.03.2017	12–18	5	50	110	1
27	02.03.2017	12–15	5	50	50	2
28	03.03.2017	15–18	5	45	400	3
29	06.03.2017	12–15	5	105	65	5
30	27.03.2017	21–24	6	45	140	5
31	31.03.2017	15–18	5	60	300	40
32	01.04.2017	15–18	5	30	105	1
33	22.04.2017	15–18	6	100	185	4
34	23.04.2017	12–15	5	75	35	3
35	03.06.2017	15–18	5	40	60	75
36	09.07.2017	9–12	5	35	25	15
37	16.07.2017	12–18	6	100	155	4
38	17.07.2017	15–18	5	60	150	7
39	31.08.2017	12–15	5	50	175	3
40	08.09.2017	12–15	7	200	30	8
41	14.09.2017	15–18	5	40	80	4
42	17.09.2017	12–15	5	40	25	80
43	27.09.2017	18–24	6	140	10	5

Таблица 1. Окончание

№ п/п	Дата	Время суток, UTC	K	Максимальная амплитуда вариации B_H , нТл	Максимальная амплитуда вариации E , В/м	Максимальная амплитуда вариации I , пА/м ²
44	30.09.2017	12–15	5	80	70	1
45	13.10.2017	12–15	5	20	20	3
46	24.10.2017	12–18	6	45	65	3
47	08.11.2017	12–15	6	40	35	6
48	21.11.2017	15 – 18	5	80	5	-
49	05.12.2017	12–18	5	60	20	15
50	12.12.2017	18–21	5	65	12	25
51	22.02.2018	18–21	5	40	25	3
52	27.02.2018	0–3	5	15	70	1
53	18.03.2018	18–24	5	60	100	6
54	20.04.2018	18–21	5	100	40	3
55	01.10.2018	12–15	5	20	10	3
56	07.10.2018	15–21	5	40	15	2
57	28.02.2019	12–15	5	60	170	2
58	01.03.2019	15–18	5	30	55	6

Таблица 2. Значения планетарного индекса геомагнитной активности K_p и стационарного K по данным МНВ

Индексы геомагнитной активности	Время (UTC)							
	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
07.03.2016 г.								
K_p	4	5	4	3	3	3	4	5
K	4	3	3	2	3	4	5	5
13.10.2016 г.								
K_p	2	3	2	3	4	6	5	4
K	2	2	3	4	4	6	6	5
12.12.2017 г.								
K_p	2	3	2	2	1	3	4	3
K	2	2	2	2	1	3	5	3
28.02.2019 г.								
K_p	4	3	2	3	4	4	5	3
K	3	2	1	3	5	4	5	3

магнитной бури (18:00–21:00 UTC) также имеют вид положительной бухты, однако с существенно меньшей амплитудой.

Аналогичный по форме вариаций E эффект наблюдался в 10 случаях из табл. 1.

На рис. 3 приведены результаты регистрации B_H и E в период магнитной бури 13.10.2016 г. (данные МНВ). Основная фаза события, в которой вариация горизонтальной компоненты магнитного поля B_H хорошо выраженного знакопеременного вида характеризовалась величиной ~ 65 нТл, а

вертикальной компоненты B_z величиной ~ 40 нТл, пришлось на период $\sim 15:00$ – $18:20$ UTC. Сопутствующие вариациям B_H вариации E зарегистрированы в тот же период времени, имеют также знакопеременный вид, близкий по характеру вариациям B_H (максимальная амплитуда $E \sim 60$ В/м).

Знакопеременный характер вариаций электрического поля в периоды магнитных бурь наблюдался в 29 случаях из табл. 1.

Наряду с возмущениями электрического поля магнитные бури вызывают вариации вертикаль-

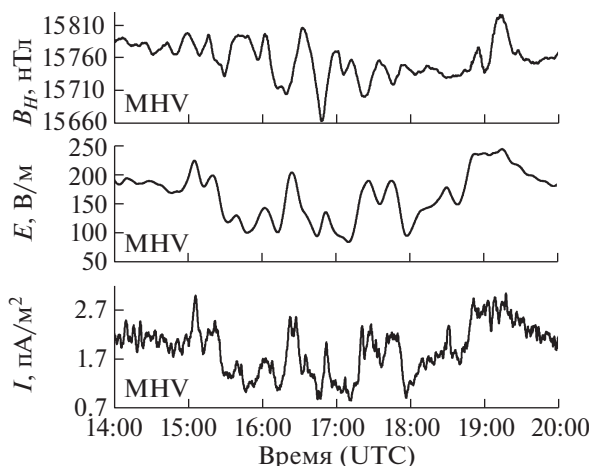


Рис. 2. То же в период магнитной бури 28.02.2019 г. по данным MHV.

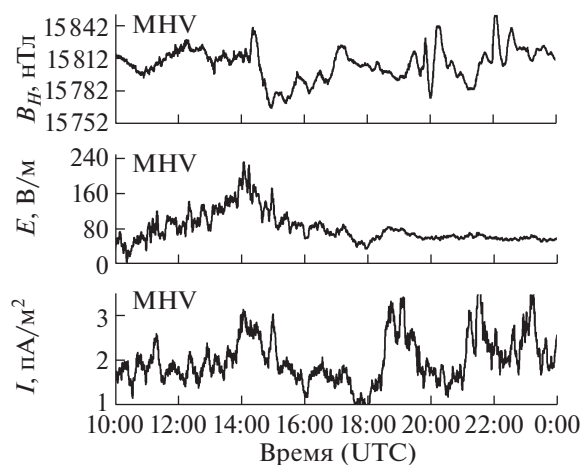


Рис. 3. То же в период магнитной бури 13.10.2016 г. по данным MHV.

ного тока в приземном слое атмосферы [15]. Результаты настоящей работы также свидетельствуют о том, что магнитные бури в большинстве своем сопровождаются изменениями атмосферного тока. Ввиду того, что ряды наблюдений за током в атмосфере I , выполненные с дискретностью 1 с, отличаются сильной вариабельностью, для анализа использовались ряды, полученные усреднением исходных записей по интервалам от 10 до 100 с.

На рис. 1–3 в качестве примера приведены усредненные по интервалам 30 с значения модуля вертикального атмосферного тока в периоды рассмотренных выше магнитных бурь. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в отличие от вызванных вариаций E , которые могут наблюдаться не только в основной период магнитных бурь (рис. 2 и 3), но и в ее начальный период (см. пример на рис. 1), вызванные вариации

атмосферного тока регистрируются, как правило, в основные периоды магнитных бурь. Следует также отметить, что атмосферный ток характеризуется большей чувствительностью к сильным геомагнитным вариациям по сравнению с электрическим полем. Это хорошо видно из данных рис. 2, которые показывают, что вторая магнитная буря, зарегистрированная в 18:00–21:00 UTC 28.02.2019 г., проявилась в вариациях I так же хорошо, как и первая, зарегистрированная в 12:00–15:00 UTC. Как уже отмечалось выше, эффект второй магнитной бури в вариациях E значительно слабее по сравнению с эффектом первой магнитной бури.

В результате выполненного анализа экспериментальных данных можно заключить, что сопутствующие магнитным бурям с $K \geq 5$ повышенные вариации электрического поля характеризуются разной формой. В основном (в 50% рассмотрен-

Таблица 3. Интервалы вызванных вариаций B_H , E и I

Параметр	Интервал вариаций	
	$K = 5$	$K = 6$
B_H , нТл	15–105	40–140
E , В/м	5–580	10–185
I , пА/м ²	1–80	2–20

ных случаев) в периоды сильных магнитных бурь наблюдаются знакопеременные вариации напряженности электрического поля. В ~33% случаев – бухтообразное отрицательное изменение E , и в ~17% случаев – бухтообразное изменение E в сторону положительных значений. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного тока выражен более ярко по сравнению с аналогичным эффектом в электрическом поле и наблюдается в основном в периоды максимального развития магнитных бурь. В целом амплитуда вариаций электрического поля характеризуется величиной 5–580 В/м (табл. 1), амплитуды повышенных вариаций атмосферного тока в периоды магнитных бурь лежат в диапазоне от 1 до 80 пА/м².

Результаты настоящей работы свидетельствуют о значительном интервале изменения амплитуды вариаций магнитного поля и амплитуд отклика электрических характеристик приземной атмосферы на сильные геомагнитные возмущения при одном и том же их количественном показателе магнитной активности K . В качестве иллюстрации в табл. 3 приведены интервалы вызванных вариаций B_H , E и I для наиболее часто встречающихся магнитных бурь с $K = 5$ и $K = 6$. Из данных табл. 3 также следует, что при одном и том же уровне геомагнитной активности K интервал вызванных вариаций E на порядок шире интервала вариаций B_H . В качестве возможной причины разного по амплитуде отклика электрических характеристик приземной атмосферы на магнитные события, характеризующиеся одинаковым значением K -индекса (т.е. сходными по интенсивности геомагнитными возмущениями), следует рассматривать разные типы межпланетных источников магнитных бурь (магнитные облака MC, CIR, Shear, Ejecta), различный ионосферный отклик на магнитные бури, а также, что не менее важно, влияние локальных геофизических условий в месте проведения инструментальных наблюдений.

В настоящее время интерпретация полученных данных затруднена из-за отсутствия адекватных моделей, описывающих рассматриваемое явление с учетом разного рода факторов: времени события (дневной или ночной сектор), состояния атмосферы и ионосферы в этот период, а также особенностей локальных условий в месте реги-

страции геомагнитных вариаций и т.д. Установление природы и возможных механизмов возбуждения вариаций электрического поля в периоды магнитных бурь требует проведения дополнительных исследований. Тем не менее авторы полагают, что полученные в настоящей работе данные могут дополнить имеющиеся представления о вариациях электрического поля, сопутствующих сильным магнитным бурям, и окажутся полезными при разработке и верификации теоретических и расчетных моделей магнитных бурь, а также сопровождающих их геофизических процессов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ансен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. 1988. М.: Наука, 150 с.
2. Бандилет О.И., Канониди Х.Д., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Эффекты магнитосферных суббурь в атмосферном электрическом поле // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26. № 1. С. 159–160.
3. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Оджимек А., Мальшева Л.М. Влияние суббурь в ночном секторе Земли на вариации приземного атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т. 52. № 4. С. 494–500.
4. Frank-Kamenetsky A.V., Trochichev O.A., Burns G.B., Papiashvili V.O. Variations of the Atmospheric Electric Field in the Near-pole Region Related to the Interplanetary Magnetic Field // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 179–190.
5. Olson D.E. The Evidence for Auroral Effects on Atmospheric Electricity // Pure Appl. Geophys. 1971. V. 84. P. 118–138.
6. Sao K. Correlation between Solar Activity and the Atmospheric Potential Gradient at the Earth's Surface in the Polar Regions // J. Atmos. Terr. Phys. 1967. V. 29. P. 213–215.
7. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48. № 5. С. 650–659.
8. Смирнов С.Э. Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. // ДАН. 2014. Т. 456. № 3. С. 342–346.
9. 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.
10. Спивак А.А., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С. и др. Геофизические поля мегаполиса // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15. № 2. С. 39–54.

11. *Reiter R.* Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. Amsterdam-London-New York-Tokyo: Elsevier, 1992. 541 p.
12. *Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электрические поля техногенных и природных процессов. М.: ГЕОС, 2018. 464 с.
13. *Барышев В.И., Вагг Л.Л., Гаврилов Б.Г.* Датчик приземного вертикального тока атмосферы // Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2016. С. 358–364.
14. *Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Михновски С.* Утренние полярные суббури и вариации атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 1. С. 51–60.
15. *Belova E., Kirkwood S., Tamm H.* The Effect of Magnetic Substorms on Near-ground Atmosphere Currents // Ann. Geophys. 2001. V. 18. P. 1623–1629.

VARIATIONS IN THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE ATMOSPHERE DURING MAGNETIC STORM

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

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

[#] *E-mail: riabovasa@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin August 19, 2020

We have analyzed the results of instrumental observations of variations in the electric field and atmospheric current in the surface atmosphere during 58 strong magnetic storms for the period 2016–2019, according to the mid-latitude Geophysical observatory “Mikhnevo” of IDG RAS. It is shown that geomagnetic disturbances with the station *K*-index of magnetic activity exceeding 5 are accompanied by variations in the vertical component of the Earth’s electric field. At the same time, a different nature of the variations was established: in some cases, a bay-like increase or decrease in the electric field is recorded, in others – an alternating change of the increased amplitude. In general, the amplitude of variations in the electric field is characterized by a value of 5–580 V/m. At the same time, during periods of magnetic storms, increased variations in the atmospheric current with amplitude of up to 80 pA/m² are recorded. The presented results supplement the corresponding database and may be of interest in improving the known and developing new models of interaction and transformation of geophysical fields and their verification.

Keywords: magnetic storms, electric field variations, atmospheric current