

УДК 550.385.36

Л. Н. Яременко, Г. В. Мельник, О. Я. Шендеровская

Институт геофизики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ
mozgowa@igph.kiev.ua

О течении магнитосферных и индуцированных токов во время магнитных бурь

Доповідь на конференції 05.09.05

Наведено результати різних комбінацій впливу змін в сонячному корпускулярному потоці при одночасній дії магнітних хмар та різних складових міжпланетного магнітного поля на поле магнітних бурь на Землі. У деяких випадках зафіксовано зміщення часу мінімуму параметра D_{st} на близько розташованих обсерваторіях, що може бути пов'язано з впливом індукованих струмів. При виключенні магнітних суббурь визначено тривалість головної фази магнітної бурі, яка відповідає часу наростання кільцевого магнітосферного струму DR і складає 2—5 год. Зроблено висновок, що індукований струм DR не може проникати в мантію Землі глибше, ніж струми добових варіацій.

ВВЕДЕНИЕ

Поле магнитной бури представляет собой результат наложения полей нескольких токов, протекающих на различной высоте и имеющих разную природу. При столкновении солнечного корпускулярного потока с магнитосферой Земли происходит сжатие магнитосферы, переброс части замкнутых силовых линий в хвост и их разрыв, образование токов на поверхности магнитосферы. При внедрении части заряженных частиц с определенным диапазоном энергий в магнитосферу происходит их отклонение магнитным полем Земли и образование кольцевого экваториального тока DR на расстоянии нескольких земных радиусов от поверхности Земли. Одновременно энергия солнечных частиц и пришедшего межпланетного магнитного поля передается в хвост магнитосферы. В переработанном виде она поступает в авроральные области Земли, где создает восточную и западную полярные струи в северном и южном полушариях. Токи полярных струй, образующие суббури, в основном замыкаются через полярные шапки, но частично проникают в средние широты, обра-

зуют вихри токов на высоте ионосферы, преимущественно в слое E. Каждый вихрь занимает пространство в $60—100^\circ$ и более по долготе, а по широте, в зависимости от интенсивности суббури, достигает экватора, либо затухает в средних широтах. В магнитоспокойное время в средних широтах можно видеть изолированные суббури, но при магнитных бурях суббури следуют одна за другой. Нередко их токи накладываются друг на друга и на токи, создаваемые суточными вариациями, которые также текут в слое E. Кроме того, вдоль магнитного экватора течет ионосферный экваториальный струйный ток (электроджет), резко усиливающий суточные вариации поля H . Все эти токи создают по индукции токи противоположных направлений в проводящей мантее Земли. Целью данной работы является выяснение некоторых закономерностей при протекании указанных токов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ток DR не всегда возникает сразу после начала бури. Например, во время бури 15.05.1997 г.

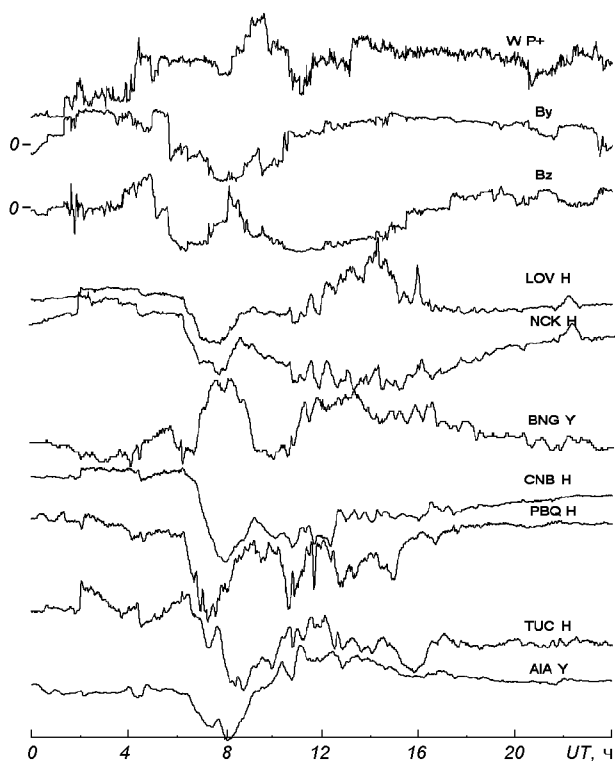


Рис. 1. Влияние отрицательных значений B_z и B_y при осложняющем воздействии $WP+$ на возникновение мировых продолжительных суббурь (буря 15.05.1997 г.)

перед самым внезапным началом sc в 1:59 UT резко увеличилась энергия E с 26 до 41 эВ, динамическое давление солнечного ветра с 3 до 11 нПа, электронная плотность с 22 до 48. Энергия протонов увеличилась с 24 до 38, а в 12 ч дня достигла 70. Это и было временем образования D_{st} . Начальная фаза бури на большинстве обсерваторий наблюдалась с 2 до 4 UT, после чего началось падение поля. Минимум D_{st} в Европе установлен приблизительно в 11 ч, в Африке и Америке в 12–14 ч, в австрало-азиатском регионе в 10–11 ч. Суббури и местные особенности могут влиять на определение минимума D_{st} . Во время этой бури после суббури в 4:30...5:30 UT поле в обсерватории KOU вернулось к предбуревому уровню, и можно считать, что спад поля начался в 7 UT. Интенсивность этой бури порядка 200 нТл, в KOU — 96 нТл. Продолжительность уменьшения поля очень различается для разных бурь и для разных

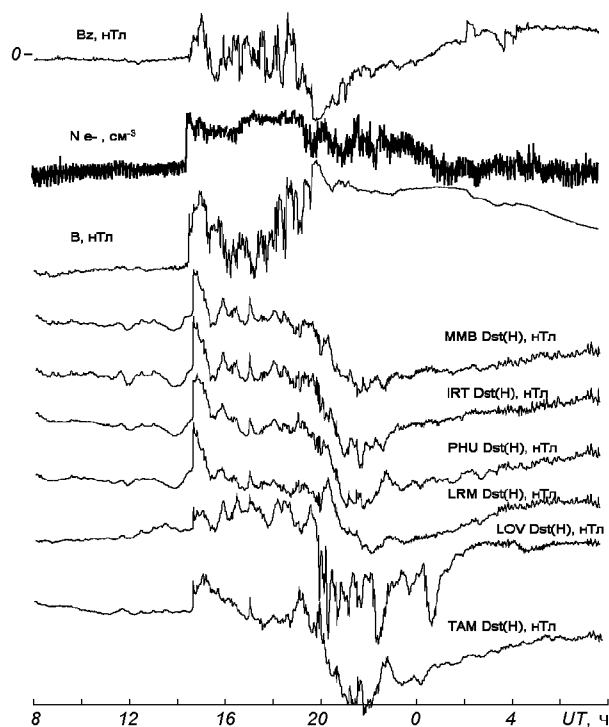


Рис. 2. Магнитная буря 15/16.07.2000 г.

регионов. Она интересна тем, что соответствует времени образования DR . Судя по записям вблизи экватора, где меньше суббури, максимального развития ток DR достиг в 12–15 UT. Но этот минимум на разных обсерваториях одной зоны может смещаться. Например, в SJG минимум виден в 14–16 ч, в DLR — в 18–21 ч, в KOU — приблизительно в 14 ч, т. е. сдвиг во времени минимума D_{st} происходит независимо от широты обсерватории.

Записи магнитного поля на рис. 1 представляют собой сплошные суббури на фоне магнитной бури 15.05.1997 г. Иногда выделяются огромные суббури с большой амплитудой и большей, чем обычно, продолжительностью, как, например, в 6–10 ч 15.05.1997 г. Эта суббури была видна на многих обсерваториях в Америке в 8–10 ч. На рис. 1 она хорошо видна в Европе в 6–9 ч и в Африке, где лучше всего проявилась в записи Y -составляющей. Суббури обусловлена сложным взаимодействием B_z , B_y и энергии протонов. Важным было падение B_z ниже нуля при продолжительных отрицательных B_y . Запись этой

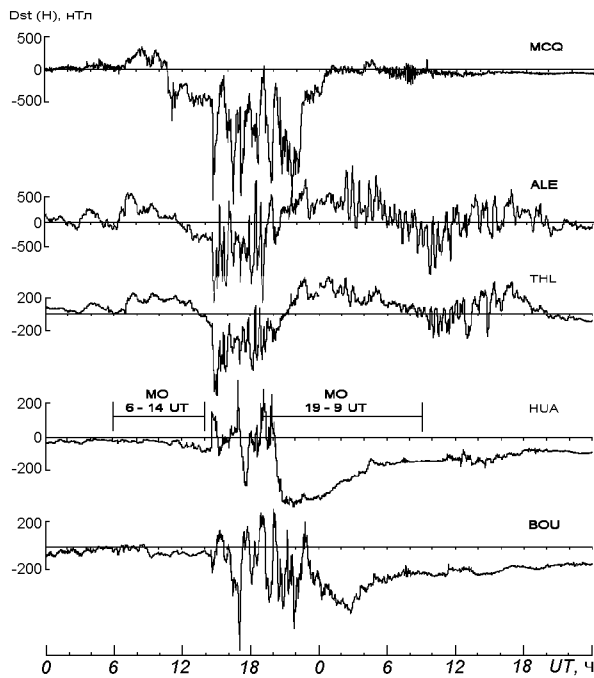


Рис. 3. Влияние магнитного облака 15/16.07.2000 г.

суббури хорошо коррелирует в Австралии в CNB и на севере Америки в PBQ, а также с AIA на юге в Антарктике. Но ее запись в TUC оказалась смещенной почти на 1 ч.

На рис. 2 хорошо видно, как одновременно возникает sc на Земле в 14:37 UT под влиянием резких изменений электронной плотности прошедшего потока и изменений B и B_z . Если сравнить изменения B_z с записью поля на северной обсерватории LOV, то видно, как поле на Земле следует за изменениями в космосе. Короткая положительная суббуря в 17 ч видна на всех обсерваториях и коррелирует с отрицательным изменением B . В 19:10 UT видна положительная суббуря в TAM и отрицательная в LOV. Общее падение поля почти на всех обсерваториях началось в 18:30 UT, следуя за увеличением B и увеличением отрицательной B_z . Продолжительность главной фазы этой бури не более 2 ч, амплитуда 300—350 нТл. Рассматриваемая буря произошла, когда Земля некоторое время находилась в магнитных облаках.

На рис. 3 видно, как влияние МО сдерживает резкие колебания магнитного поля в полярной шапке (ALE, THL), в авроральной зоне (MCQ)

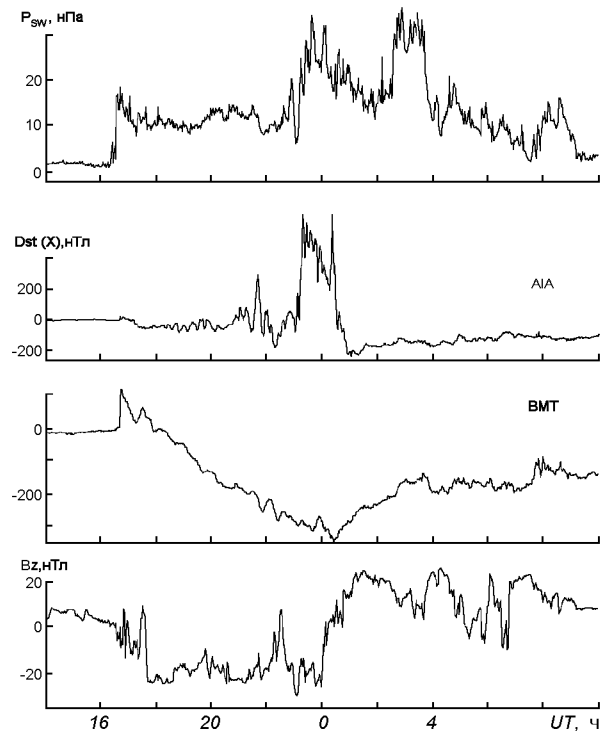


Рис. 4. Магнитная буря 06—07.04.2000 г.

и даже в средних широтах (BOU) и на экваторе (HUA). Реагирует магнитное поле на влияние облака с задержкой в 1—2 ч. В 21—22 ч даже магнитное облако не погасило исключительно сильную магнитную суббурю в MCQ с амплитудой 1100 нТл. Эта суббуря видна в KAK, IRT, PHU, MAW и на всех австралийских обсерваториях. Но в северной Америке ее нет, только в GDH чуть позже видна большая суббуря. В PBQ зафиксирована положительно-отрицательная суббуря с 19 до 21 ч с амплитудой -1000 , $+2000$ нТл. Огромная суббуря в 19—24 ч видна в OOT с амплитудой 1200 нТл. В FRD она несколько короче, но отдельный пик достигает 1400 нТл. Это время минимума D_{st} на других долготах. Здесь же сильное увеличение поля создается токами из полярной струи, превышающими влияние DR. На той же долготе в южном полушарии в это время видны две огромные суббури в LIV и AIA. Как единая суббуря, но измененной формы, она видна в CZT, и нечетко проявилась в HON и TRW.

Запись магнитной бури 06.04.2000 г. показывает, что на экваторе в АВГ и АСГ практически после s_c начался спад поля, а в ВФЕ и на всех европейских обсерваториях видна начальная фаза. Суббуря в 21 ч видна в Африке в ВНГ, а в АСГ ее нет. Большие суббури в минимуме D_{st} в полночь видны и вблизи экватора и в южном полушарии.

На рис. 4 запись этой же бури сопоставляется с солнечными данными. Давление солнечного ветра обнаруживает два четких максимума в 23—24 ч и в 2—4 ч 7 апреля. Первый из них произошел при отрицательном B_z и четко проявился в АИА и LIV в Антарктике, частично в ОТТ и едва заметно в Китае в ВМТ. Но ко времени выброса в 2—4 ч поле B_z стало положительным, и в АИА магнитное поле осталось спокойным. В результате выброса в 2—4 ч произошли суббури в DRV (+200 нТл), в EYR, API и в Австралии.

Запись магнитной бури 31.03/01.04.2001 г. (рис. 5) в ВНГ, SJG и TRW обнаруживает два довольно странных минимума D_{st} , которые видны по всей Африке и Южной Америке. В TSU виден сдвиг по времени, положительные измене-

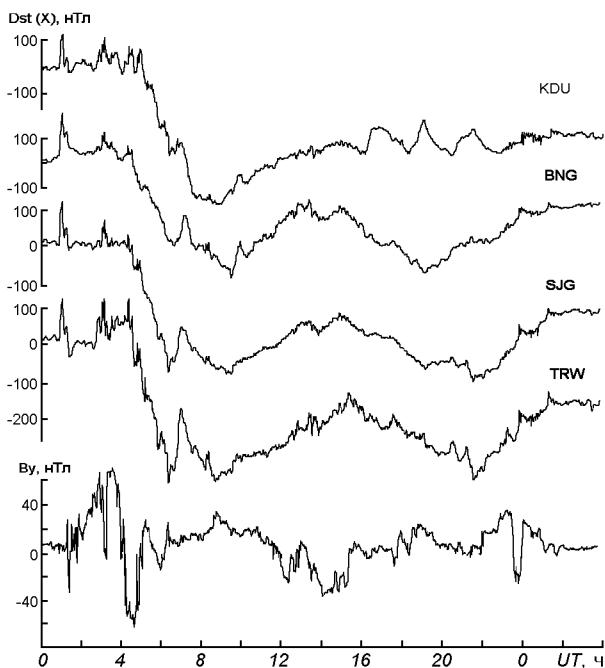


Рис. 5. Влияние B_y на протекание магнитной бури 31.03/01.04.2001 г.

ния здесь несколько меньше, основной минимум смещен с 18 на 16 ч. В LIV этих изменений нет. По записи в KDU можно судить, что минимум действительно был в 8—9 ч при положительной B_y . Позже B_y стала отрицательной, и это повлияло таким образом, что при других довольно мало изменяющихся факторах получилось увеличение поля в Америке и Африке, а в Австралии возникли суббури. Амплитуды этой бури в различных регионах составляют 400—500 нТл. Начальная фаза отмечена до 4:30 UT, а падение поля до 8 ч, но в Африке и Южной Америке — до 9 ч. Амплитуда D_{st} больше в Австралии и PPT. В TRW чувствуется некоторое влияние полярных широт. Главным фактором, обусловившим эту бурю, был приход потока протонов со скоростью 700 км/с.

Магнитная буря 07/08.09.2002 г. (рис. 6) началась внезапно в 16:41 UT. В 17 ч после незначительного повышения начался спад D_{st} ,

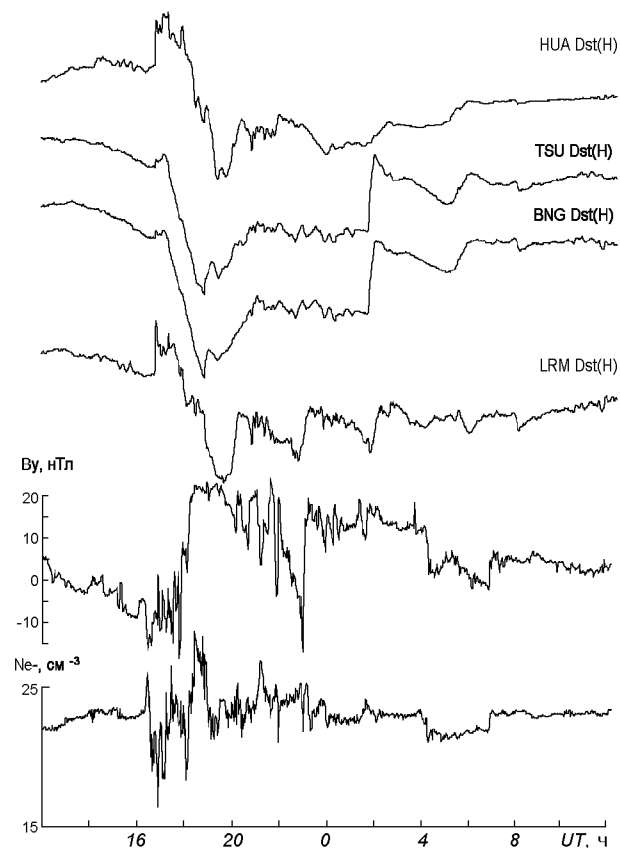


Рис. 6. Запись магнитной бури 07/08.09.2002 г. на далеко отстоящих обсерваториях

вскоре осложнившийся отрицательной суббурей, которая началась в 18:50 и продолжалась до 20 ч. Она хорошо видна в TSU, в TND в Индии, в LRM и HUA. Благодаря записи в HUA, где суббурия началась несколько позже, в 18:50, видно, что это суббурия. По записи в TSU можно было бы думать, что это искусственное влияние, но при просмотре данных других обсерваторий оказалось, что это явление наблюдается в TAM, MBO, BNG, т. е. по всей Африке и в Европе (CLF). В Австралии такого «провала» нет, но суббурия в 18:40 — 20 ч прекрасно видна. Она связана с составляющей B_y . В 18 ч из отрицательной ($-10, -12$ нТл) она становится положительной ($+20$ нТл), выдерживает эту величину до 20 ч, потом немного уменьшается. Составляющая B_z также несколько позже 18 ч переходит из отрицательной (-20 нТл) в положительную (7 нТл), но ненадолго. Скорее всего, суббурия создалась составляющей B_y при влиянии уменьшения скорости солнечного ветра с 80 до 50 км/с. В дальнейшем идет уменьшение магнитного поля за счет D_{st} , и в 1:20 8 сентября возникает новая положительная суббурия, продолжающаяся до 3 ч ночи. Это отрицательно-положительная суббурия с общей амплитудой 90 нТл в LRM, в TSU — +100 нТл, в HUA — +50 нТл, так как здесь вечернее время, и нет дневного усиления амплитуд суббурь.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения магнитного поля во время бури зависят как от множества факторов в околоземном пространстве, так и от внутриземных причин. Наряду с известными закономерностями протекания магнитных бурь, обусловленными изменениями в солнечном ветре и межпланетном поле, обнаруживаются и различия в записях одной магнитной бури разными обсерваториями, находящимися под одинаковым влиянием ММП и параметров солнечного ветра. Очевидно, они обусловлены изменениями индуцированного тока для каждой обсерватории. Изменения в космосе создают суббури, и это также искажает выделение минимума D_{st} . Кроме того, в данном случае исключены суточные вариации по средним величинам поля в предшествующий буре и первый спокойный после бури день. Но насколько

вычитаемые вариации соответствуют суточным вариациям во время бури, трудно сказать. Иногда вычитают суточные вариации по пяти спокойным дням данного месяца. Но это тоже не всегда улучшает результаты, поскольку амплитуды суточных вариаций, кроме сезонных изменений, зависят от солнечной активности. Но не той, которая вызывает магнитные бури, а от изменений дальнего ультрафиолета и мягкого рентгеновского излучения, влияющих на проводимость ионосферы. Если проследить изменения амплитуд суточных вариаций в течение месяца, то можно выделить дни увеличенных амплитуд, обычно 5—10 дней, и дни уменьшенных амплитуд. Поэтому при сравнении средних суточных вариаций за год на разных обсерваториях вариации хорошо увязываются. Но при сравнении за отдельные месяцы разных лет разброс сильно увеличивается [1]. Учитывая такие изменения суточных вариаций, надо иметь в виду, что какая-то часть суточных вариаций может присутствовать в записях бурь.

Магнитные бури с амплитудами D_{st} 300—350 нТл считаются очень большими. Исключительно редко наблюдаются бури с изменениями поля в 1000 нТл. Небольшие бури создают уменьшение поля на 80—100 нТл. А суточные вариации в средних широтах имеют величины 30—50 нТл, ближе к экватору — 60—100 нТл. Экваториальная электроструя у магнитного экватора создает суточные вариации с амплитудами 150—250 нТл в зависимости от солнечной активности. В связи с этим записи обсерваторий, расположенных под экваториальной электроструей, обычно исключают из рассмотрения магнитных бурь. Но если работающих обсерваторий мало в данной местности, приходится учитывать и эти данные.

Уменьшение магнитного поля происходит при различных бурях за 2—5 ч, т. е. оно не столь продолжительно, как предполагалось, считая длительность всей бури 2—3 дня. Минимум D_{st} соответствует вполне развитому току DR , дальше в течение 2—3 дней идет рассеивание этого тока. Следовательно, индуцированный ток DR не может проникать очень глубоко в среднюю мантию Земли. Скорее всего, индуцированный ток магнитных бурь протекает на тех же глубинах, что и индуцированные токи суточных вариаций. По суточным вариациям на различных

долготах выделены пять зон с различной интенсивностью суточных вариаций, обусловленных в сумме токовой системной и экваториальной электроструей (S_q+S_j). Максимальные амплитуды суточных вариаций установлены в американской и австрало-азиатской зонах, средние вариации — в Африке и самые маленькие — в Индии. Токовые системы суточных вариаций S_q+S_j обнаруживают очень интенсивный ток на дневной стороне Земли с максимумом у магнитного экватора порядка 100—120 тыс. ампер. В отдельные дни при увеличенных суточных вариациях эти токи достигают 250—300 тыс. ампер [2]. Расчеты индуцированных токов по бурям показали более интенсивный индуцированный ток в австрало-азиатском регионе (1/2 общего тока) и более слабый в Африке (1/3 общего) [1].

ВЫВОДЫ

1. Суббури и местные особенности могут влиять на определение минимума D_{st} , что особенно четко проявилось во время магнитной бури 15.05.1997 г.

2. На возникновение суббурь влияют различные изменения и в солнечных корпускулярных потоках, и в межпланетном магнитном поле. При каждой магнитной суббуре возникает своя комбинация различных параметров. Вихри то-

ков суббурь захватывают 1—2 континента. При нахождении Земли под действием магнитных облаков «сдерживаются» резкие колебания магнитного поля на всех широтах, в том числе и в полярной области.

3. Индуцированные токи магнитных бурь скорее всего не проникают глубже, чем индуцированные токи суточных вариаций.

1. Мельник Г. В., Яременко Л. Н. О магнитных бурях и проводимости мантии Земли // «Геофизика-2005»: Тез. докл. V Междунар. научно-практическая геолого-геофизическая конф. молодых ученых и специалистов, 12—15 сентября 2005 г., Санкт-Петербург (Петергоф). — Санкт-Петербург, 2005.—С. 189—191.
2. Яременко Л. Н. Суточные геомагнитные вариации. — Киев: Наук. думка, 1992.—136 с.

ON MAGNETOSPHERIC AND INDUCED CURRENTS DURING MAGNETIC STORMS

L. N. Yaremenko, G. V. Melnyk, O. Ya. Shenderovskaya

Our results of estimation of the influence of solar wind parameter changes and interplanetary magnetic field components on the geomagnetic storm field during magnetic clouds are reported. In some cases, the shift of D_{st} -minimum at nearby observatories is detected, that may be connected with the influence of induced currents. After eliminating magnetic substorms, the duration of the main phase of the magnetic storm which corresponds to the time of the increasing part of the magnetosphere ring current DR is equal to 2—5 hours. The conclusion is made that the induced current DR cannot get into the Earth's mantle more deeply than the currents of daily variations.