

УДК 550.838

**Изменение суточного хода геомагнитного поля
во время полного солнечного затмения**

А.В. Ладынин¹, Н.Н. Семаков¹, С.Ю. Хомутов²

¹НГУ, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия;

²АСФ ГС СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Коптюга, 3 Россия

Аннотация

Геомагнитные измерения во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. в Новосибирске (магнитная обсерватория NVS) и находящемся на оси траектории полной фазы затмения пункте Бурмистрово обнаружили изменения компонент геомагнитного поля, вызванные затмением. Главные из них – уменьшение значений северной составляющей X и увеличение наклона I . Аналогичные изменения отмечены по данным обсерватории LZH (Китай). Анализ данных европейских обсерваторий во время затмения 11 августа 1999 г. и обсерваторий Южной Азии во время затмения 22 июля 2009 г. показал, что здесь эффект затмения не выделяется на фоне интенсивных магнитных вариаций ионосферной природы.

Причиной эффектов затмения в относительно спокойном геомагнитном поле может быть частичная релаксация магнитосферы, деформированной солнечным ветром, с уменьшением тока в ионосфере из-за резкого снижения электронной плотности, что вызывает локальное уменьшение северной компоненты магнитной индукции ионосферного тока.

Ключевые слова: геомагнитное поле, полное солнечное затмение, траектория затмения, изменения значений компонент поля, электронная плотность в ионосфере.

Введение

Полное солнечное затмение – нечастое явление. В большинстве случаев в то время, когда затмение происходит в районах размещения обсерваторий, выполняются астрофизические исследования солнечной короны и геофизические исследования процессов в ионосфере. Изменения в суточном ходе геомагнитного поля во время затмений ранее не были известны.

Во время затмения 11 августа 1999 г. в Центральной Европе, где трасса полной фазы затмения прошла через ряд обсерваторий, разные специалисты проводили исследования соответственно своим научным интересам. Группа венгерских ученых [Adam et al., 2005] исследовала влияние затмения на амплитуды магнитных пульсаций и электромагнитные импедансы по данным обсерватории Ногиченк (NCK, Венгрия) и Бад-Бергзаберн (BBZ, Германия). Интернациональная группа [Bencze et al., 2007] изучила распределение амплитуд магнитных пульсаций в ряде европейских обсерваторий по трассе полного затмения. Среди этих обсерваторий были входящие в INTERMAGNET магнитные обсерватории (МО) Фюрстенфельд-брюк (FUR, Германия), Тихань (THY, Венгрия), NCK и Сурларь (SUA, Румыния), которые, как и МО NVS, получают 1-минутные значения компонент вектора магнитной индукции.

Ионосферные эффекты во время затмения 11 августа 1999 г. изучала группа британских исследователей [Davis et al., 2000], используя измерения в Хеллстоне (Англия) в полосе полного затмения. Их главный результат – обнаружение значительного, более чем втрое, уменьшения потока солнечного ионизирующего излучения и концентрации электронов в ионосфере. Аналогичный результат, как подтверждение надежности выводов, получен авторами по данным анализа поведения ионосферы во время затмения 9 июля 1945 г. в Швеции. Публикации результатов ионосферных исследований по затмению 1999 г. идут до сих пор [Le et al., 2008].

Следующее полное затмение в Европе 29 марта 2006 г. было на территории, где нет магнитных обсерваторий. По данным наблюдений в Греции во время этого затмения выполнены исследования изменений ионосферы [Gerasopoulos et al., 2007], изучены гравитационные волны в атмосфере [Zeretos et al., 2007].

Наше исследование изменений суточного хода магнитного во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. является первым в этом роде. Траектория полной фазы этого затмения (рис. 1) начиналась в северной Канаде и в субширотном направлении прошла в полярной области. В Сибири она в субмеридиональном направлении прошла через Новосибирск, где функционирует магнитная обсерватория Ключи (NVS) и субширотно закончилась в Китае. Затмение в Новосибирске началось в 09:41:02 UT, максимальная фаза с 10:43:50 продолжалась 2 мин 20 с до 10:46:10 при высоте Солнца над горизонтом 30° ; закончилось затмение в 11:45:03 UT.

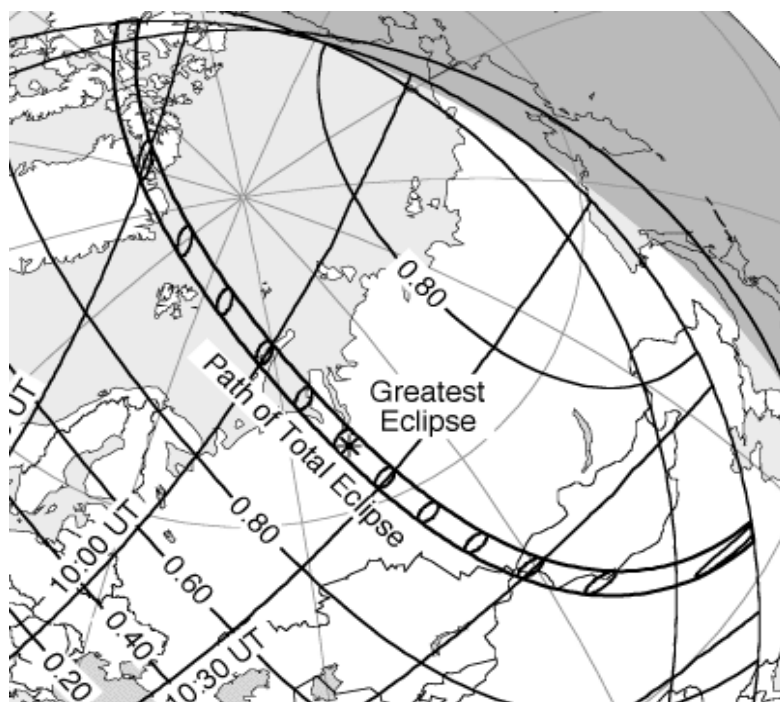


Рис. 1. Траектория полной фазы затмения 1 августа 2008 г.
(<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/>)

Мы выявили изменение суточного хода компонент геомагнитного поля в районе Новосибирска в благоприятных условиях высокого положения Солнца и относительно спокойного геомагнитного поля. Мы проанализировали данные четырех МО, где затмение было почти полным, но Солнце находилось низко над горизон-

том: Кембридж-бей (СВВ) и Резолут (RES) на северо-востоке Канады, Туле (ТНЛ) в северо-западной Гренландии – на восходе; Ланчжоу (LGH) в Китае – на закате.

Обнаружены закономерные изменения компонент геомагнитного поля во время полного затмения 2008 г. в МО Азии (NVS и LZH). Это уменьшение значений северной составляющей X и увеличение наклона I . Причинами этих эффектов могут быть:

а) уменьшение плотности тока в ионосфере из-за резкого снижения электронной плотности и связанное с ним локальное уменьшение северной компоненты магнитной индукции тока в ионосфере;

б) уменьшение сжатия магнитосферы солнечным ветром на время затмения.

Результаты наблюдений

В МО “Ключи” (NVS, координаты N 54°39'; E 83°14') ведется непрерывная запись компонент X , Y , Z геомагнитного поля феррозондовым магнитометром LEMI-008 с дискретностью 1 с и осреднением на интервале 1 мин. Модуль магнитной индукции (F) измеряется по аналогичной схеме протонным магнитометром POS-1 на эффекте Оверхаузера (OVH-магнитометром). В пункте Бурмистрово (N 54°36'; E 82°46') на оси траектории максимальной фазы затмения мы провели специальные измерения в течение трех суток 3-мя OVH-магнитометрами с дискретностью записи 1 мин, 5 мин и системой векторных измерений (D , I – феррозондовыми теодолитами, F – OVH-магнитометром) с дискретностью 15 мин.

Суточные кривые модуля вектора магнитной индукции F по данным измерений 1 августа 2008 г. в МО NVS и Бурмистрово показаны на рис. 2.

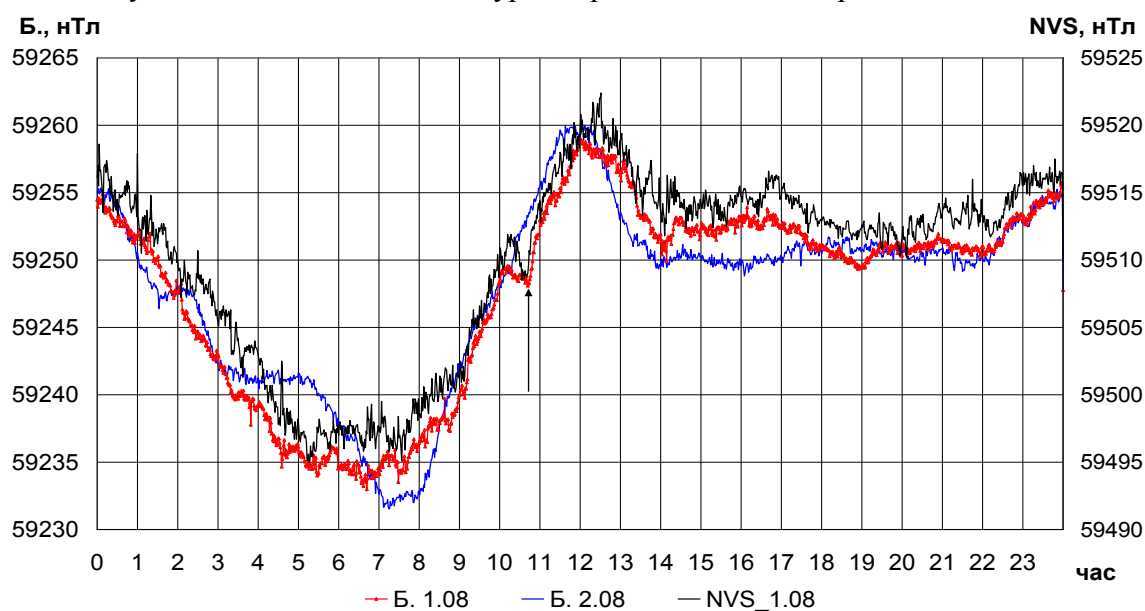


Рис. 2. Суточный ход F по измерениям в Бурмистрово 1 и 2 августа (левая шкала) и в обсерватории Ключи (NVS) 1 августа (правая шкала). Стрелка – момент полной фазы затмения.

Для сравнения приведены кривые F за последующие сутки. Они показывают, что 2 августа был спокойный, а 1 августа – слабо возмущенный день.

На кривых суточного хода F (рис. 2) отмечается уменьшение магнитной индукции во время полной фазы затмения – на 4 нТл по данным измерений в Бурмистрово и на 5 нТл по данным МО NVS. Эта аномалия проявляется на фоне почти линейного тренда с 7-30 до 12-30 UT (Всемирного времени). Для более наглядного

представления об этой особенности поля F мы выбрали для анализа интервал длительностью 3 часа, центрированный на момент максимальной фазы затмения 10:45 UT и исключили линейный тренд. Далее все основные результаты представлены в этом формате. Моменты максимальной фазы затмения в магнитных обсерваториях соответствуют данным F. Espenak & J. Anderson, <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/>

На рис. 3 показаны изменения модуля вектора магнитной индукции 1 августа 2008 г. по 3-часовым интервалам: по данным обсерватории NVS, двум магнитометрам в Бурмистрово (Б.-1 и Б.-2) и данные 02.08 в Бурмистрово (Б. 2.08), также полученные по записи OVN-магнитометра. Исключение линейного дрейфа позволило показать кривые в едином масштабе по общей шкале.

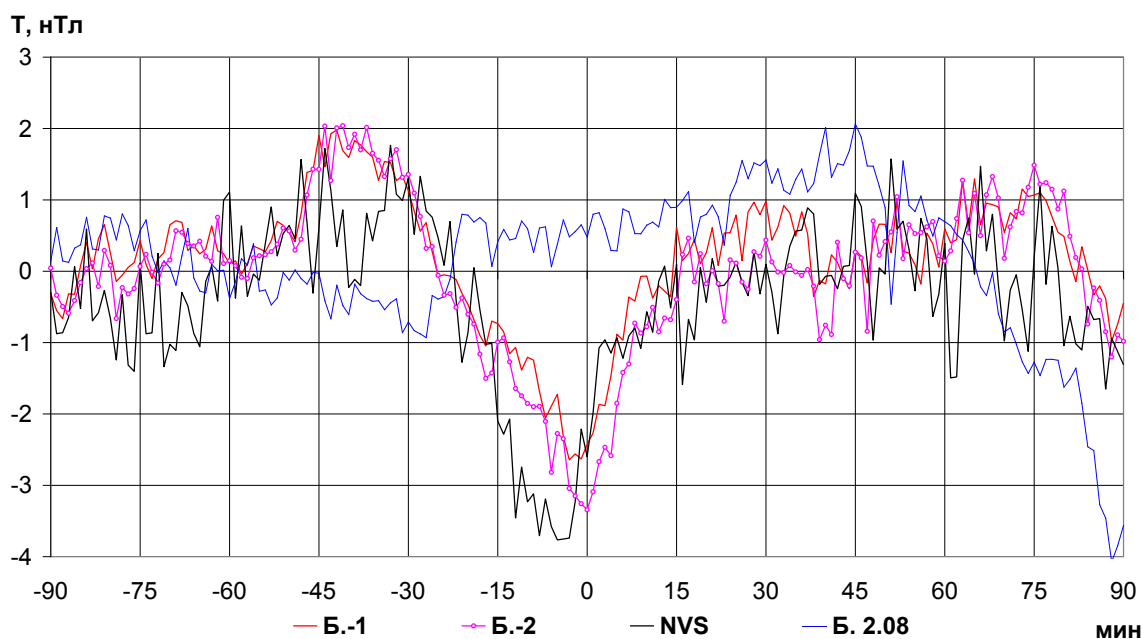


Рис. 3. Изменение F на трехчасовом интервале, центрированном на момент максимальной фазы затмения 1 августа 2008 г. Обозначения: Б-1 и Б-2 – данные двух OVN-магнитометров в Бурмистрово 1 августа; NVS – запись OVN-магнитометра на МО “Ключи”; Б-2.08 – данные OVN-магнитометра в Бурмистрово 2 августа.

Оценки погрешности измерений F в 3-часовых выборках получены из сравнения значений F по прямым измерениям (обозначаются F) и геометрической суммы значений компонент (Tk) по записям трехкомпонентных магнитографов:

$$Tk = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}.$$

Среднеквадратическое расхождение F по 3-часовому интервалу наблюдений: в Бурмистрово (Б.-1 и Б.-2) – $\pm 0,17$ нТл, в МО NVS (F и Tk) – $\pm 0,24$ нТл. Погрешности измерений, как видим, на порядок меньше выявленных изменений геомагнитного поля во время затмения.

По данным трехкомпонентных (X, Y, Z) измерений в МО NVS вычислены другие элементы магнитного поля – H, Tk, D, I . Их изменение во время затмения показаны на рис. 4 (максимальная фаза – 0 на шкале времени).

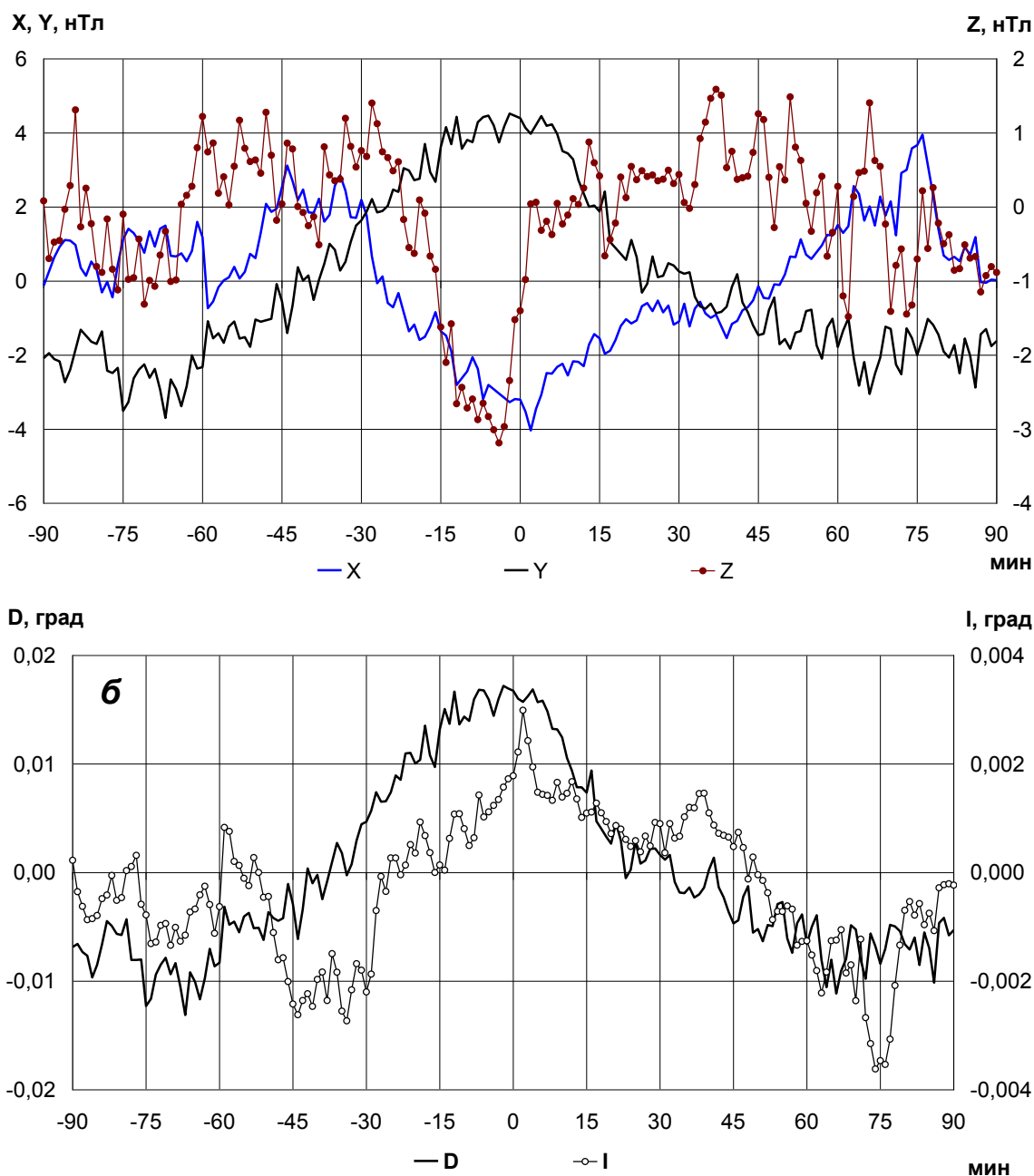


Рис. 4. Изменение элементов геомагнитного поля в МО NVS во время затмения 1 августа 2008: *а* – силовые элементы; *б* – угловые элементы.

Во время затмения отчетливо выделяются максимумы элементов Y , D , I и минимумы по X и Z (а также H и F ; эти кривые не показаны ввиду близости соответственно к кривым X и Z). Экстремальные изменения: -7 нТл в X , $-4,5$ нТл в Z , 8 нТл в Y , $-0,03^\circ$ в D , $-0,006^\circ$ в I .

По данным трехкомпонентных измерений в Бурмистрово (с дискретностью 15 мин) наблюдается похожая картина. На рис. 5 приведены данные этих измерений в сопоставлении с выборкой тех же величин по МО NVS с шагом 15 минут.

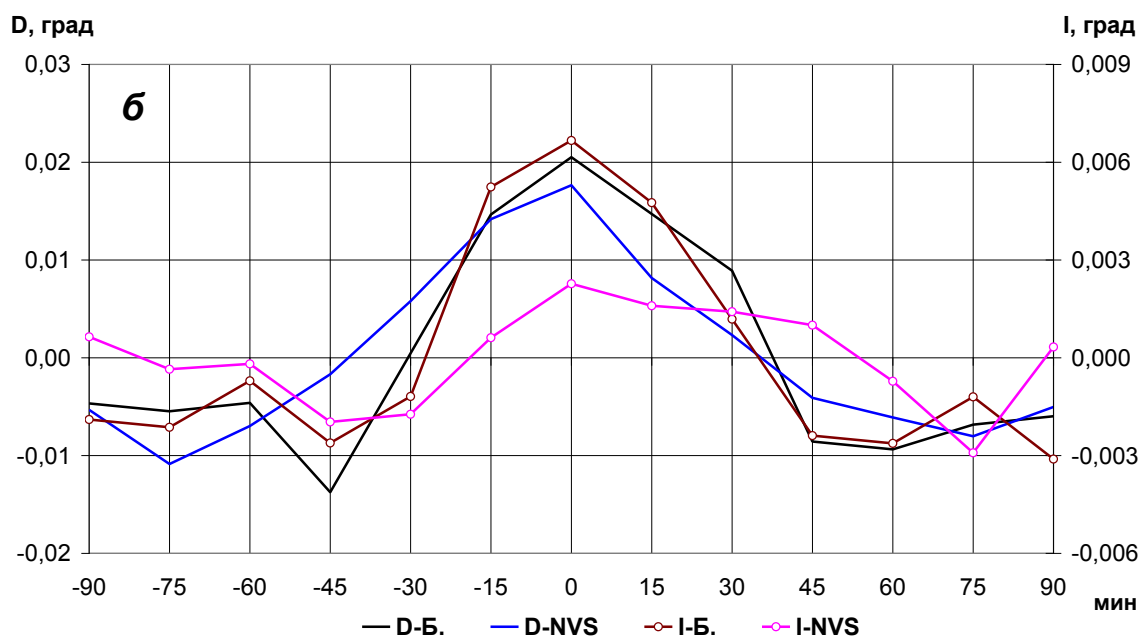
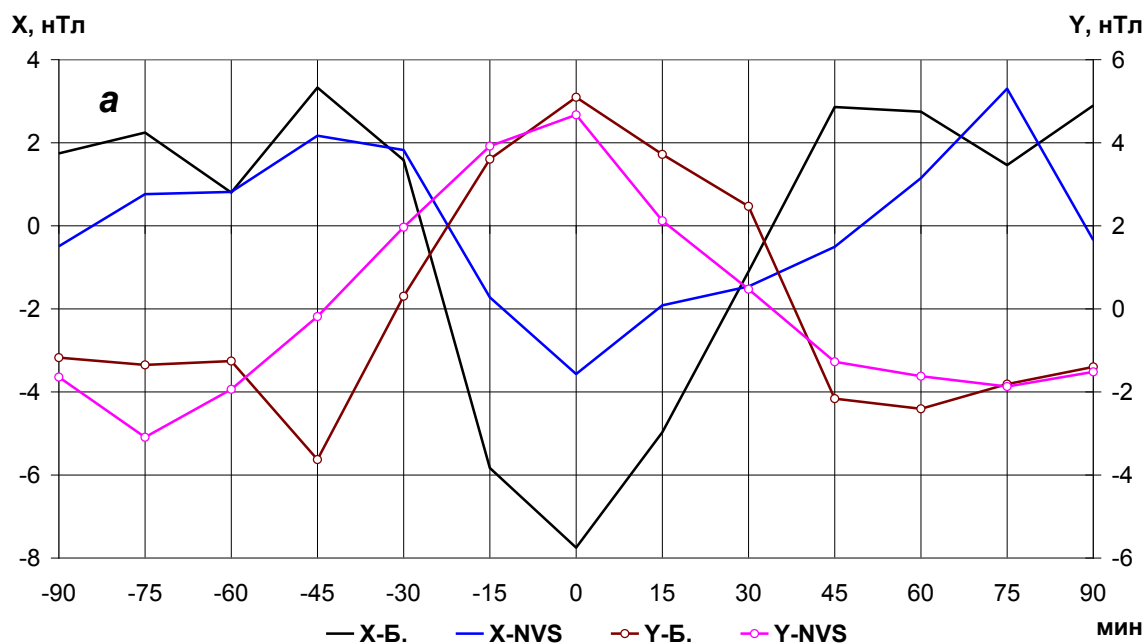


Рис. 5. Изменение элементов геомагнитного поля во время затмения 1 августа 2008 г. в Новосибирске: Бурмистрово (*-Б.) и МО NVS (*-NVS)

По данным трехкомпонентных измерений в Бурмистрово уверенно выявлены максимумы значений в момент затмения: по компоненте Y (9 нТл), склонению D (около $0,03^\circ$), наклонению I (около $0,09^\circ$) и минимум в X (-11 нТл). В данных МО NVS экстремумы I и X имеют несколько меньшую амплитуду.

Единственной обсерваторией, которая оказалась в полосе полной фазы затмения в восточной ее части, была LZH (Ланчжоу, Китай).

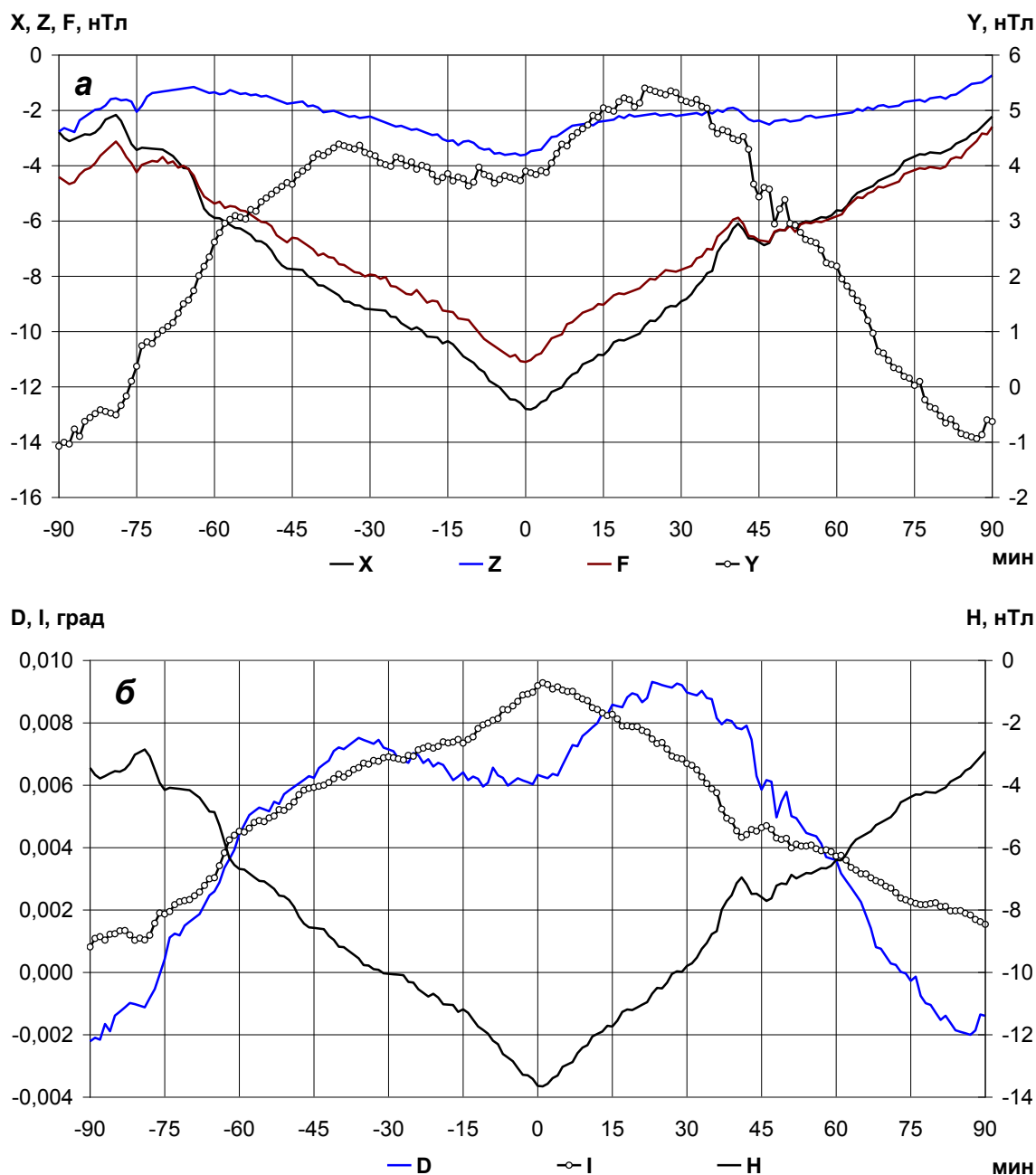


Рис. 6. Изменение во время солнечного затмения 1 августа.2008 г. элементов геомагнитного поля в МО LZH; а – X, Y, Z и F; б – D, I и H.

По данным МО LZH, где затмение с максимальной фазой 0,97 происходило перед закатом Солнца, отмечено уменьшение F на 8 нТл, X – на 13 нТл, Z – на 2 нТл (рис.6 а). По Y отмечено общее увеличение на 6 нТл с понижением на 1 нТл перед главной фазой затмением и возрастанием на 3 нТл после нее. Аналогичен вид кривой D (рис. 6 б) с общим увеличением на $0,007^\circ$. Наклонение I и горизонтальная компонента H изменялись в противофазе: увеличение I на $0,008^\circ$, уменьшение H на 10 нТл. Эти величины мало отличаются от изменения геомагнитного поля в Новосибирске, но уменьшение H в МО LZH примерно на треть больше.

Обсерватории вблизи полюса (МО СВВ, RES, THL) в день затмения оказались на восходе Солнца, а было магнитное поле было неустойчивым. В обсерватории Туле (THL) в Гренландии отмечено уменьшение X и увеличение Y , по величине близкие к изменениям в других МО, но они наложены на сложные колебания

иной природы. По МО Канады Кембридж-бей (СВВ) и Резолют-бей (RES) заметных эффектов во время затмения не обнаружено; вероятные причины – Солнце низко над горизонтом и малые значения компоненты X в приполярной области.

Итак, выявлены следующие изменения геомагнитного поля в обсерваториях NVS и LZH во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г.:

- 1) уменьшение северной составляющей геомагнитного поля X и горизонтальной компоненты H и увеличение наклона I в противофазе с H ;
- 2) увеличение склонения D и восточной компоненты Y с разным соотношением величин в разных МО;
- 3) уменьшение T и менее отчетливое уменьшение Z ; последнее не всегда отмечается на графиках F и Z магнитных обсерваторий на сайте INTERMAGNET.

Для сравнения полученных по затмению 2008 г. результатов мы привлекли данные магнитных обсерваторий Европы по затмению 11 августа 1999 г. и Южной Азии по затмению 22 июля 2009 г.

Выполнен анализ изменения компонент геомагнитного поля в Европейских МО – FUR, NCK, THY, SUA, находившихся в полосе полной фазы затмения, и МО Хартленд (HAD, Англия), расположенной вблизи северного края этой зоны (фаза 0,98) по методике с центрированием графиков на время полной фазы затмения в каждой МО. По всем МО получилась сложная картина без строгой приуроченности минимумов H к моментам затмения. Оказалось, что эффект затмения сдвинут по времени относительно максимальной его фазы, что видно на рис. 7. Здесь показаны центрированные на время затмения графики H и I в трех обсерваториях Центральной Европы относительно среднесуточных значений без исключения линейного тренда.

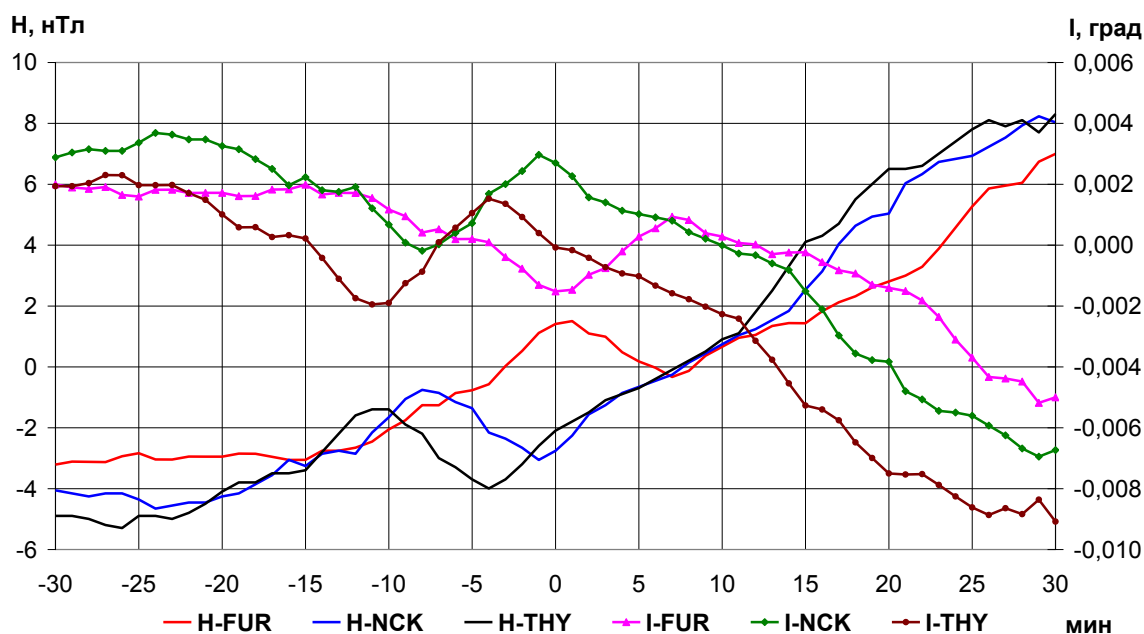


Рис. 7. Сдвиг экстремумов эффекта относительно времени полной фазы затмения 11 августа 1999 г. в трех МО Центральной Европы (даны значения H и I относительно среднесуточных значений).

Возможно, этот сдвиг кажущийся, в действительности характерные для разных МО особенности поля были одновременными, в 10 ч. 46 мин, то есть не име-

ли связи с затмением. Это видно на рис. 8, где приведены изменения поля (компоненты H) за полные сутки без всякой обработки.

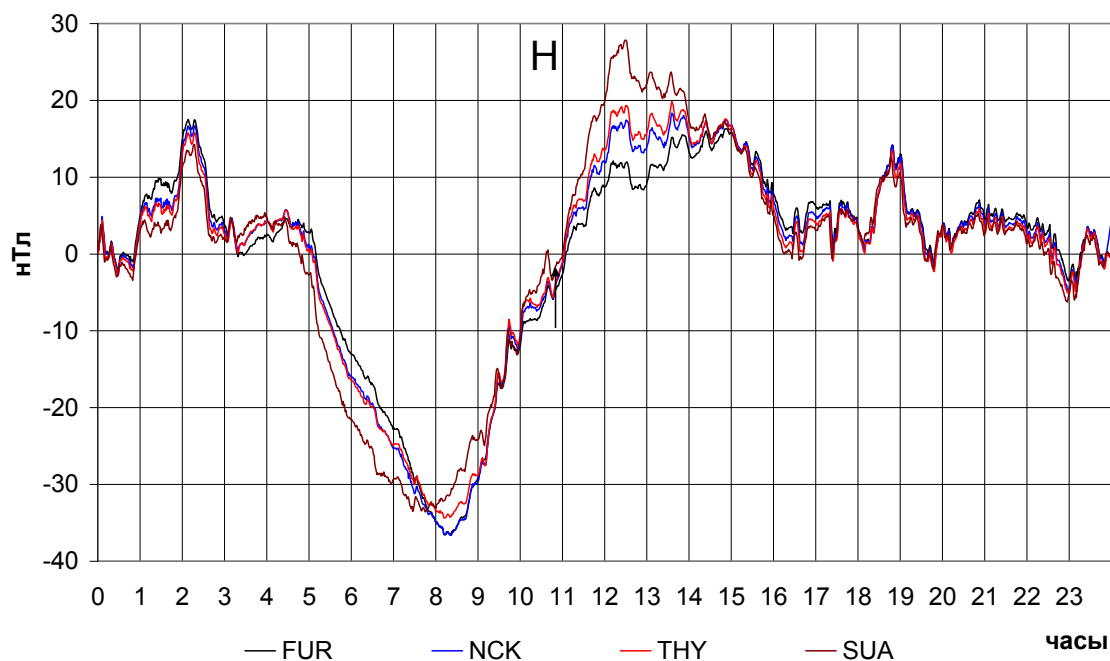


Рис. 8. Суточные вариации H в МО Западной Европы и в МО IRT в Сибири. Стрелкой показано время затмения в МО NCK, в МО FUR, THY и SUA оно отличалось на -4 и 2 мин соответственно

В этот день солнечно-суточная вариация Sq , которая проходит по местному солнечному времени (имеет долготный сдвиг $15^\circ / \text{час UT}$), искажена вариациями ионосферной природы. Этот факт на рис. 8 убедительно демонстрирует кривая H в МО IRT в Сибири. По долготе ($104,5^\circ$) эта обсерватория отстоит от МО Европы в среднем на $\sim 90^\circ$, что соответствует сдвигу фазы Sq -вариации ~ 6 час. Такого сдвига на рис. 8 не наблюдается.

Указанное обстоятельство побудило нас оценить вариации МП во время солнечного затмения 22 июля 2009 г. в Южной Азии. На рис. 10 показан путь полного затмения и расположение магнитных обсерваторий.

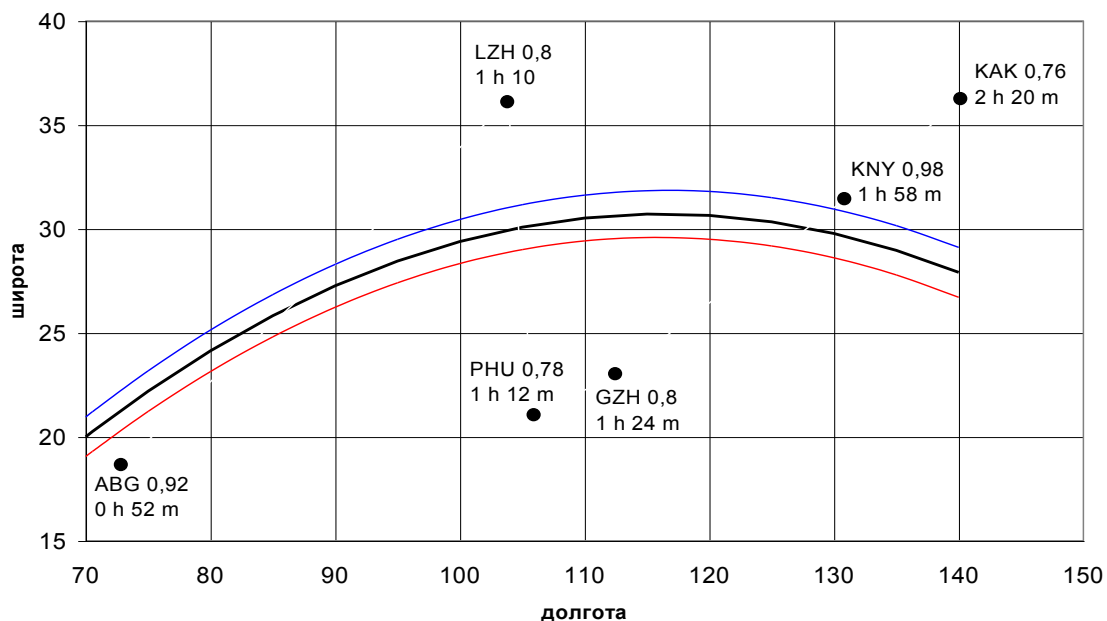


Рис. 9. Траектория полной фазы затмения 22 июля 2009 г. в Южной Азии и расположение магнитных обсерваторий; по каждой МО показаны фаза затмения и время (UT) максимальной фазы.

Как видим, трасса затмения не прошла через эти МО. К тому же магнитное поле в день затмения было возмущенным. На рис 10 приведены данные по H .

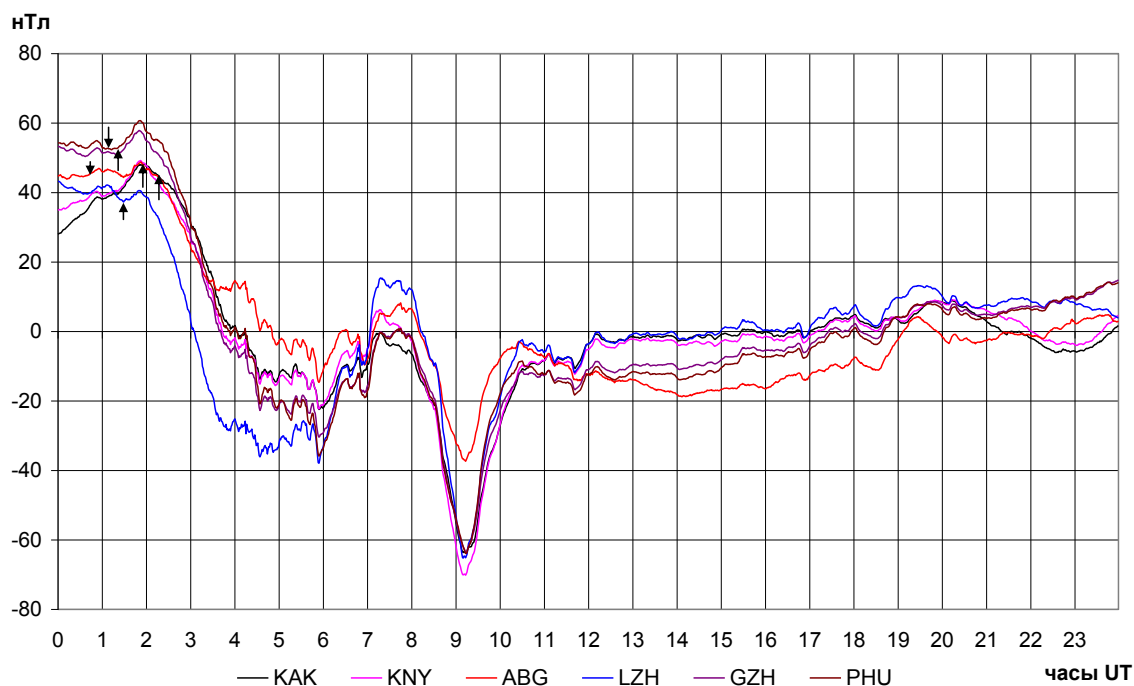


Рис. 10. Вариации H в день полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. Стрелками отмечены моменты максимальной фазы затмения в каждой МО.

Как видим, в этом случае, как и в 1999 г. в Европе, вариация S_q сильно искажена: разность долгот МО ABG и KAK близка к 60° , но 4-часового сдвига фаз вариаций не наблюдается. Ведущая роль в структуре вариаций ионосферных токов

подчеркивается здесь наличием интенсивной бухтообразной аномалии с 8 до 10,5 час, синхронной во всех МО. Эффекта солнечного затмения здесь нет.

Обсуждение результатов

1. Эффект затмения проявляется только в спокойном или слабо возмущенном геомагнитном поле, как это было во время затмения 1 августа 2008 г.

В сильно возмущенном магнитном поле в дни затмений 11 августа 1999 г. в Европе и 22 июля 2009 г. в Южной Азии эффекта затмения не видно на фоне интенсивных практически синхронных вариаций ионосферной природы.

2. Выявлены закономерные изменения значений элементов геомагнитного поля во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. в обсерваториях Азии NVS и LZH:

а) уменьшение значений северной составляющей геомагнитного поля X и горизонтальной компоненты H ; увеличение наклона I в противофазе с уменьшением X и H ;

б) увеличение склонения D и восточной компоненты Y с разным соотношением величин в разных обсерваториях;

в) не повсеместное уменьшение F и менее отчетливое уменьшение Z .

Причину этих эффектов можно связывать с результатами работы [Davis et al., 2000] – обнаружением уменьшения на 70 % потока солнечного ионизирующего излучения и концентрации электронов в ионосфере. Можно предполагать соответствующее уменьшение плотности тока в ионосфере и локальное уменьшение северной компоненты магнитной индукции этого тока.

Во время затмения разнообразны, как показано в работе [Le et al., 2008], изменяются электронная плотность, температура на разных высотах, режим циркуляции масс в верхней атмосфере и др. Нижний слой D на высоте ~ 100 км может быть изменен почти до ночного состояния. В слоях с более высокой электронной плотностью F_1 (~ 200 км) и F_2 (~ 300 км) плотность электронов понижается до 0,3 ее обычной величины, причем это уменьшение возникает с запозданием на 15–30 мин относительно времени полной фазы затмения. Возможно, это могло вызвать запаздывание геомагнитного эффекта затмения, если бы он не был затушеван вариациями ионосферной природы.

Большее на 40 % изменение H и I в МО LZH по сравнению с МО NVS объясняется зависимостью абсолютных значений этих компонент от широты.

Заключение

Выявлены изменения суточного хода геомагнитного поля во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. в Азии (Новосибирск, Ланчжоу). Главные геомагнитные эффекты затмений – уменьшение компоненты X на 8–10 нТл и увеличение наклона на $0,004$ – $0,009^\circ$.

Наилучшими данными для дальнейшего изучения выявленного эффекта являются 1-минутные значения X , Y , Z обсерваторий сети INTERMAGNET. Но таких обсерваторий мало. Полоса полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. проходила в широтном направлении от Индии, МО Алибаг (ABG) через Китай и южные острова Японии вблизи МО Каноя (KHY). Низкие широты и большие значения северной и горизонтальной составляющих были благоприятными условиями для изучения геомагнитного эффекта затмения, но значительная нестабильность магнитного поля не позволила его обнаружить.

Наблюдения с использованием предложенной нами методики можно организовать в виде “повторных станций”: обнаружить эффект затмения удастся при наблюдениях через 15 мин. Но для его детального изучения необходимы автоматические трехкомпонентные магнитовариационные станции.

Благодарности

Результаты, представленные в этой статье, получены на магнитных обсерваториях HAD, FUR, NCK, THY, SUA в 1999 г. и обсерваториях NVS, LZH, THL, CBV, RES в 2008 г. Мы благодарим персонал этих обсерваторий и INTERMAGNET за возможность получения данных высокого стандарта качества через http://www.intermagnet.org/Data_e.html.

Литература

Adam A., J. Vero, and J. Szendroi (2005); Solar eclipse effect on geomagnetic parameters, *Ann. Geophysicae*, 23, 3487-3494.

Bencze P., B. Heilig, B. Zieger, J. Szendroi, J. Vero, H. Luhr, K. Yumoto, Y. Tanaka, and J. Strestik (2007); Effect of the August 11, 1999 total solar eclipse on geomagnetic pulsations, *Acta Geod. Geoph. Hung.*, Vol. 42(1), 23-58.

Davis C.J., M. Lockwood, S.A. Bell, J.A. Smith, E.M. Clarke (2000). Ionospheric measurements of relative coronal brightness during the total solar eclipses of 11 August, 1999 and 9 July, 1945. *Ann. Geophysicae*, 18, 182-190.

Eclipse effects on winds (2003)

<http://www.wds.rl.ac.uk/ionosondes/eclipsr/wind.html> 2003.

Espenak F., Anderson J. Total Solar Eclipse of 1999 August 11. NASA RP1398. <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/Semano/TSE1999/TSE1999.html>

Espenak F., Anderson J. Total Solar Eclipse of 2008 August 01 (NASA/TP-2007-214149) <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEpubs/20080801/rp.html>

Gerasopoulus E., C.S. Zeretos, I. Tsagori et al. (2007). The total solar eclipse of March 2006: overview, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 7, 17663-17704. www.atmos-chem-phys-discuss.net/7/17663/2007/

Le H., Liu L., Yue X., Wan W. (2008) The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observation and modeling. *Ann/ Geophys.*, 26, 107–116.

Zeretos C.S., E. Gerasopoulus, I. Tsagori et al. (2007). Evidence of gravity waves into atmosphere during the March 2006 total solar eclipse. *Chem. Phys. Discuss.* 7, 7603-7624. www.atmos-chem-phys-discuss.net/7/7603/2007/

Подписи к рисункам

Рис. 1. Траектория полной фазы затмения 1 августа 2008 г.

<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/>

Рис. 2. Суточный ход F по измерениям в Бурмистрово 1 и 2 августа (левая шкала) и в обсерватории Ключи (NVS) 1 августа (правая шкала). Стрелка – момент максимальной фазы затмения

Рис. 3. Изменение F на трехчасовом интервале, центрированном на момент максимальной фазы затмения 1 августа 2008 г. Обозначения: Б-1 и Б-2 – данные двух ОВН-магнитометров в Бурмистрово 1 августа; NVS – запись ОВН-

магнитометра в МО Ключи; Б-2.08 – данные ОВН-магнитометра в Бурмистрово 2 августа.

Рис. 4. Изменение элементов геомагнитного поля в МО NVS во время затмения 1 августа 2008: a – силовые элементы; b – угловые элементы.

Рис. 5. Изменение элементов геомагнитного поля во время затмения 1 августа 2008 г. в Новосибирске: Бурмистрово (*-Б.) и МО NVS (*-NVS).

Рис. 6. Изменение во время солнечного затмения 1 августа.2008 г. элементов геомагнитного поля в МО LZH; a – X , Y , Z и F ; b – D , I и H .

Рис. 7. Изменение геомагнитного поля в МО THL (Гренландия) во время затмения 1 августа 2008.

Рис. 8. Траектория полной фазы затмения 11 августа 1999 г. в Европе (<http://eclipse.gsfc.nasa.gov/>)

Рис. 9. Изменение H и I во время затмения 11 августа 1999 г. по данным пяти МО Европы.

Рис. 10. Изменение компонент геомагнитного поля (с исключенным трендом) во время затмения 1999 г. в среднем по пяти МО Европы.

Рис. 11. Сдвиг экстремумов эффекта относительно времени полной фазы затмения 11 августа 1999 г. в трех МО Европы (значения H и I относительно среднесуточных значений).

Рис. 12. Сдвиг экстремумов H , I от времени полной фазы затмения по данным пяти МО Западной Европы.

Сведения об авторах

Ладынин Александр Васильевич – профессор кафедры геофизики НГУ, к. г.-м.н.

Тел. 363-42-16 (с), 330-71-91 (д); ladyn@admin.nsu.ru

Семаков Николай Николаевич – ст.н.с. Института геологии СО РАН, к. г.-м.н.,

доцент кафедры геофизики Тел. 330-49-66 (с); magnit@uiggm.nsc.ru

Хомутов Сергей Юрьевич – АСФ Геофизической службы СО РАН, к. г.-м.н.

Тел. 333-16-14 (с); khomutov@gs.nsc.ru