

УДК 550.388

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ РЕАКЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА КОЛЬЦЕОБРАЗНОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 21 ИЮНЯ 2020 г.

© 2021 г. И. И. Шагимура¹*, И. Е. Захаренкова¹, Н. Ю. Тепеницына¹,
Г. А. Якимова¹, И. И. Ефишов¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (Кф ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия

*e-mail: shagimuratov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.2021 г.

После доработки 30.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Проведен анализ проявлений кольцеобразного солнечного затмения 21 июня 2020 г. в вариациях полного электронного содержания ионосферы (ТЕС) на основе GPS-наблюдений сети IGS Китая. Отмечено, что эффекты кольцеобразного затмения в ионосфере изучены гораздо меньше эффектов полного или частичного солнечного затмения. На основе анализа суточных вариаций ТЕС на отдельных станциях получено, что эффект данного затмения проявился в форме депрессии этого параметра с минимумом, близким к моменту максимальной фазы затмения над станцией наблюдения. Более ярко проявился эффект затмения в вариациях ТЕС ионосферы вдоль индивидуальных пролетов спутников, который имел вид ложбинообразного понижения. Показано, что основной составляющей в падении и задержке минимума ТЕС относительно максимальной фазы затмения является величина магнитуды затмения для конкретной станции. Это следует из высокой корреляции между этими параметрами и магнитудой затмения. Задержка варьируется от нескольких минут до десятков минут в зависимости от величины магнитуды затмения. Максимальная амплитуда падения ТЕС достигала ~4–6 TECU. Для анализа пространственно-временного поведения ТЕС использованы IONEX-файлы с 15-минутным разрешением. Выявлено, что движение максимальной депрессии ТЕС согласуется с траекторией движения и положением тени затмения на поверхности Земли.

DOI: 10.31857/S0016794021050126

1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрое уменьшение ультрафиолетового излучения во время затмения приводит к уменьшению электронной концентрации F_2 -области, что проявляется в уменьшении полного электронного содержания ионосферы (ТЕС). Солнечные затмения вызывают значительные изменения в структуре ионосферы [Rishbeth, 1970]. Во время затмения уменьшается электронная концентрация в F_1 - и F_2 -слоях, происходит увеличение высоты отражения радиосигналов [Le et al., 2009]. Заметные изменения проявляются также в характере высотного распределения электронной концентрации [Farges et al., 2003]. Реакция ионосферы на солнечное затмение зависит от магнитуды, широты, местного времени, сезона, уровня солнечной активности. Известно, что отклик ТЕС на затмение демонстрирует депрессию ТЕС в большой области движения тени на земле.

Данные об амплитуде депрессии могут сильно различаться. Так, в частности, для полного солнечного затмения 11 августа 1999 г. зарегистрировано уменьшение полного электронного содержания (ТЕС) от 0.2–0.3 TECU [Afaimovich et al., 2002] до 5–6 TECU [Baran et al., 2003]. 1 TECU = 10^{16} электрон/м². На средних широтах депрессия ТЕС может достигать 30–40%, задержка отклика ТЕС относительно времени максимальной фазы затмения составляет 5–20 мин [Ding et al., 2010; Jakowski et al., 2008; Krankowski et al., 2008]. В высоких широтах депрессия ТЕС составляет 10–30% [Afaimovich et al., 1998; Hoque et al., 2016; Momani et al., 2010]. На экваториальных широтах отклик ТЕС на затмение усложняется влиянием экваториальной аномалии, депрессия может превышать 30–40% [Tsai and Liu, 1999]. Отклик ТЕС в низких (экваториальных) широтах детально анализировался для затмения 29 июля 2009 г. [Ding et al., 2010; Le et al., 2009]. Для этого затмения по изме-



Рис. 1. Кольцеобразное солнечное затмение.

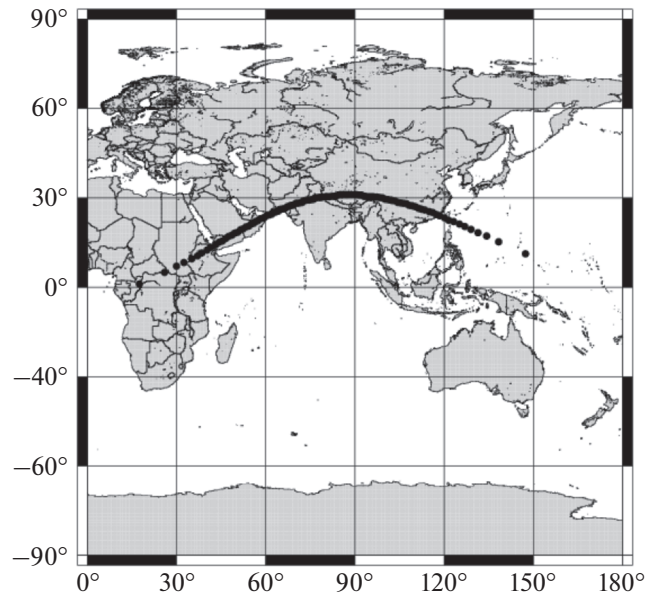


Рис. 2. Траектория тени солнечного затмения 21 июня 2020 г.

рениям группировки спутников FORMOSAT-3/COSMIC получено высотное поведение электронной концентрации на экваториальных широтах [Kumar et al., 2013]. Максимальное уменьшение электронной плотности (~48%) было зарегистрировано на высоте ~360 км.

Анализ затмения 20 марта 2015 г. [Hoque et al., 2016] показал, что процент депрессии ТЕС линейно зависит от магнитуды затмения — степени покрытия солнечного диска. Аналогичное поведение наблюдалось для затмения 3 октября 2005 г. Для этого события выявлена линейная зависимость амплитуды депрессии ТЕС от магнитуды затмения [Шагимуратов и др., 2018]. Величина задержки отклика ионосферы возрастала с удалением от центральной зоны затмения и достигала

40 мин. В последнее время рядом авторов выполнен анализ полного солнечного затмения 21 августа 2017 г., которое наблюдалось над континентальной Америкой, [Cherniak and Zakharenkova, 2018; Coster et al., 2017; Wu et al., 2018]. Депрессия ТЕС составила 5–6 TECU (~40–50%). Была выявлена характерная особенность проявления затмения в поведении ТЕС, когда зафиксировано повышение ТЕС после окончания затмения [Cherniak and Zakharenkova, 2018]. Повышение, составляющее 2–3 TECU, наблюдалось на широтах выше 50° N и продолжалось в течение нескольких часов.

В данной работе анализируются особенности проявления в вариациях ТЕС солнечного затмения 21 июня 2020 г. в юго-восточной Азии. При этом затмении Луна закрывала Солнце на 99 процентов, оставляя яркое кольцо вокруг своей тени (рис. 1). Кольцеобразное солнечное затмение началось в 04:47:45 UT в Африке, продвигалось в восточном направлении, прошло Китай и закончилось в акватории Тихого океана в 08:32:17 UT (рис. 2). Максимальная магнитуда затмения достигала $M = 0.989$ и приходилась на послеполуночное местное время. Геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

2. ДАННЫЕ

Для анализа ТЕС-вариаций, обусловленных затмением, использовались GPS-наблюдения сети станций IGS Китая. В таблице 1 приведены координаты станций, используемых для анализа.

Таблица 1. Координаты станций, используемых для анализа

Станция	Широта	Долгота	Магнитуда
CHAN	43.79° N	124.40° E	0.42
STK2	43.52° N	141.84° E	0.25
BJNM	40.24° N	116.23° E	0.58
BFFS	39.60° N	115.89° E	0.60
DAE2	39.40° N	127.37° E	0.51
NTKA	35.67° N	139.56° E	0.47
JFNG	30.51° N	114.49° E	0.86
TCMS	24.79° N	120.98° E	0.95
HKSL	22.37° N	113.93° E	0.89
HKWS	22.43° N	114.33° E	0.89

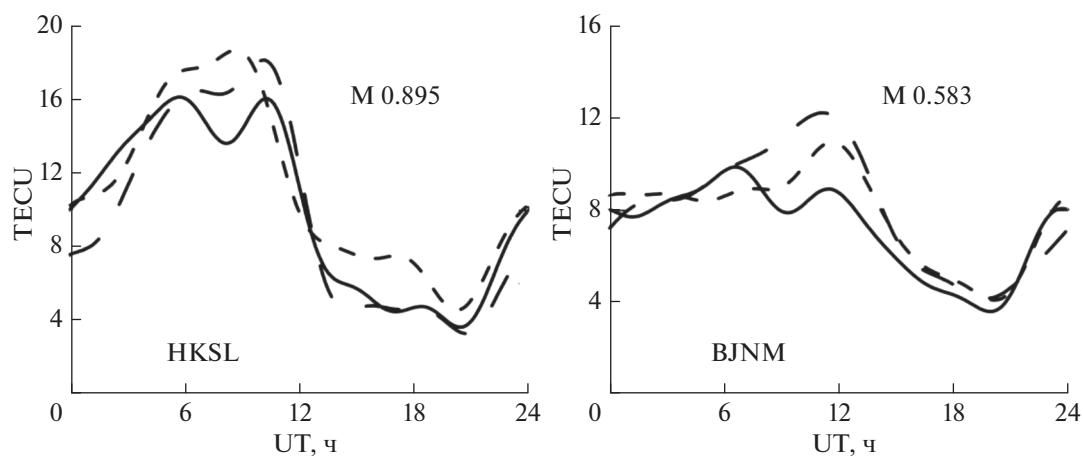


Рис. 3. Суточные вариации ТЕС на станциях HKSL (22.4° N, 113.9° E) и BJNM (40.1° N, 116.2° E) (сплошная – 21, штрихи – 20, точки – 22 июня 2020 г.). На рисунках отмечены магнитуды затмения (M) для указанных станций.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

3.1. Эффект затмения в суточных вариациях на индивидуальных станциях

Для восстановления суточного поведения ТЕС над станциями использовалась методика, описанная в работах [Шагимуратов и др., 2015, 2016]. В соответствии с этой методикой абсолютная величина ТЕС и задержки сигнала в оборудовании определялись с одновременным использованием измерений задержек сигналов для всех пролетов спутников, видимых над станцией на 24-часовом интервале. На рисунке 3 в качестве примера представлено суточное поведение ТЕС на станциях HKSL и BJNM для дня затмения и контрольных дней 20 и 22 июня 2020 г. Вариации для контрольных дней сравнительно большие и могут превышать значения вариаций, обусловленных затмением. Выявлено, что депрессия ТЕС (Δ ТЕС) наибольшая на станции, где максимальна магнитуда затмения.

На рисунках отмечены магнитуды затмения (M) для указанных станций. В таблице 2 приведены величины отклика ТЕС на затмение на различных станциях.

В связи с тем, что использование в качестве контрольных дней для определения амплитуды депрессии затруднительно, мы использовали в

качестве исходной (опорной) величины значение ТЕС до начала затмения. Максимальная величина депрессии ТЕС оценена ~ 3.7 TECU для максимальной фазы затмения.

3.2. Эффект затмения в индивидуальных пролетах спутников

Суточные вариации получены путем пересчета наклонного ТЕС в вертикальный и усреднения ТЕС по всем пролетам спутников над станцией наблюдения. Поэтому величина понижения ТЕС носит усредненный характер. Более детальную картину поведения ТЕС во время затмения можно видеть в вариациях электронного содержания вдоль пролета спутников. Как показал анализ, поведение ТЕС может существенно различаться для индивидуальных пролетов. Это обусловлено различием геометрии траектории пролетов спутников над станцией.

Для анализа отбирались пролеты с максимальной депрессией ТЕС во время затмения. Определение амплитуды депрессии представляло определенную трудность. Прямой метод заключается в сопоставлении вариаций ТЕС для контрольного дня и дня затмения. Однако, в ряде случаев эффект затмения сопоставим с вариациями ТЕС день ото дня. В этом случае мы учитывали вре-

Таблица 2. Отклик ТЕС на затмение на различных станциях

Станция	Широта	Долгота	Магнитуда	Высота спутника	Δ ТЕСУ
HKSL	22.4° N	114° E	0.89	39.2°	3.4–3.6
BJFS	39.6° N	116° E	0.60	42.9°	2.1–2.2
BJNM	40.2° N	116° E	0.58	42.6°	2.0–0.21
CHAN	43.8° N	124° E	0.41	35.0°	1.4–1.6
STK2	43.5° N	142° E	0.25	19.7°	0.14–0.41

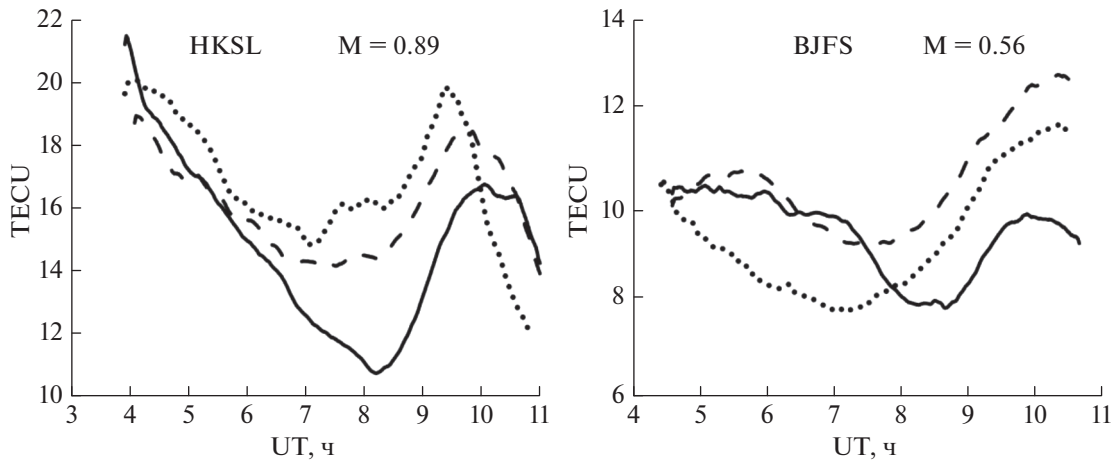


Рис. 4. Проявление эффекта затмения вдоль пролета спутника № 6 на станциях HKSL (22.4° N, 113.9° E) и BJFS (39.4° N, 115.9° E) для 21 июня (сплошная линия) и контрольных дней 20 и 22 июня 2020 г. (точки и штрихи соответственно).

меннее изменение ТЕС вдоль пролета спутника с контрольным днем. Естественно ожидать, что главным фактором, определяющим величину депрессии, является магнитуда затмения рис. 4.

На рисунке 5 представлена статистика зависимости амплитуды депрессии ΔTEC от магнитуды затмения. В среднем величина депрессии хорошо укладывается в линейную зависимость. В то же время наблюдается разброс ΔTEC для одной и той же величины магнитуды. Коэффициент корреляции составил 0.78 (R). Для среднеширотного затмения 20 марта 2015 г., также выявлена линейная зависимость ΔTEC от магнитуды [Ноуе et al., 2016; Шагмуратов и др., 2018], но при этом коэффициент корреляции превышал 0.91. Это различие в коэффициенте корреляции свидетельствует о

том, что в низких широтах на величине депрессии ТЕС, по-видимому, сказывается экваториальная аномалия.

Уравнение регрессии для амплитуды описывается следующим соотношением:

$$\Delta\text{TEC} = 3.19M + 0.68; R = 0.781.$$

3.3. Задержка отклика ТЕС на затмение

Временная задержка отклика ТЕС на затмение имеет большое значение для анализа физических процессов в ионосфере. Задержка (τ) определялась как временной интервал между моментом максимальной фазы затмения и временем, когда явно выделялся минимум значения ТЕС в конкретной точке вдоль пролета спутника. На рисунке 6 показана статистика зависимости времени задержки от магнитуды затмения применительно к индивидуальным пролетам спутника над станциями наблюдения.

Из рисунка следует явно выраженная линейная зависимость задержки τ от магнитуды затмения, коэффициент корреляции достигает 0.93, задержка варьируется от нескольких до десятков минут. Эти значения согласуются с величинами, полученными в работах [Ding et al., 2010; Jakowski et al., 2008d], том числе для полного солнечного затмения 17 августа 2017 г. над Америкой [Cherniak and Zakharekova, 2018].

Уравнение регрессии для задержки описывается следующим соотношением:

$$\tau = -51.68M + 54.55; R = 0.926.$$

3.4. Зависимость отклика ТЕС от широты

Малое количество станций в регионе и их пространственное распределение не позволило про-

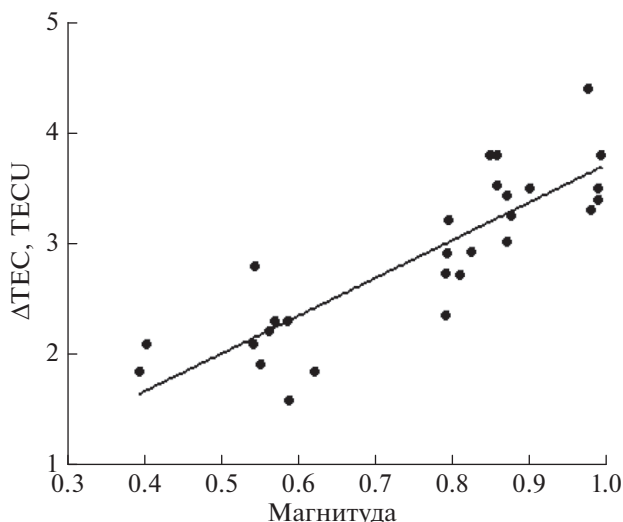


Рис. 5. Зависимость амплитуды депрессии от магнитуды затмения.

вести статистически значимый анализ широтной зависимости отклика на затмение. Нам удалось выделить три пролета, для которых в точке максимума отклика магнитуда затмения была приблизительно равной, а разница в широтах была ощутимой. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Из анализа следует, что амплитуда отклика ТЕС уменьшается к низким широтам.

Как показали Ding et al. [2010], для полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. в восточной Азии на широтах 26°N – 36°N (магнитные широты 15°N – 25°N) наблюдалось увеличение амплитуды ТЕС с понижением широты. С другой стороны, Le et al. [2008, 2009, 2010], анализируя широтный отклик на затмения, выявил, что эффект затмения в низких широтах меньше, чем на средних широтах. Это можно объяснить, в частности, тем, что при выключении источника ионизации рекомбинационные процессы в условиях высокой плотности нейтральной составляющей более эффективны в низких широтах. Этот вопрос требует дальнейших исследований.

3.5. Особенности проявления кольцеобразного затмения

Выключение солнечной радиации во время затмения соответствует уменьшению фотоионизации до уровня ночных условий. Вышеописанный анализ затмения 21 июня 2020 г. показывает, что существенных отличий данного затмения от обычных полных затмений не выявлено. В то же время, для кольцеобразных затмений остаточная радиация сохраняется и во время полного покрытия Луной диска Солнца. Это обстоятельство должно сказаться на абсолютном уровне депрессии ТЕС. С этой целью мы анализировали соотношение между ночной величиной TEC_H и абсолютной величиной $\text{TEC}_\text{З}$ во время затмения: $K = \text{TEC}_\text{З} / \text{TEC}_\text{H}$. Мы сравнивали поведение коэффициента K для полного солнечного затмения 17 августа 2017 г. над Америкой и обсуждаемого кольцеобразного затмения над азиатским регионом.

В таблице 4 представлены данные о коэффициенте K для станций BSMK, NEGO, CN15 американского затмения и станций HKSL, TCMS, JFNG азиатского кольцеобразного затмения. Результаты представлены для станций, где наблюдалась максимальная фаза затмения. Для обоих событий

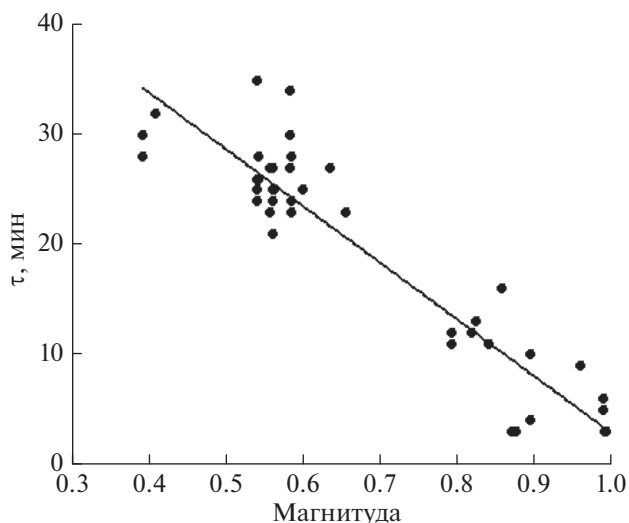


Рис. 6. Зависимость задержки отклика ТЕС от магнитуды затмения.

затмение приходилось на околополуденное местное время. Коэффициент K в 2–3 раза больше для кольцеобразного затмения, т.е. глубина депрессии ТЕС для этого события существенно меньше. Эти результаты косвенно свидетельствуют о влиянии на величину депрессии остаточной солнечной радиации в случае кольцеобразного затмения.

3.6. Пространственно-временная динамика ТЕС во время затмения

Для получения картины пространственно-временного распределения ТЕС мы проанализировали глобальные карты в формате IONEX лаборатории UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). Отличительной особенностью данных карт ТЕС является 15-минутное разрешение.

Сравнение карт ТЕС в день затмения и средними значениями за 14 дней показало, что депрессия ТЕС заметно проявлялась с 06 UT на долготах более 60° – 70°E и увеличивалась к востоку. Широтная картина депрессии явно проявилась с широт 35° – 40°N и увеличивалась к экватору в соответствии с поведением магнитуды затмения.

На рисунке 7 показаны дифференциальные карты между значениями ТЕС в день затмения (06:00–08:45 UT) и средними значениями за 14 сут. Движение максимальной депрессии ТЕС доста-

Таблица 3. Широтное проявление затмения

Станция	№ спутника	Широта	Долгота	Магнитная широта	Магнитуда	ΔTECU
HKSL	17	19.8°N	117°E	10.46°N	0.86	2.25
TCMS	6	27.3°N	127°E	25.14°N	0.87	3.56
JFNG	6	32.5°N	166°E	23.01°N	0.79	3.50

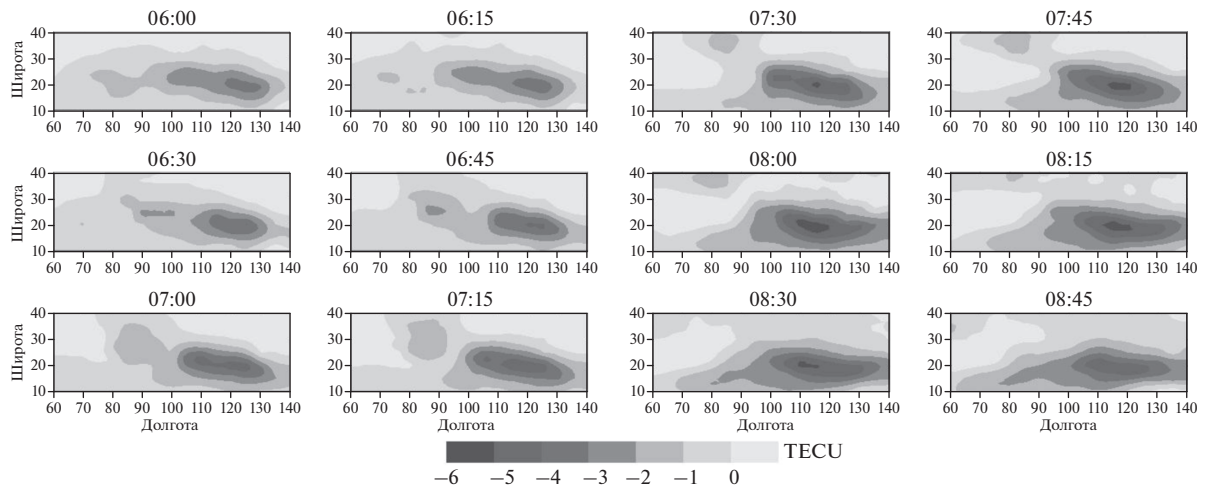


Рис. 7. Дифференциальные карты ТЕС.

точно хорошо согласуется с траекторией движения и положением полной фазы затмения на земле. Максимальная величина депрессии составила ~ 6 TECU, что в целом несколько меньше по сравнению с ранее полученными данными для затмения 22 июля 2009 г. [Tsai and Liu, 1999; Ding et al., 2010; Kumar et al., 2013].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен анализ отклика ТЕС на кольцеобразное затмение 21 июня 2020 г. Анализ касался эффектов, которые наблюдались в юго-восточной Азии. Солнечное затмение началось в 04:47:45 UT в Африке, продвигалось в восточном направлении, прошло Китай и закончилось в акватории Тихого океана в 08:32:17 UT. Максимальная магнитуда затмения достигала $M \sim 0.98$ и приходилась на послеполуденное местное время. Геомагнитная обстановка оставалась спокойной.

Анализ показал следующее.

– Задержка отклика ТЕС относительно максимума затмения достигала от нескольких минут до десятков минут и имела линейную зависимость

от магнитуды затмения. Коэффициент корреляции превысил 0.93.

– Максимальная амплитуда отклика ТЕС, по данным индивидуальных пролетов, линейно зависит от магнитуды затмения и достигает -5 TECU. Коэффициент корреляции достигает 0.78.

– Выявлена особенность проявления кольцеобразного затмения в вариациях полного электронного содержания. Для кольцеобразного затмения отношение величины ТЕС во время затмения к ночному уровню больше, чем для обычного полного затмения. Это может быть обусловлено влиянием остаточной солнечной радиации.

– Выявлена тенденция уменьшения амплитуды отклика ТЕС с понижением широты.

– Дифференциальные карты ТЕС демонстрируют существенные изменения пространственно-временной динамики депрессии ТЕС в день затмения по сравнению с контрольным периодом. Карты показывают широтную, долготную и зависимость от локального времени депрессии ТЕС во время затмения на экваториальных широтах. Движение максимальной депрессии ТЕС хорошо согласуется с траекторией движения и положением полной тени затмения на земле.

Таблица 4. Сравнение эффектов Американского полного затмения 17 августа 2017 г. и кольцеобразного затмения 21 июня 2020 г.

Станция	Долгота, град	Широта, град	Магнитуда затмения	К
BSMK	100° W	46.4° N	0.86	2.2–2.5
NEGO	100° W	40.4° N	0.99	2.1–2.4
CN15	78.4° W	26.2° N	0.90	1.9–2.0
HKSL	114° E	22.4° N	0.89	6–8
TCMS	121° E	24.7° N	0.95	6–7
JFNG	114° E	30.5° N	0.86	3–4

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-00570.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Тепеницына Н.Ю., Радиевский А.В., Ефишов И.И., Якимова Г.А. Использование навигационной системы ГЛОНАСС для ионосферных исследований // Хим. физика. Т. 34. № 10. С. 25–32. 2015.
- Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А., Тепеницына Н.Ю., Ефишов И.И. Интернет-сервис по созданию GPS/ГЛОНАСС карт полного электронного содержания ионосферы для Европейского региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 1. С. 197–209. 2016.
- Шагимуратов И.И., Якимова Г.А., Тепеницына Н.Ю., Ефишов И.И., Колтуненко Л.М. Эффект солнечного затмения 20 марта 2015 г. в полном электронном содержании над Европой // Хим. физика. Т. 37. № 5. С. 84–92. 2018.
- Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Chemukhov V.V., Lukhnev A.V., Zalutsky V.T. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data // Geophys. Res. Lett. V. 25. № 4. P. 465–468. 1998.
- Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Lesyuta O.S. Effects of the August 11, 1999 total solar eclipse as deduced from total electron content measurements at the GPS network // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. P. 1933–1941. 2002.
- Baran L.W., Efishov I.I., Shagimuratov I.I., Ivanov V.P., Lagovsky A.F. The response of the ionospheric total electron content to the solar eclipse on August 11, 1999 // Adv. Space Res. V. 31. № 4. P. 989–994. 2003.
- Cherniak I., Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017 // Geophys. Res. Lett. V. 45. № 3. P. 1199–1208. 2018.
- Coster A.J., Goncharenko L., Zhang S.-R., Erickson P.J., Rideout W., Vierinen J. GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse // Geophys. Res. Lett. V. 44. № 24. P. 12041–12048. 2017.
- Ding F., Wan W., Ning B. et al. GPS TEC response to the 22 July 2009 total solar eclipse in East Asia // J. Geophys. Res. V. 115. N A7. 2010.
- Farges T., Le Pichon A., Blanc E., Perez S., Alcoverro B. Response of the lower atmosphere and the ionosphere to the eclipse of August 11, 1999 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. P. 717–726. 2003.
- Hoque M.M., Wenzel D., Jakowski N. et al. Ionospheric response over Europe during the solar eclipse of March 20, 2015 // J. Space Weather Space Clim. V. 6. № A36. 2016.
- Jakowski N., Stankov S.M., Wilken V. et al. Ionospheric behaviour over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 70. № 6. P. 836–853. 2008.
- Krankowski A., Shagimuratov I.I., Baran L.W., Yakimova G.A. The effect of total solar eclipse of October 3, 2005, on the total electron content over Europe // Adv. Space Res. V. 41. № 4. P. 628–638. 2008.
- Kumar S., Singh A.K., Singh R.P. Ionospheric response to total solar eclipse of 22 July 2009 in different Indian regions // Ann. Geophysicae. V. 31. № 9. P. 1549–1558. 2013.
- Le H., Liu L., Yue X., Wan W. The mid-latitude F2 layer during solar eclipses: observations and modeling // J. Geophys. Res. V. 113. № A8. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JA013012>
- Le H., Liu L., Yue X., Wan W., Ning B. Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses // J. Geophys. Res. V. 114. № A7. 2009. <https://doi.org/10.1029/2010JA0156090>
- Le H., Liu L., Ding F. et al. Observations and modeling of the ionospheric behaviors over the east Asia zone during the 22 July 2009 solar eclipse // J. Geophys. Res. V. 115. № A10. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JA0156090>
- Momani M.A., Yatim B., Mohd Ali M.A. Ionospheric and geomagnetic response to the total solar eclipse on 1 August 2008 over Northern Hemisphere // J. Geophys. Res. V. 115. № A8. P. 2010.
- Rishbeth H. Eclipse effects in the ionosphere // Nature. V. 226. P. 1099–1100. 1970.
- Tsai H.F., Liu J.Y. Ionospheric total electron content response to solar eclipses // J. Geophys. Res. V. 104. № A6. P. 12668–12657. 1999.
- Wu C., Ridley A.J., Goncharenko L., Chen G. GITM-Data comparisons of the depletion and enhancement during the 2017 Solar Eclipse // Geophys. Res. Lett. V. 45. № 8. P. 3319–3327. 2018.