

## Ионосферные эффекты частного солнечного затмения 25 октября 2022 года по данным ионосферной сети Росгидромета

С. В. Литвинов, В. О. Скрипачев, С. Н. Замуруев

*МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, 119454, Россия*  
*E-mail: litvinov\_s@mirea.ru*

Работа посвящена анализу данных вертикального зондирования ионосферы ионозондами «Парус-А» во время частного солнечного затмения 25 октября 2022 г. Солнечное затмение охватило Западную Сибирь, Европу, Ближний Восток, Центральную Азию, а также восточную часть Северного Ледовитого океана, северо-восточную часть Атлантического океана и северо-западную часть Индийского океана. В области, охватываемой затмением, размещено несколько станций вертикального зондирования ионосферной сети Росгидромета: Калининград, Троицк, Ростов-на-Дону, Электроугли, Салехард и Новосибирск. Данные с этих ионозондов показывают, что солнечное затмение вызывает реакцию ионосферы, в частности снижение критической частоты отражающих слоёв и уменьшение полного электронного содержания. В статье приводятся изменения критической частоты  $f_oE$  и  $f_oF2$  и минимальной действующей высоты слоя F2 во время солнечного затмения на некоторых ионозондах, попавших в область тени. Обнаружены интересные явления в сибирском регионе, где время солнечного затмения совпало с наступлением сумерек.

**Ключевые слова:** ионосфера, вертикальное зондирование, частное солнечное затмение, ионосферные эффекты, реакция ионосферы

Одобрена к печати: 25.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-325-333

### Введение

Реакция ионосферы на солнечные затмения отслеживается достаточно давно. Солнечные затмения, даже неполные, оказывают влияние на ионосферу, порой достаточно значительное (Афраймович и др., 2010). Считается, что во время таких событий уменьшается критическая частота, увеличивается действующая высота отражения от слоёв, уменьшается полное электронное содержание (ПЭС) (Черняков, 2010). Также отмечается, что максимальная реакция ионосферы может отставать от максимальной фазы затмения до получаса. Во время солнечного затмения снижается ионизирующая радиация аналогично наступлению сумерек, что и влечёт за собой соответствующее изменение параметров.

Исследователи со всего мира пристально наблюдают за возмущением ионосферы во время неординарных и нерегулярных ситуаций (солнечные затмения, падения метеоритов, землетрясения, вспышки на Солнце и т. д.) (Данилов, 2013). Измерения проводятся с использованием как наземных средств зондирования, так и спутниковых систем (Карелин и др., 2018). Это позволяет с достаточной достоверностью получить информацию о процессах, в том числе в области лунной тени (Горчаков, 2021; Савиных и др., 2022).

Исследования осложняются относительно редкой частотой солнечных затмений и отсутствием средств измерения параметров ионосферы в интересующей области. Тем не менее в работе учёных из Чили (Valdés-Abreu et al., 2022) отмечается снижение ПЭС во время кольцевого солнечного затмения 10 июня 2021 г. Вариации ионосферы оценивались по данным приёмников ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) и четырёх ионозондов. Поведение ионосферы ясно демонстрирует, что электроны в этом слое менее активны во время солнечного затмения. Авторы утверждают, что результаты согласуются с ионосферными эффектами, о которых сообщалось при аналогичных предыдущих солнечных затмениях.

Несмотря на пристальное внимание к ионосфере во время солнечных затмений, на данный момент отсутствует общепринятая модель реакции среднеширотной ионосферы на такие события ввиду относительно редких полных затмений. Отмечается большой разброс основных параметров во время солнечных затмений, в том числе величины запаздывания относительно максимальной фазы затмений.

Так, в работе индийского учёного (Sileesh, 2019) отмечается, что во время полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. критическая частота слоя E увеличилась с  $\sim 4\text{--}5$  до 9 МГц. Также исследователи обнаружили доминирующие гармоники с периодичностью от 4 до 8 мин в волнообразном поведении критической частоты слоя E. Авторы объясняют это тем, что сверхзвуковая движущаяся тень Луны изменяет давление и температуру, создавая условия сдвига ветра, транспортируя ионы и усиливая ионизацию. Теоретическая основа, которая могла бы предсказать поведение ионосферы, всё ещё отсутствует. Сбор таких данных представляется первым шагом на пути к построению теории, которая объясняла бы и предсказывала подобные явления.

Во время кольцеобразного солнечного затмения 21 июня 2020 г. анализировалась реакция низкоширотной ионосферы (Tripathi et al., 2022). Анализ данных глобальной системы позиционирования ионосферы (GPS — *англ.* Global Positioning System) в Хайдарабаде и Бангалоре (Индия) показывает изменение высоты отражения в ионосфере ( $\sim 8\text{--}11$  км) и электронной плотности ( $\sim 3\text{--}2$  см<sup>-3</sup>) в D-области во время затмения. Высота отражения ионосферы D-области увеличивается с  $\sim 84$  до  $\sim 95$  км, а затем уменьшается до  $\sim 87$  км. Концентрация электронов (электронная плотность) снижалась на протяжении всего затмения с 24 до 21 см<sup>-3</sup>, а затем увеличивалась до 23 см<sup>-3</sup>. Отклоняющееся от тренда значение вариации общего электронного содержания на обеих станциях ясно показывает наличие перемещающихся ионосферных возмущений, имеющих волнообразные особенности.

Работы по исследованию ионосферных эффектов солнечных затмений позволяют изучить физические процессы и способствуют разработке более точных моделей ионосферы. В настоящей работе рассмотрена реакция ионосферы на частное солнечное затмение 25 октября 2022 г. по данным вертикальных ионозондов «Парус-А» ионосферной сети Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) (Литвинов и др., 2023).

## Солнечное затмение 25 октября 2022 года

Частное солнечное затмение 25 октября 2022 г., по данным астрономического ежегодника, имело максимальную фазу 0,8619 в Ханты-Мансийском автономном округе севернее Нижневартовска в 14:00 МСК (московское время) (<http://planetarium-moscow.ru/about/news/chastnoe-zatmenie-solntsa-25oktyabrya-202/>). Карта солнечного затмения, составленная по данным портала TimeAndData (<https://timeanddate.com>), приведена на *рис. 1* (см. с. 327) (<https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2022-october-25>).

Частное затмение началось в 11:58 МСК с восходом солнца в арктической зоне Атлантического океана, вблизи северного побережья Исландии. Далее область видимости частного затмения распространялась на восток и юго-восток, охватывая северо-восток Африки, западную и центральную Азию, практически всю Европу, за исключением юго-запада Пиренейского п-ова. Завершилось частное затмение в 16:02 МСК с заходом солнца в Аравийском море, охватив западную половину Азии, в том числе Индию.

Наиболее благоприятные условия для наблюдения частного затмения сложились в европейской части России, где оно прошло днём при достаточно высоком положении солнца над горизонтом, при этом максимальная фаза составила не менее 0,6, за исключением Крыма и Калининградской обл., где фаза была чуть меньше 0,6. Максимальная фаза на территории России наблюдалась в Западной Сибири, где она превысила 0,8, однако это произошло под вечер, перед заходом или на самом заходе солнца за горизонт. В этом регионе ситуацию можно описать таким образом, что так называемая искусственная ночь, вызванная затмением, перешла в обыкновенные сумерки.

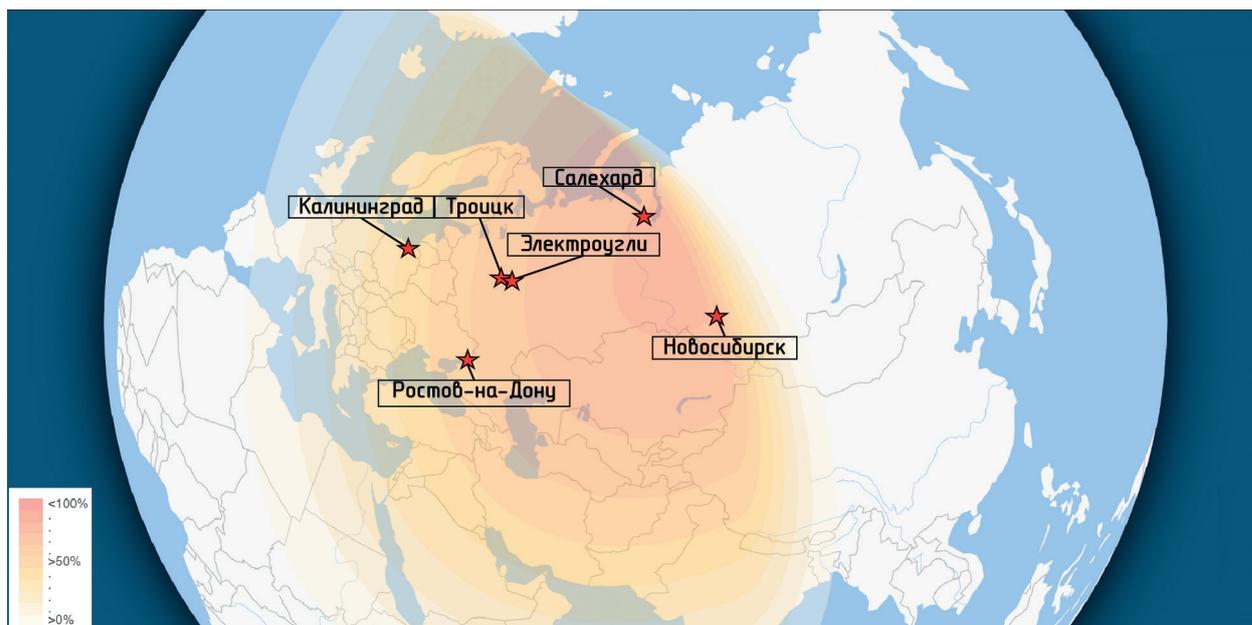


Рис. 1. Карта частного солнечного затмения 25 октября 2022 г.

## Результаты наблюдений

В область тени попали ионозонды «Парус-А», развёрнутые в следующих городах: Калининград, Троицк, Электрoугли, Ростов-на-Дону, Салехард, Новосибирск (Гивишвили и др., 2013). Их схематическое расположение показано на рис. 1. Параметры ионозондов применительно к солнечному затмению представлены в таблице.

### Обстоятельства видимости затмения на ионозондах «Парус-А»

Территория	Координаты, °с.ш./°в.д.	Первое касание, UTC	Максимальная фаза, UTC	Размер максимальной фазы	Последнее касание, UTC
Москва	55,49/37,29	09:24:38	10:38:54	0,7094	11:51:30
Ростов-на-Дону	47,20/39,70	09:35:54	10:53:07	0,6705	12:07:21
Электрoугли	55,80/38,30	09:24:38	10:38:54	0,7094	11:51:30
Салехард	66,50/66,50	09:38:18	10:46:34	0,8454	11:28:03
Новосибирск	54,80/83,20	10:08:29	11:02:44	0,7509	11:06:45
Калининград	54,40/20,10	09:11:47	10:20:40	0,5425	11:30:11

Примечание: UTC — *англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время.

Ионозонды серии «Парус-А» зарегистрированы как средство измерения, внесены в Государственный реестр средств измерений под номером 51425-12 и проходят поверку согласно документу «Инструкция. Станции вертикального радиозондирования ионосферы наземные «Парус-А». Методика поверки. 100269 МП», утверждённому Государственным центром испытаний средств измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» 20 апреля 2012 г. (Минлигареев, 2013). Разработанные в 2010 г., эти отечественные ионозонды проводят сеансы вертикального зондирования каждые 15 мин с ручной обработкой каждой часовой ионограммы. Во время поверочных работ ионозонды прошли модернизацию и с 2017 г. способны проводить наклонное зондирование (Литвинов и др., 2019).

Для географических пунктов расположения ионозондов «Парус-А» наибольшая фаза частного солнечного затмения приходится на станцию в г. Салехарде. Однако из-за совпадения

времени затмения солнца с его заходом за горизонт ионосферные эффекты практически незаметны. Отмечается лишь ускоренное уменьшение критической частоты по сравнению с медианой, рассчитанной за двухнедельный период (неделя до затмения и неделя после), исключая день затмения.

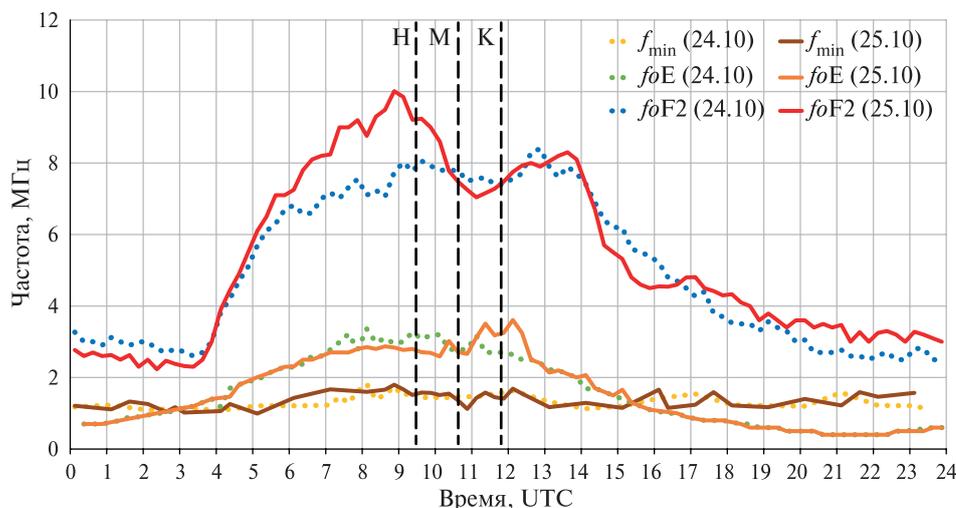
Интересны данные ионозондов московского региона. Время наступления максимальной фазы затмения (0,7094) в 10:38 МСК близко к положению солнца в зените (12:14 МСК), и следовательно, реакция ионосферы отчётливо регистрируется. Ионосферные эффекты, вызванные частным солнечным затмением, особенно явно проявляются в изменении критической частоты различных областей ионосферы. На *рис. 2* приведены зависимости критической частоты различных слоёв ионосферы, полученные по ионограммам «Парус-А» (г. Троицк), снятым с интервалом 15 мин 25 октября 2022 г. Период солнечного затмения отмечен вертикальными линиями на оси времени: Н — начало, М — максимум, К — конец. Штриховыми линиями показано изменение тех же параметров днём ранее (24 октября 2022 г.).

В общем случае реакция ионосферы на прохождение лунной тени в верхних слоях атмосферы проявляется в ряде наблюдаемых эффектов в вариациях параметров вертикального зондирования: возрастании минимальной высоты F-слоя и действующей высоты отражения, падении концентрации в максимуме F-слоя, обычно характерных для ночной ионосферы.

Из *рис. 2* видно, что во время попадания области отражения ионосферы в тень критическая частота слоя F2 заметно уменьшается с 10,01 до 7,04 МГц. Принято считать, что при вертикальном зондировании эффекты затмения Солнца в нижней ионосфере можно также оценить по временному ходу поглощения радиоволн, который определяется поведением минимальной частоты отражения  $f_{\min}$ . В нашем случае изменения минимальной частоты практически нет. Это говорит о том, что заметного увеличения поглощения радиоволн в нижней ионосфере не наблюдается, а значит, солнечное затмение не оказало существенного воздействия на нижнюю ионосферу.

При этом в случае частного солнечного затмения 25 октября 2022 г. в московском регионе не отмечено изменение максимальной высоты (hmF2) слоя F2 по сравнению с предыдущим днём 24 октября 2022 г. На *рис. 3* (см. с. 329) приведено изменение минимальной высоты слоя F2 во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Троицк).

Как отмечалось ранее, в сибирском регионе время наступления максимальной фазы солнечного затмения совпало с заходом солнца, из-за этого эффекты собственно затмения нивелировались естественным снижением ионизации ионосферы. На *рис. 4* (см. с. 329) приведены изменения критической частоты  $f_oE$  и  $f_oF2$  на ионозонде «Парус-А» (г. Салехард).



*Рис. 2.* Изменение критической частоты  $f_oE$  и  $f_oF2$  во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Троицк)

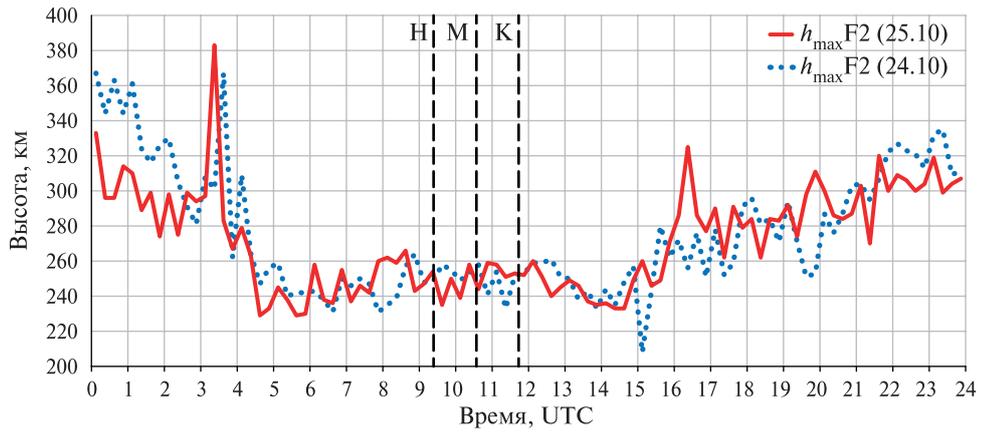


Рис. 3. Изменение минимальной действующей высоты слоя F2 во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Троицк)

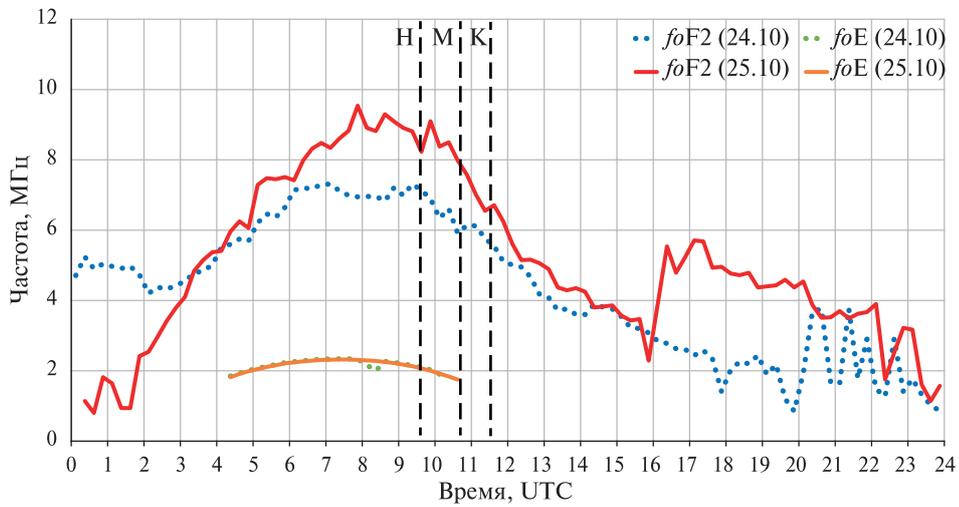


Рис. 4. Изменение критической частоты  $foE$  и  $foF2$  во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Салехард)

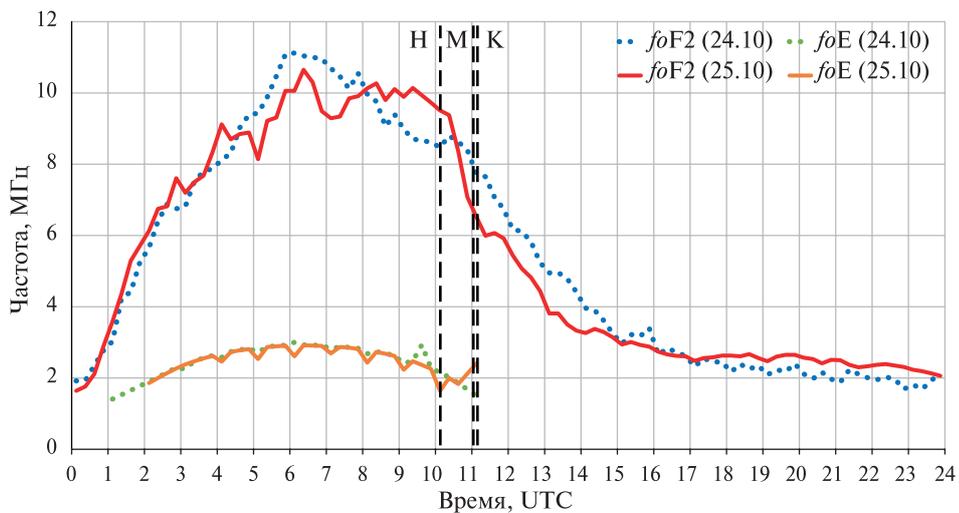


Рис. 5. Изменение критической частоты  $foE$  и  $foF2$  во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Новосибирск)

Аналогичная ситуация наблюдалась и в Новосибирске (рис. 5, см. с. 329), где время между максимальной фазой солнечного затмения и его завершением составило менее 4 мин. Здесь можно отметить лишь увеличенную скорость снижения критической частоты слоя F2 по сравнению с предыдущим днём (Белинская, 2019).

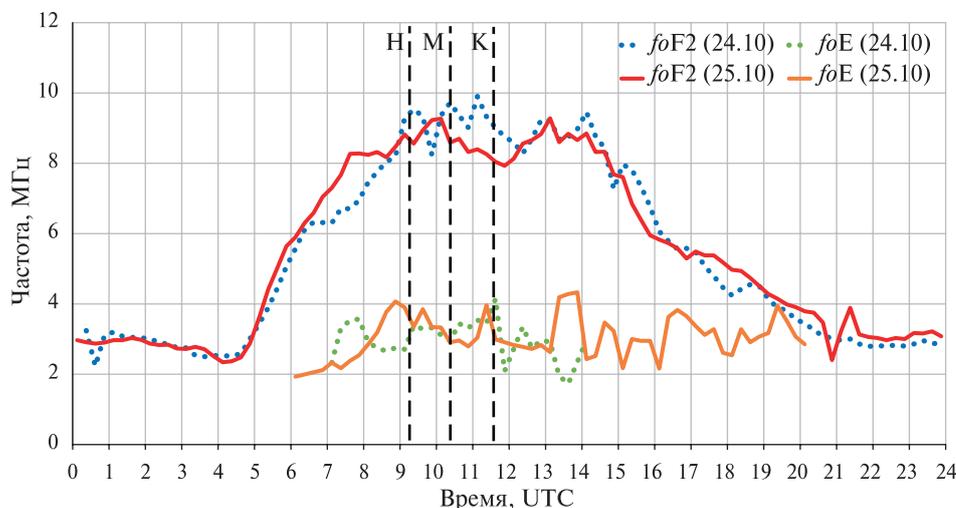


Рис. 6. Изменение критической частоты  $foE$  и  $foF2$  во время неполного солнечного затмения 25 октября 2022 г. на ионозонде «Парус-А» (г. Калининград)

Напротив, интересна ситуация с реакцией ионосферы над Калининградом (рис. 6, см. с. 330). При заметно меньшем размере максимальной фазы (0,5425) по сравнению с Салехардом (0,8454) и примерно одинаковом времени нахождения в области тени в Калининграде ионосферные эффекты явно проявились.

Из рисунка видно, что критическая частота слоёв E и F уменьшилась во время нахождения в области тени. В случае Новосибирска, где размер максимальной фазы также больше (0,7509), время солнечного затмения существенно меньше — 58 мин против 139 мин в Калининграде. То есть в Новосибирске наступление сумерек и краткое нахождение в области тени обусловили практическое отсутствие ионосферных эффектов, вызванных солнечным затмением.

## Заключение

Результаты вертикального зондирования ионосферной сети Росгидромета во время частного солнечного затмения 25 октября 2022 г. в целом подтвердили реакцию ионосферы с ранее проведёнными исследованиями, т. е. снижение критической частоты отражающих слоёв, характерной для времени захода солнца. В то же время обнаружены интересные явления отсутствия реакции ионосферы при совпадении времени солнечного затмения с наступлением сумерек в конкретном регионе. При этом даже в районах с явным проявлением ионосферных эффектов не наблюдалось возрастание поглощения радиоволн в нижней ионосфере, что связано, по всей видимости, с неполным перекрытием солнечного диска.

Полученные данные согласуются с ионосферными эффектами, о которых сообщалось при аналогичных предыдущих солнечных затмениях (Белинская, Хомутов, 2010; Afraimovich et al., 2000). Международный коллектив учёных подтверждает, что в общем случае реакция ионосферы на тень Луны, проходящую через верхние слои атмосферы, проявляется в снижении ПЭС, увеличении минимальной высоты слоя F и фактической высоты отражения радиоволн различных частот, падении концентрации в максимуме F-слоя. Эти эффекты типичны для перехода в ночную ионосферу.

Несмотря на то что изменения ПЭС в данной работе не рассматривались, падение концентрации в слое F подтверждается снижением критической частоты. В то же время отмечается незначительное увеличение минимальной высоты отражения.

Для более детального анализа ионосферных эффектов, вызванных солнечным затмением, требуется привлечение дополнительного материала и результатов измерений других параметров околоземного космического пространства, выполненных в первую очередь средствами космического базирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках договора № 94С2/МОЛ/73887 от 25.03.2022.

## Литература

1. *Афраймович Э. Л., Воейков С. В., Едемский И. К.* Ионосферные эффекты полного солнечного затмения 22 июля 2009 г. по данным плотной сети GPS в Японии (GEONET) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 94–98.
2. *Белинская А. Ю.* Тренд ионосферы над Новосибирском в 23-м и 24-м солнечных циклах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 269–272. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-269-272.
3. *Белинская А. Ю., Хомутов С. Ю.* Результаты сравнительного анализа поведения ионосферы во время солнечных затмений в Новосибирске // Солнечно-земная физика. 2010. № 16(129). С. 9–13.
4. *Гивишвили Г. В., Крашенников И. В., Лещенко Л. Н., Власов Ю. М., Кузьмин А. В.* Ионозонд «Парус-А»: функциональные возможности и перспективы развития // Гелиогеофиз. исслед. 2013. № 4. С. 68–74.
5. *Горчаков С. Ю.* Синтез программных угловых движений космического аппарата дистанционного зондирования Земли с высоким пространственным разрешением // Российский технолог. журн. 2021. Т. 9. № 3(41). С. 78–87. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87.
6. *Данилов А. Д.* Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофиз. исслед. 2013. № 5. С. 1–33.
7. *Карелин А. В., Скрипачев В. О., Туманов М. В., Жуков А. О.* Методика формирования состава бортовой научной аппаратуры малых космических аппаратов для мониторинга радиоактивного загрязнения Земли // Тр. МАИ. 2018. № 103. С. 22.
8. *Литвинов С. В., Паньшин Е. А., Качановский Ю. М., Алексеева А. В.* Проведение работ по исследованию расширения функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» государственной сети Росгидромета // Гелиогеофиз. исслед. 2019. № 21. С. 32–39.
9. *Литвинов С. В., Глинкин И. А., Паньшин Е. А., Скрипачев В. О.* Результаты эксперимента по совмещённому (вертикальному и наклонному) зондированию ионосферы на ионозондах серии «Парус-А» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 309–319. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-309-319.
10. *Минлигареев В. Т.* Описание типа станций вертикального радиозондирования ионосферы наземных «Парус-А» // Гелиогеофиз. исслед. 2013. № 3. С. 71–76.
11. *Савиных В. П., Господинов С. Г., Кудж С. А. и др.* Семантика визуальных моделей в космических исследованиях // Russian Technological J. 2022. Т. 10. № 2(46). С. 51–58. DOI: 10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58.
12. *Черняков С. М.* Проявление атмосферных гравитационных волн в высокоширотной ионосфере во время солнечных затмений // Успехи современного естествознания. 2010. № 1. С. 36–39.
13. *Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. et al.* Ionospheric effects of the solar eclipse on March 9, 1997, as deduced from the GPS-radio interferometer at Irkutsk // Advances in Space Research. 2000. V. 26. Iss. 6. P. 997–1000. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(00\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(00)00045-4).
14. *Sileesh M. S.* Solar Eclipse and Ionosphere — Intensification in E layer // Current Science. 2019. V. 117. No. 10. P. 1557–1560. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117872.
15. *Tripathi G., Singh S. B., Kumar S. et al.* Effect of 21 June 2020 solar eclipse on the ionosphere using VLF and GPS observations and modeling // Advances in Space Research. 2022. V. 69. Iss. 1. P. 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.007>.
16. *Valdés-Abreu J. C., Díaz M. A., Bravo M. et al.* Ionospheric Behavior during the 10 June 2021 Annular Solar Eclipse and Its Impact on GNSS Precise Point Positioning // Remote Sensing. 2022. V. 14(13). Article 3119. <https://doi.org/10.3390/rs14133119>.

## Ionospheric effects of a partial solar eclipse of October 25, 2022, from Roshydromet ionospheric network data

S. V. Litvinov, V. O. Skripachev, S. N. Zamuruev

MIREA — Russian Technological University, Moscow 119454, Russia  
E-mail: litvinov\_s@mirea.ru

The work is devoted to the analysis of the data of vertical sounding of the ionosphere from the Parus-A ionosondes during the partial solar eclipse of October 25, 2022. The solar eclipse covered Western Siberia, Europe, the Middle East, Central Asia, the eastern Arctic Ocean, the northeast Atlantic Ocean, and the northwest Indian Ocean. Several stations of vertical sounding of Roshydromet ionospheric network are located in the area covered by the eclipse: Kaliningrad, Troitsk, Rostov-on-Don, Elektrougli, Salekhard and Novosibirsk. Data from these ionosondes show that the solar eclipse causes a reaction of the ionosphere, in particular, a decrease in the critical frequencies of the reflecting layers and a decrease in the total electron content. The paper presents changes in the critical frequencies  $f_oE$  and  $f_oF2$  and the minimum effective height of the F2 layer during the solar eclipse at some ionosondes caught in the shadow region. Interesting phenomena were found in the Siberian region, where the time of the solar eclipse coincided with the onset of twilight.

**Keywords:** ionosphere, vertical sounding, partial solar eclipse, ionospheric effects, ionospheric response

Accepted: 25.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-325-333

### References

1. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Edemskiy I. K., Ionosphere effects of total solar eclipse of July 22, 2009 as deduced from Japanese dense GPS network (GEONET) data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 94–98 (in Russian).
2. Belinskaya A. Yu., Trend in the ionospheric F2 region over Novosibirsk in 23<sup>rd</sup> and 24<sup>th</sup> solar cycles, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, Issue 2, pp. 269–272 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-269-272.
3. Belinskaya A. Yu., Khomutov S. Yu., Results of comparative analysis of ionospheric behaviour during Solar Eclipses in Novosibirsk, *Solar-terrestrial physics*, 2010, Vol. 16(129), pp. 9–13 (in Russian).
4. Givishvili G. V., Krashenninikov I. V., Leshchenko L. N., Vlasov Yu. M., Kuzmin A. V., Ionosonde “Parus-A”: features and prospects, *Heliogeophysical research*, 2013, No. 4, pp. 68–74 (in Russian).
5. Gorchakov S. Yu., Synthesis of program angular motions of the Earth remote sensing spacecraft with high spatial resolution, *Russian Technological J.*, 2021, Vol. 9, Issue 3, pp. 78–87 (in Russian), <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-3-78-87>.
6. Danilov A. D., Reaction of F region to geomagnetic disturbances, *Heliogeophysical research*, 2013, Vol. 5, pp. 1–33 (in Russian).
7. Karelin A. V., Skripachev V. O., Tumanov M. V., Zhukov A. O., Small spacecraft onboard scientific equipment configuration forming technique for the earth radioactive contamination monitoring, *Trudy MAI*, 2018, Vol. 103, p. 22 (in Russian).
8. Litvinov S. V., Panshin E. A., Kachanovskii Yu. M., Alekseeva A. V., Analysis of possible improvements of roshydromet’s government network ionozond “Parus-A”, *Heliogeophysical research*, 2019, Vol. 21, pp. 32–39 (in Russian).
9. Litvinov S. V., Glinkin I. A., Panshin E. A., Skripachev V. O., Results of the experiment on the combined (vertical and oblique) sounding of the ionosphere by Parus-A ionosondes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 309–319 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-309-319.
10. Minligareyev V. T., Description of vertical ionosphere radiosounding stations “Parus-A”, *Heliogeophysical research*, 2013, Vol. 3, pp. 71–76 (in Russian).
11. Savinykh V. P., Gospodinov S. G., Kudzh S. A. et al., Semantics of visual models in space research, *Russian Technological J.*, 2022, Vol. 10, Issue 2, pp. 51–58 (in Russian), <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-2-51-58>.

12. Cherniakov S. M., Manifestation of atmospheric gravity waves in the high-latitude ionosphere during solar eclipses, *Advances in Modern Natural Science*, 2010, Vol. 1, pp. 36–39 (in Russian).
13. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. et al., Ionospheric effects of the solar eclipse on March 9, 1997, as deduced from the GPS-radio interferometer at Irkutsk, *Advances in Space Research*, 2000, Vol. 26, Issue 6, pp. 997–1000, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(00\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(00)00045-4).
14. Sileesh M. S., Solar Eclipse and Ionosphere — Intensification in E layer, *Current Science*, 2019, Vol. 117, No. 10, pp. 1557–1560, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117872.
15. Tripathi G., Singh S. B., Kumar S. et al., Effect of 21 June 2020 solar eclipse on the ionosphere using VLF and GPS observations and modeling, *Advances in Space Research*, 2022, Vol. 69, Issue 1, pp. 254–265, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.007>.
16. Valdés-Abreu J. C., Díaz M. A., Bravo M. et al., Ionospheric Behavior during the 10 June 2021 Annular Solar Eclipse and Its Impact on GNSS Precise Point Positioning, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14(13), Article 3119, <https://doi.org/10.3390/rs14133119>.