



УДК 551.510.535

НЕПРЕРЫВНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТ НА ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ «ЭЛЕКТРОУГЛИ» В ПЕРИОД 2023–2024 Г.

И. В. Романов¹, К. Г. Цыбуля¹¹Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия

Представлены результаты регистрации доплеровского сдвига частот, полученные на ионосферной станции «Электроугли» в 2023–2024 г., в том числе во время геомагнитных событий в весенний сезон 2024 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДОПЛЕРОВСКИЙ СДВИГ ЧАСТОТЫ, ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ, ИОНОСФЕРА

EDN MFUVKN

1. ВВЕДЕНИЕ

Средством измерения скорости вертикального движения плазменных слоёв в ионосфере является коротковолновый (КВ) доплеровский комплекс, который использует метод измерений, основанный на регистрации и анализе отраженных от ионосферных слоев сигналов различных радиовещательных станций КВ диапазона.

С 2023 г. на ионосферной станции «Электроугли» проводятся совместные наблюдения основных параметров ионосферы, включая критические частоты и действующие высоты, а также доплеровского сдвига частот [Романов и др., 2021].

Доплеровские данные дополняют и обогатят информацию, получаемую от разнообразных средств ионосферного мониторинга [Денисова и др., 2022]. В статье продемонстрированы возможности доплеровского комплекса и рассматриваются варианты использования данных в различных целях.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Для регистрации информации о скоростях дрейфа плазменных слоёв ионосферы в спокойных геофизических условиях и во время прохождения ионосферных возмущений, а также исследований сигналов, рассеянных на ионосферных неоднородностях, применяется доплеровский комплекс коротковолнового диапазона (рис. 1). Работа комплекса основана на приёме диагностических сигналов радиовещательных станций, КВ маяков и, в первую очередь, станций точного времени КВ диапазона. Сам доплеровский метод исследования ионосферы основан на использовании явления смещения частоты диагностических сигналов, отражённых от движущихся ионосферных плазменных слоёв и ионосферных неоднородностей. При этом особые требования накладываются на стабильность частоты как источников диагностических сигналов, так и опорных генераторов аппаратуры комплекса.

Электронная почта авторов для переписки:

Романов Илья Владимирович, e-mail: romanov@ipg.geospace.ru
Цыбуля Константин Григорьевич, e-mail: kgc@ipg.geospace.ru



Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Комплекс установлен на территории ионосферной станции «Электроугли». Он позволяет проводить длительную непрерывную регистрацию четырёх коротковолновых радиосигналов одновременно. Также возможна работа в режиме восстановления углов прихода отраженного от ионосферы сигнала на одной выбранной частоте с использованием четырёх разнесённых в пространстве антенн.



Рис. 1. Внешний вид доплеровского комплекса, размещённого на полевой экспериментальной базе «Электроугли»

В состав комплекса входят: рубидиевый стандарт частоты, промышленный компьютер, прецизионный генератор, двухканальный генератор, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), четыре КВ приёмника, накопитель на жестких дисках, источник бесперебойного питания и четырёхканальный смеситель сигналов.

В июне 2023 г. начата регулярная регистрация доплеровского сдвига частот диагностических сигналов. Одновременно проводятся сеансы вертикального радиозондирования ионосферы с периодом 3 минуты на экспериментальном ионозонде «Меридиан», также установленном на ионосферной станции «Электроугли». Такие совместные измерения обеспечивают реализацию комплексного подхода к наблюдению параметров ионосферы.

В качестве источника диагностических сигналов используется КВ радиопередатчик с позывным RWM, расположенный на территории Радиоцентра № 3 (Талдом, Московская область), находящийся на расстоянии 115 км от места приёма (рис. 2). С точки зрения приемной антенны доплеровского комплекса радиопередатчик находится за горизонтом и прямой сигнал отсутствует, однако отраженные от ионосферных слоев радиоволны хорошо принимаются. Поскольку разнесение передатчика и приёмника является небольшим по сравнению с типичной высотой ионосферного слоя F, распространение отражаемых радиоволн можно считать квазивертикальным.

Радиопередатчик RWM представляет собой источник эталонного сигнала времени, синхронизированным с Главным метрологическим центром Государственной службы времени и частоты. Сигнал передается на трех частотах: 4996 кГц, 9996 кГц, 14 996 кГц. Мощности передатчиков составляют соответственно 5 кВт, 8 кВт и 8 кВт. Близкое расположение передатчика и относительно большая мощность передатчика позволяет регистрировать

диагностические сигналы не только ниже критической частоты, но и выше, по крайней мере в некоторых случаях, благодаря эффекту рассеяния мощности на ионосферных неоднородностях.

Каждые полчаса по шкале времени UTC станция RWM передает немодулированную несущую в течение 8 минут, затем передатчик отключается на одну минуту, и затем, в течение также одной минуты, передаются сигналы опознавания станции в коде Морзе как модуляция несущей. Затем следуют последовательности сигналов, содержащих метки точного времени. Между 10-й и 20-й минутами после начала получаса RWM передаёт радиоимпульсы каждую секунду, удвоенные импульсы обозначают разность между астрономическим (UT1) и атомным координированным (UTC) временем: каждый удвоенный импульс в первой трети минуты обозначает 0,1 с (DUT), во второй – 0,02 с (dUT). Если серии удвоенных импульсов начинаются с 1-й и 21-й секунды, то они обозначают положительную разность, в противном случае отрицательную. Между 20-й и 30-й минутами после начала часа RWM передаёт 10 радиоимпульсов в секунду, синхронизированных по эталону. Цикл и структура передающего сигнала регламентированы ГОСТ 8.323-2016 и повторяются каждые полчаса.

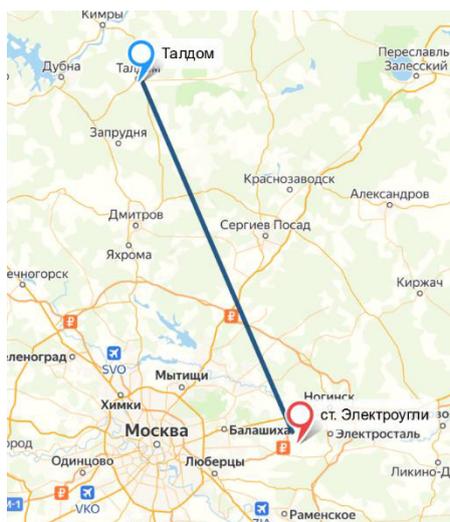


Рис. 2. Расположение передатчика диагностических сигналов (г. Талдом, Московская область) и доплеровского комплекса (ст. Электроугли, Московская область)

Для доплеровских ионосферных измерений наиболее пригодна немодулированная несущая. Отклонения частоты отраженного от ионосферы сигнала от величины 4996 кГц, регистрируемые на основе рублидиевого стандарта, записывались в файлы на жестком диске. АЦП, входящий в комплекс, производил захват мощности приходящего сигнала 80 раз в секунду. Регистрация на частотах 9996 кГц и 14 996 кГц также проводилась, но оказалась значительно менее полезной, т. к. в большинстве случаев эти частоты превышают значения критической частоты отражения от слоя F2 (f_oF2) и, следовательно, отраженный сигнал очень слаб.

3. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Принятый сигнал подвергался обработке программой, написанной для приложения MATLAB. Основой этой программы является быстрое преобразование Фурье. Окно, для которого проводилось преобразование, должно было быть достаточно длинным, чтобы обнаружить отклонения в доли герца. Было выбрано окно, содержащее 1024 точки измерений, что при частоте регистрации 80 Гц соответствует 12.8 с времени и

обеспечивает чувствительность по частоте доплеровского сдвига около 0.08 Гц, т. е., вертикальной скорости движения слоя 2.4 м/с. Напомним, что перевод сдвига частоты в скорость движения отражающего объекта производится по формуле [Сиверс и др., 1959]:

$$v = \frac{c\Delta f}{2f_0}, \quad (1)$$

где v – скорость движения отражающего слоя, c – скорость света в вакууме, Δf – доплеровское смещение частоты, f_0 – частота несущей. Почти всегда доплеровский сдвиг частоты укладывается в пределы ± 2 Гц, что соответствует вертикальным скоростям ± 60 м/с.

Наблюдения производились в течение пяти почти непрерывных сеансов: 4 июля – 9 августа 2023 г., 1 сентября – 13 октября 2023 г., 7 ноября – 15 ноября 2023 г., 18 декабря 2023 г. – 14 февраля 2024 г., 25 февраля – 11 июня 2024 г. В настоящее время измерения продолжаются.

Качество данных сильно зависит от времени суток. Как видно из рисунка 3, в ночные часы, когда критическая частота наиболее плотного слоя ионосферы падает ниже частоты сигнала (~ 5 МГц), интенсивность отраженной волны значительно уменьшается и определение доплеровского сдвига становится ненадежным.

На рисунке 4 изображен характерный суточный ход доплеровского сдвига. После рассвета, когда критическая частота превышает 5 МГц наблюдается слабое восходящее движение слоя, которое сменяется нисходящим ближе к вечеру. Характерные скорости движения составляют 4–8 м/с. Суточный ход такого типа сохранялся в течение всего года. Сезонная зависимость является слабо выраженной, можно только сказать, что в периоды солнцестояний скорости дрейфа несколько выше. Такое поведение, однако, отличается от указанному в статье [Kouba and Knížová, 2016], где описывается эксперимент с регистрацией доплеровского сдвига на установке Дигизонд (DPS-4) на ионосферной станции Пругонице. Хотя широты Москвы (56°) и Пругонице (50°) близки, Дигизонд регистрировал намного большие скорости дрейфа (10–20 м/с и даже 40 м/с), и направление дрейфа так же не совпадало. В утренние часы наблюдалось нисходящее, а в верхнее – восходящее движение. Скорость дрейфа в ночные часы сравнить не удастся, т. к. доплеровский комплекс не получает отраженный сигнал, если критическая частота падает ниже 5 МГц. Ночные пики на рисунке 4 кажутся ярко выраженными и показывают повторяющееся поведение, но сигнал в это время имеет низкую интенсивность и сильно зашумлен. Так же наблюдаются расхождения с поведением ионосферных слоев на станции Никосия, описанным в статьях [Tiju et al., 2017; Varghese et al., 2022].

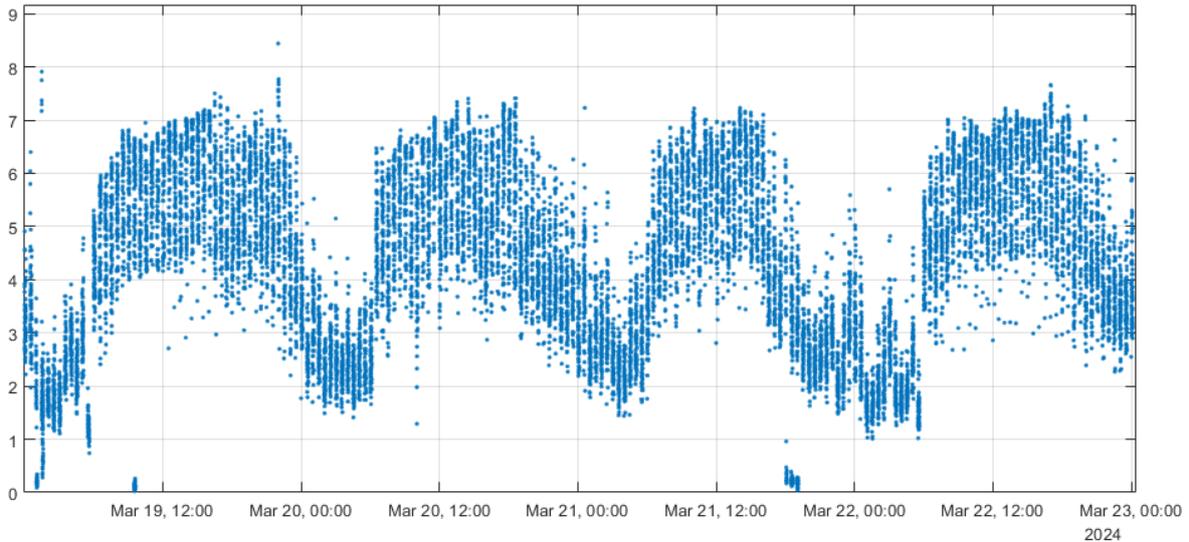


Рис. 3. Интенсивность отраженного радиосигнала передатчика RWM, принятого на станции «Электроугли», в период 19–23 марта 2024 г. Единицы интенсивности условные, пропорциональны амплитуде радиоволны. Время местное солнечное (LT)

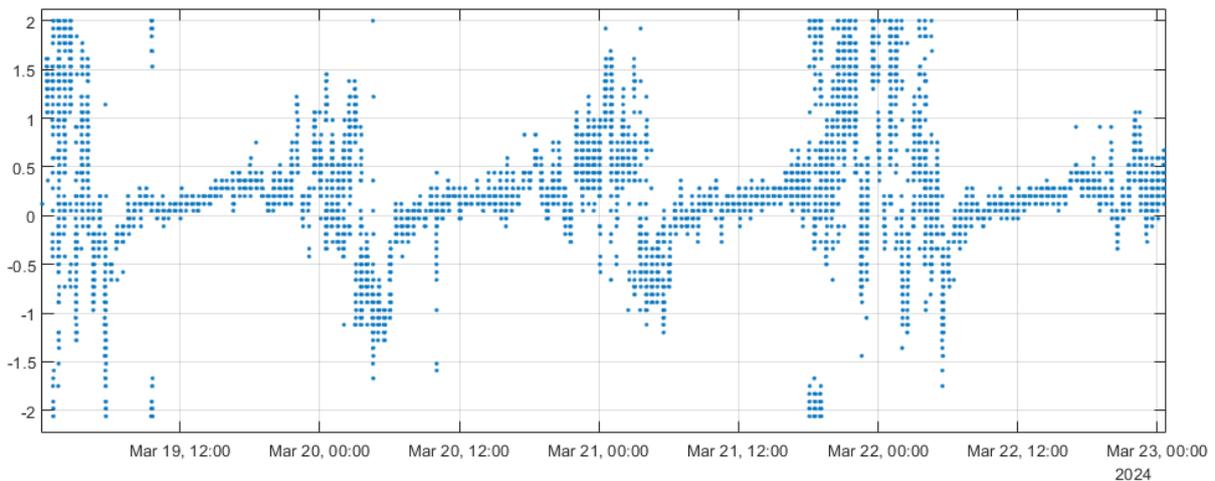


Рис. 4. Доплеровский сдвиг отраженного сигнала в период 19–22 марта 2024 г. Величина сдвига отложена по вертикальной оси в Гц. Время местное солнечное (LT)

Наиболее полную информацию о доплеровских сдвигах в отраженном от ионосферы сигнале можно получить по диаграммам интенсивности спектральной плотности, полученным в результате применения быстрого преобразования Фурье к отраженному сигналу. Таким образом, например, можно выявить прохождение волновых ионосферных возмущений с периодом несколько минут. На рисунке 5 показано такое возмущение, возникшее после геомагнитной бури 5 августа 2023 г., когда индекс K_p достигал значений 6–7. В это же время проводилось радиозондирование ионосферы, на ионограмме (рис. 6) заметны хорошо выраженные детали («крючки»), возникающие во время прохождения перемещающихся ионосферных возмущений, когда форма слоев отклоняется от плоской.

В некоторых случаях на доплеровских спектрограммах выявляются и более сложные детали, например, два отражающих слоя, перемещающиеся вверх и вниз с разной скоростью (рис. 7). Такие состояния во время ионосферных бурь в литературе объясняются либо проникновением электрического поля и вызванным этим дрейфом плазмы, либо перемещающимися ионосферными возмущениями, являющимися следствием внутренних гравитационных волн в нейтральной атмосфере [Varghese et al., 2024; Zbysek et al., 2020].

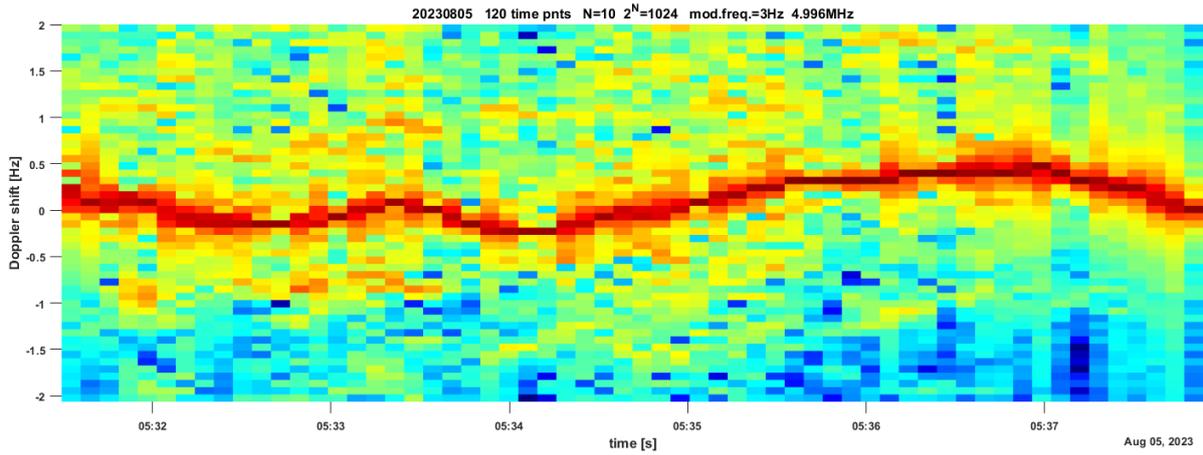


Рис. 5. Диаграмма доплеровских спектров за 5 августа 2023 г. от 05:31 UT до 05:38 UT. По горизонтали отложено всемирное время, по вертикали – частота доплеровского сдвига в Гц. Спектральная плотность отраженного от ионосферы сигнала на данной частоте выражена цветом, наибольшая интенсивность – темно-красный цвет

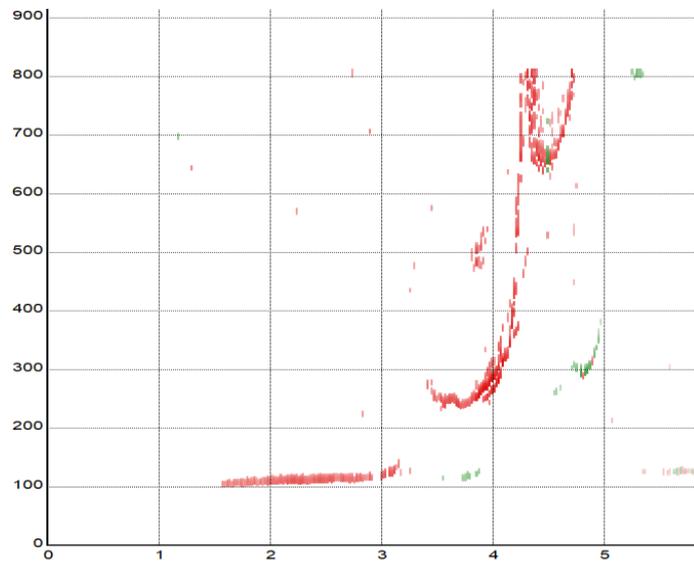


Рис. 6. Ионограмма с «крючком», возникшим из-за изогнутой формы ионосферного слоя при прохождении возмущения 5 августа 2023 г. в 06:00 UT

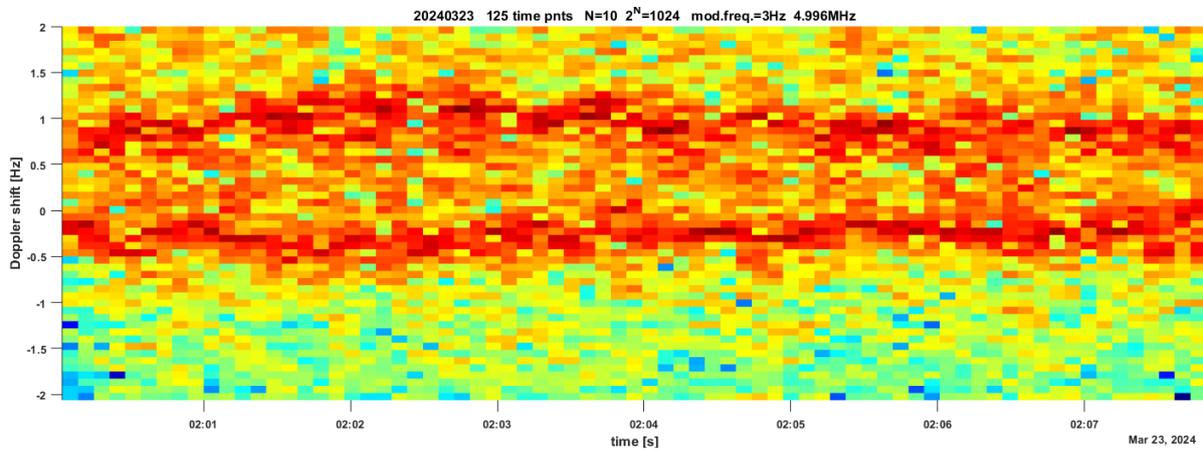


Рис. 7. Аналогично рис. 5, 23 марта 2024 г., 02:00 UT–02:08 UT

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доплеровский комплекс на станции «Электроугли» предоставляет новый тип геофизической информации для системного мониторинга ионосферы Институтом прикладной геофизики. Данные представляют интерес также и с научной точки зрения. Установка требует дополнительной проверки, в том числе желательна сверка с доплеровскими данными Дигизонда, установленным в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн в Троицке. В будущем можно будет пересмотреть режимы, в которых производится регистрация данных и использовать как источники сигнала другие радиостанции. Использование более отдаленных станций даст возможность частично перекрыть ночное окно, в котором отсутствуют надежные измерения. Учитывая, что к методу доплеровских измерений проявляется интерес во многих российских и зарубежных институтах, полученная информация окажется весьма полезной.

ЛИТЕРАТУРА

- Денисова В. И., Журавлев С. В., Котонаева Н. Г., Романов И. В., Цыбуля К. Г. Развитие Государственной системы мониторинга ионосферы в интересах обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации геофизической информацией // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2022. № S685. С. 100-107. EDN FIKLBM.
- Романов И. В., Данилкин Н. П., Журавлев С. В., Котонаева Н. Г. Наблюдение возмущений F-области на ионосферной станции г. Электроугли // Распространение радиоволн: Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции, Калининград, 28 июня – 03 июля 2021 года. Калининград: Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2021. С. 427-432. EDN XTDCCKD.
- Сиверс А. П., Суслов Н. А., Метельский В. И. Основы радиолокации., Л: «Судпромгиз». 1959. – 352с.
- Kouba D., Knížová P. K., Ionospheric vertical drift response at a mid-latitude station, *Advances in Space Research*. V. 58. P. 108-116. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.04.018>.
- Tiju J. M., Haralambous H., Oikonomou C. Pre-sunrise uplift and sunrise downward excursion in the F-region vertical plasma drift: Observations from the mid-latitude station Nicosia. *Advances in Space Research*. V. 59. P. 1792-1799. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.015>.
- Varghese B., Thomas V., Abraham A. Response of equatorial ionosphere to the September 2017 geomagnetic storm: a case study using digisonde observations at Fortaleza. *Indian Journal of Physics*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s12648-024-03217-0>.
- Varghese B., Haralambous H., Oikonomou C., Cherian L., Abraham A., Ankitha N., Varghese A. A., Vijayan G. S., Tiju J. M., Characteristics of F-region velocity vortex during sunrise: Observations from the Mid-Latitude Station Nicosia, *Advances in Space Research*. V. 69. P. 4123-4128. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.007>.
- Zbysek M., Kouba D., Knizova P. K., Buresova D., Chum J., Sindelarova T., Urbar J., Boska J., Saxonbergova-Jankovicova D., Ionospheric storm of September 2017 observed at ionospheric station Pruhonice, the Czech Republic, *Advances in Space Research*. V. 65. P. 115-128. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.024>.

CONTINUOUS OBSERVATIONS OF THE DOPPLER FREQUENCY SHIFT ON IONOSPHERIC STATION ELECTROUGLI IN 2023–2024

Romanov I. V., Tsybulya K. G.

A short-wave Doppler complex was set up in the Elektrougli ionospheric station facilities in year 2023. It is used to observe the ionospheric plasma layers drift velocities in quiet geophysical conditions as well as during passage of ionospheric disturbances, and to study signals scattered by ionospheric irregularities. The operation of the complex is based on receiving diagnostic signals from radio broadcasting stations, HF beacons and, first of all, time signal radio stations in the HF range. The article describes the results of the first operational year.

KEYWORDS: DOPPLER FREQUENCY SHIFT, GEOMAGNETIC STORM, IONOSPHEREX