

Форматы и интернет-ресурсы результатов обработки ионограмм вертикального радиозондирования и перспективы их использования для машинного обучения

А.О. Щирый¹²

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, Москва*

² *Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва*

Аннотация. Высказана идея использования имеющихся больших массивов результатов обработки ионограмм вертикального радиозондирования ионосферы в качестве обучающих датасетов для построения предиктивных моделей методами машинного обучения. Рассмотрены наиболее популярные форматы сохранения результатов обработки ионограмм, а также некоторые интернет-ресурсы с архивами свободно доступных файлов этих форматов. Указанные датасеты используются нами для построения предиктивных моделей, в т.ч. временных рядов критических частот ионосферных слоев.

Ключевые слова: ионосфера, радиозондирование, вертикальное зондирование ионосферы, ионограмма

Formats and free resources of ionogram scaling results and their use for machine learning

A.O. Schiriy¹²

¹ *Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAN named N.V. Pushkov, Moscow*

² *National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow*

Abstract. The idea of using the available large arrays of ionogram processing results from vertical radiosounding of the ionosphere as training datasets for building predictive models using machine learning methods is expressed. The most popular formats for saving the results of ionogram processing are

considered, as well as some Internet resources with archives of freely available files of these formats. We use these datasets to build predictive models, for example time series of critical frequencies of ionospheric layers.

Keywords: ionosphere, radiosounding, vertical sounding of the ionosphere, ionogram

Введение

Исследования ионосферы необходимы как для целей фундаментальной науки (построение и уточнение моделей геофизических процессов), так и для прикладных целей [1-9]. По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами (КВ) можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, о ее структуре и состоянии. Эти данные также крайне важны для систем КВ радиосвязи, радиолокации и радионавигации, для компенсации искажений, вносимых ионосферной средой распространения КВ. В частности, работа таких радиотехнических систем (РТС) КВ диапазона, как системы дальней КВ радиосвязи и загоризонтной радиолокации, основана на способности КВ многократно отражаться от ионосферы и земной поверхности. Важнейшей задачей для обеспечения корректного функционирования таких РТС является адаптация к ионосферным условиям. При этом возможна адаптация РТС КВ диапазона по рабочей частоте, мощности излучения, скорости передачи информации. Перспективные методы адаптации предполагают даже измерение и компенсацию передаточной функции КВ радиолинии [9]. Информация об ионосферных процессах важна также и для корректного функционирования систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС), хотя эти системы работают не в КВ диапазоне, а ионосфера является для них поглощающей средой.

Для адаптации к ионосферным условиям необходимо производить оперативную диагностику ионосферы. Из методов такой диагностики наибольший интерес представляют вертикальное, наклонное, и возвратно-наклонное радиозондирование ионосферы, соответственно ВЗИ, НЗИ, ВНЗИ [1-6]. Далее здесь будет рассматриваться работа с данными ВЗИ.

Ионограмма ВЗИ представляет собой зависимость амплитуды радиосигнала от частоты и высоты отражения; пример ионограммы ВЗИ приведен на рис.1, также поверх ионограммы построен восстановленный по ней модельный профиль электронной концентрации. На рис.2. представлен другой пример ионограммы ВЗИ, где кроме профиля электронной концентрации «поверх» ионограммы прорисованы автоматически выделенные и идентифицированные моды КВ радиосигнала (с отражениями от слоев E, F1, F2, а также F2-«необыкновенная» мода X).

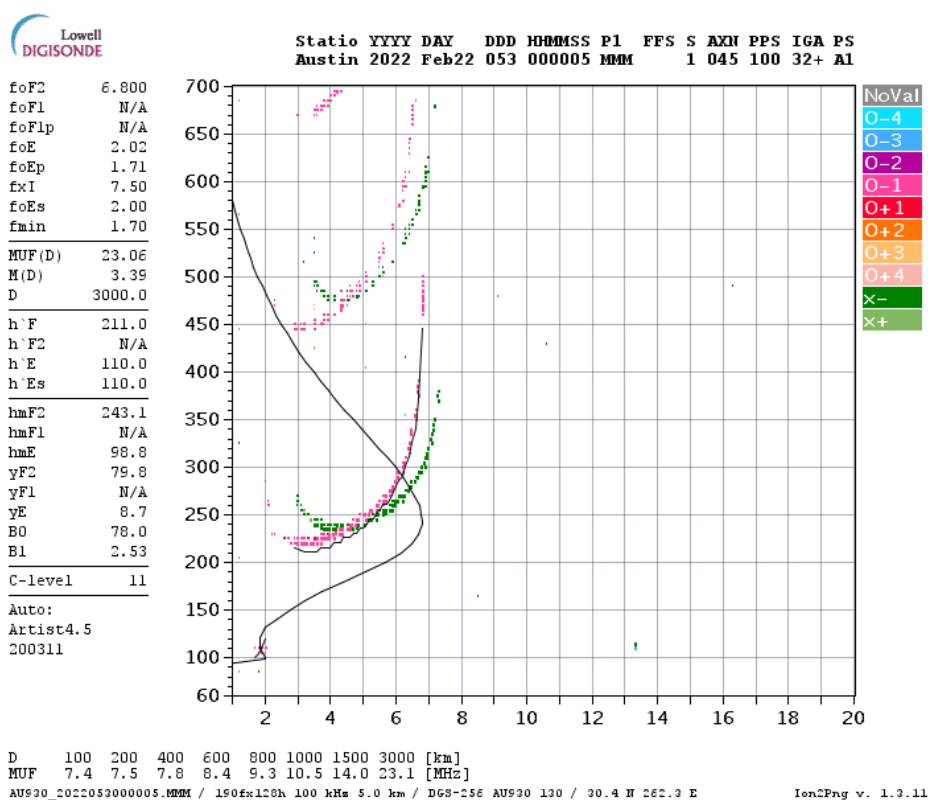


Рис. 1. Пример ВЗИ-ионограммы «дигизонда» DPS в формате картинки

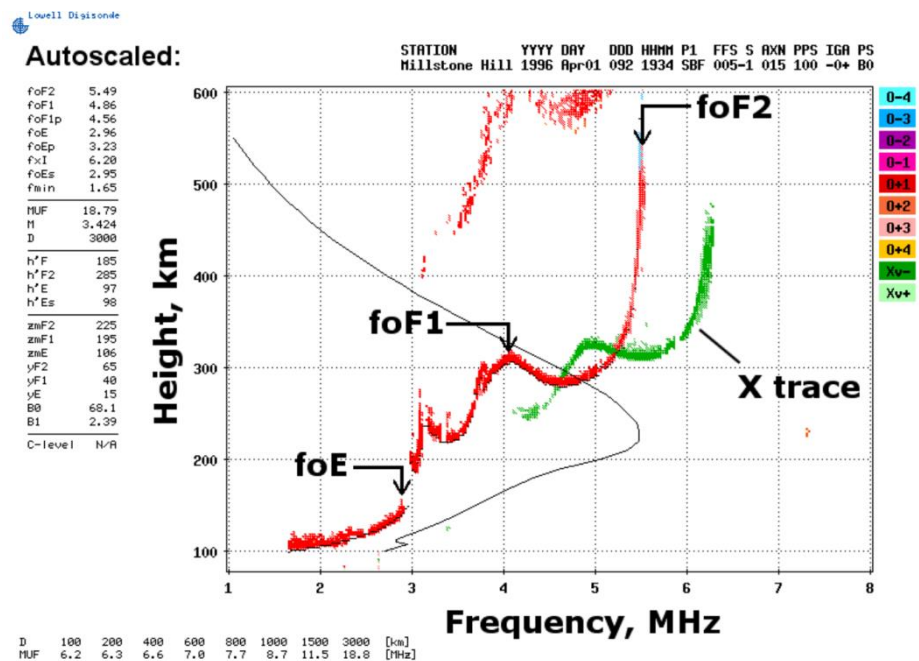


Рис. 2. ВЗИ-ионограмма «дигизонда» DPS с указанием названий мод

Обработка данных ВЗИ (желательно автоматическая) включает в себя выделение треков мод на ионограмме, определение критических частот ионосферных слоев, восстановление профилей электронной концентрации.

1. Мотивация

Развитие машинного обучения (МО) открывает новые возможности для автоматизированной обработки и анализа ионограмм. Интерес к большим массивам данных радиозондирования ионосферы обусловлен, кроме прочего, возможностью «тренировки» статистических моделей методами МО, тем более если наряду с сырыми данными имеются и обработанные – выделенные треки мод радиосигнала, критические частоты ионосферных слоёв, и др. (в терминах машинного обучения – размеченные датасеты или наборы данных). Напомним, что для построения моделей методами МО (класса «обучение с учителем») требуются размеченные датасеты, т.е. наборы данных вида «анализируемые данные»–«результаты анализа».

Модели МО могут оказаться полезны как для автоматической обработки ионограмм (прежде всего для задачи выделения треков), так и для построения предиктивных моделей состояния ионосферы.

Конечно, предпринимаются попытки [10-15] применения методов МО, а конкретно – нейронных сетей, для решения задач обработки ионограмм ВЗИ (прежде всего задачи выделения треков на ионограммах). Однако в отличие от подхода предлагаемой в данной работы, в указанных работах ионограммы размечаются «вручную» в ходе самого исследования, поэтому обучающие датасеты сравнительно малы (тысячи ионограмм).

2. Форматы хранения результатов обработки ионограмм

Наиболее популярными форматами сохранения результатов обработки ионограмм являются форматы SAO [16-17] и SAOXML [18-19]. Подчеркнем, что они не предназначены для хранения самих ионограмм, но предназначены для хранения результатов обработки ионограмм (выделенные треки мод распространения КВ радиосигнала, идентифицированные ионосферные слои и их высоты, восстановленные профили электронной концентрации, критические частоты слоев, плазменные частоты, доплеровские сдвиги и др.). Хотя форматы SAO и SAOXML были разработаны создателями «дигизондов» – ионозондов ВЗИ типа DPS [21], тем не менее, широко используются для указанных целей не только с «дигизондами», но и с ионозондами других типов.

Форматы SAO и SAOXML являются текстовыми, причем SAOXML (как можно догадаться по названию) основан на XML. Логическая модель SAOXML [19] показана на Рис.3.

Известные автору попытки работы с данными форматов SAO и SAOXML, как правило, не идут дальше создания программ просмотра данных (см. например [20]).

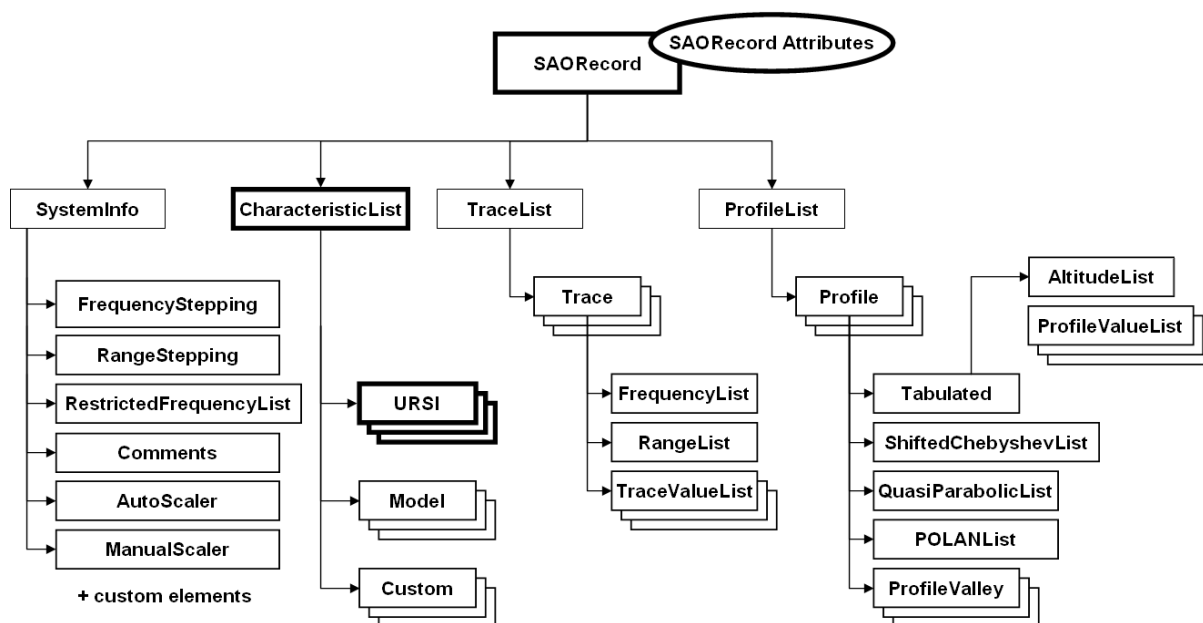


Рис. 3. Логическая модель SAOXML [19]

Кроме указанных форматов сохранения результатов обработки ионограмм ВЗИ, разумеется, существуют и другие, например форматы австралийских ионозондов IPS [23].

3. Ресурсы архивов ионограмм и результатов обработки

В работе [21] нами рассматривались Интернет-ресурсы со свободным доступом к данным вертикального радиозондирования ионосферы, в том числе Национальный центр геофизических данных США [22] и Служба космической погоды Бюро метеорологии Австралии [23], и некоторые другие. Однако в данной работе особое внимание обращаем на ресурсы [22-23], поскольку они содержат десятки миллионов файлов ионограмм и результатов обработки ионограмм. Наиболее популярные форматы данных самих ионограмм рассмотрены нами ранее в [21], и наиболее актуальны «дигизондовские» форматы ионограмм MMM, SBF, RSF, а также форматы ионограмм австралийских ионозондов IPS. Подробный разбор форматов австралийских ионозондов является задачей дальнейших работ.

Заключение

Итак, в работе высказана идея использования имеющихся больших массивов результатов обработки ионограмм ВЗИ в качестве обучающих датасетов для построения моделей методами МО. Рассмотрены наиболее популярные форматы сохранения результатов обработки ионограмм, а также некоторые интернет-ресурсы с архивами таких файлов. Указанные датасеты используются нами для построения предиктивных моделей, в т.ч. временных рядов критических частот ионосферных слоев.

Литература

1. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами / Под ред. С. И. Авдюшина. Труды института прикладной геофизики им. академика Е. К. Фёдорова. — М.: ИПГ, 2008. — URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf>
2. B. Reinisch, G. Sales. Measuring Electrodynamics of the Ionosphere by Digital Ionosondes and Other Techniques. Scientific Report No. 3. 2001. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA402979.pdf> (дата обращения 07.05.2025)
3. Акимов В.Ф., Калинин Ю.К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С.Ф. Боева. — М.: Техносфера, 2017. — 492 с.
4. Giuseppe Fabrizio. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education, 2013.
5. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. — СПб., 2007. — 19 с. — EDN: QMISDO
6. Щирый А.О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2014. №5. — с.170-173.
7. Щирый А.О. Архитектура программной части аппаратно-программного комплекса дистанционного наземного радиозондирования ионосферы // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. — 2015. №18. — с.144-152.
8. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолний // Журнал радиоэлектроники. — 2022. №10. — <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
9. A.O. Shiry. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices En-gineering, APEDE 2002. 5. 2002. pp.365-369. <https://doi.org/10.1109/apede.2002.10449645>.
10. Долгачева С. А., Макарова Л. Н., Николаев А. В. Обработка ионограмм высокоширотных станций вертикально-го зондирования с использованием нейронных сетей: Es и F2 слои // Physics of Auroral Phenomena. 2020. Т.43. № 1. — С. 105-108.
11. Guo L., Xiong J. Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling // Radio Science. 2023. vol.58. №3. p.e2022RS007566. <https://doi.org/10.1029/2022RS007566>

12. Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W. Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics. 2022. vol.37. №5. pp.1834-1839. doi: 10.6038/pg2022GG0073
13. Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L. Deep-learning for ionogram automatic scaling // Advances in Space Research. 2020. vol.66. №4. pp.942-950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009>
14. De la Jara C., Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks // Radio Science. 2021. vol.56. №8. pp.1-15.
15. Щирий А.О. Использование нейронных сетей для дальнейшего развития программной части аппаратно-программных комплексов радиозондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024, Том 29, №5. – с.55-60. – <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-08>
16. Standard Archiving Output (SAO) Format. 2006. URL: <https://ulcar.uml.edu/~iag/SAO-4.3.htm>
17. Gamache R.R., Galkin I.A. and Reinisch B.W. A Database Record Structure for Ionogram Data. University of Lowell Center for Atmospheric Research, UMLCAR 96-01, 1996.
18. Reinisch, B. W., and I. A. Galkin (2008), SAO.XML format specification v 5.0, Univ. of Mass. Lowell, Lowell. (Available at <http://ulcar.uml.edu/SAOXML>)
19. I.A. Galkin, G.M. Khmyrov, B.W. Reinisch, J. McElroy. The SAOXML 5: New Format for Ionogram-Derived Data. Radio Sounding and Plasma Physics. AIP Conf. Proc., 974, 160-166 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2885025>
20. Жбанков Г. А., Анишин М. М., Телегин В. А. Программный комплекс «Viewer_DPS4» – инструмент обработки и анализа данных ионозонда DPS-4 // Техника радиосвязи. – 2022. Выпуск 2 (53). – С.53-65. – URL: https://oniip.ru/upload/iblock/533/5Жбанков_Анишин_Телегин.pdf
21. Щирий А.О., Писаренко А.А. Интернет-ресурсы со свободным доступом к данным вертикального радиозондирования ионосферы – перспективы и проблемы их использования // Научный сервис в сети Интернет: труды XXV Всероссийской научной конференции (18-21 сентября 2023 г., онлайн). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2023. — С. 378-384. — <https://doi.org/10.20948/abrau-2023-18>
22. USA National Geophysical Data Center (NGDC) Data Services. — URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/>
23. Australian Government – Bureau of Meteorology, Space Weather Services. Ionospheric data archive. — URL: https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/wdc_ion_archive/

References

1. Radiozondirovanie ionosfery sputnikovymi i nazemnymi ionozondami / Pod red. S. I. Avdyushina. Trudy instituta prikladnoj geofiziki im. akademika E.K.Fyodorova — M.: IPG, 2008. — URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf>
2. B. Reinisch, G. Sales. Measuring Electrodynamics of the Ionosphere by Digital Ionosondes and Other Techniques. Scientific Report No. 3. 2001. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA402979.pdf>
3. Akimov V.F., Kalinin Ju.K. Vvedenie v proektirovanie ionosfernyh zagorizontnyh radiolokatorov / pod red. S.F. Boeva. — M.: Tehnosfera, 2017. — 492 p.
4. Giuseppe Fabrizio. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education, 2013.
5. Schiriy A.O. Razrabotka i modelirovanie algoritmov avtomaticheskogo izmereniya harakteristik ionosfernyh korotkovolnovykh radiolinij: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: Spec. 05.12.04; Sankt-Peterburgskij gos. un-t telekommunikacij im. prof. M.A. Bonch-Bruевичa. — SPb., 2007. — 19 p.
6. Schiriy A.O. Razvitie sredstv avtomatizacii nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya. — 2014. №5. — p.170-173.
7. Schiriy A.O. Arhitektura programmnoj chasti apparatno-programmnogo kompleksa distancionnogo nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery // Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannyh sistemah. — 2015. №18. — p.144-152.
8. Schiriy A.O. Algoritmy i programmnoe obespechenie avtomatizacii processov izmerenij i obrabotki dannyh operativnoj diagnostiki ionosfery i ionosfernyh radiolinij // Zhurnal radioelektroniki. — 2022. №10. — <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
9. A.O. Shiriy. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 5. 2002. pp.365-369. <https://doi.org/10.1109/apede.2002.10449645>.
10. Dolgacheva S. A., Makarova L. N., Nikolaev A. V. Obrabotka ionogramm vysokoshtirotnykh stancij vertikal'no-go zondirovaniya s ispol'zovaniem nejronnyh setej: Es i F2 sloi // Physics of Auroral Phenomena. 2020. T.43. № 1. — pp. 105-108.
11. Guo L., Xiong J. Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling // Radio Science. 2023. vol.58. №3. p.e2022RS007566. <https://doi.org/10.1029/2022RS007566>
12. Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W. Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics. 2022. vol.37. №5. pp.1834-1839. doi: 10.6038/pg2022GG0073

13. Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L. Deep-learning for ionogram automatic scaling // *Advances in Space Research*. 2020. vol.66. №4. pp.942-950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009>
14. De la Jara C., Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks // *Radio Science*. 2021. vol.56. №8. pp.1-15.
15. Schiriy A.O. Ispol'zovanie nejronnyh setej dlja dal'nejshego razvitija programmnoj chasti apparatno-programmnyh kompleksov radiozondirovanija ionosfery // *Jelektromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*. – 2024, Tom 29, №5. – pp.55-60. – <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-08>
16. Standard Archiving Output (SAO) Format. 2006. URL: <https://ulcar.uml.edu/~iag/SAO-4.3.htm>
17. Gamache R.R., Galkin I.A. and Reinisch B.W. A Database Record Structure for Ionogram Data. University of Lowell Center for Atmospheric Research, UMLCAR 96-01, 1996.
18. Reinisch, B. W., and I. A. Galkin (2008), SAO.XML format specification v 5.0, Univ. of Mass. Lowell, Lowell. (Available at <http://ulcar.uml.edu/SAOXML>)
19. I.A. Galkin, G.M . Khmyrov, B.W. Reinisch, J. McElroy. The SAOXML 5: New Format for Ionogram-Derived Data. *Radio Sounding and Plasma Physics. AIP Conf. Proc.*, 974, 160-166 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2885025>
20. Zhbankov G. A., Anishin M. M., Telegin V. A. Programmnyj kompleks «Viewer_DPS4» – instrument obrabotki i analiza dannyh ionozonda DPS-4 // *Tehnika radiosvjazi*. – 2022. Vypusk 2 (53). – pp.53-65. – URL: <https://oniip.ru/upload/iblock/533/5Жбанков Анишин Телегин.pdf>
21. Schiriy A.O., Pisarenko A.A. Internet-resursy so svobodnym dostupom k dannym vertikal'nogo radiozondirovanija ionosfery – perspektivy i problemy ih ispol'zovanija // *Nauchnyj servis v seti Internet: trudy XXV Vserossijskoj nauchnoj konferencii (18-21 sentjabrja 2023 g., onlajn)*. — M.: IPM im. M.V.Keldysha, 2023. — pp. 378-384. — <https://doi.org/10.20948/abrau-2023-18>
22. USA National Geophysical Data Center (NGDC) Data Services. — URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/>
23. Australian Government – Bureau of Meteorology, Space Weather Services. Ionospheric data archive. — URL: https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/wdc_ion_archive/