

ОБЩЕДОСТУПНЫЕ АРХИВЫ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ КОРОТКОВОЛНОВЫМИ СИГНАЛАМИ

А. О. Щирый¹ [0000-0001-7312-4424], А. А. Писаренко² [0000-0001-7312-4424]

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

²Московский индустриальный колледж, Москва;

¹andreyschiriy@gmail.com, ²pisarenko.alina.04@bk.ru

Аннотация

По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, ее структуре и состоянии; эти данные также крайне важны для радиотехнических систем, работающих в коротковолновом диапазоне. К настоящему моменту накоплен большой объем экспериментальных данных для различных гео- и гелиофизических, пространственных и временных условий. Интерес к большим массивам данных радиозондирования ионосферы мотивирован также возможностью построения статистических моделей методами машинного обучения. В работе представлены некоторые интернет-ресурсы с данными радиозондирования ионосферы, показаны перспективы их применения, а также обозначены некоторые проблемы, такие как недостаточная документированность части форматов данных и представление ионограмм только в виде растровых изображений, существенная часть из которых к тому же отсканирована с фотопленок.

Ключевые слова: ионосфера, распространение радиоволн, радиозондирование, вертикальное зондирование ионосферы, ионограмма, обработка ионограмм

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ионосферы необходимы как для целей фундаментальной науки (построение и уточнение моделей геофизических процессов), так и для при-

кладных целей [1–5]. По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами (КВ) можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, 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 [5]. Информация об ионосферных процессах важна также для корректного функционирования систем глобального позиционирования (GPS, ГЛОНАСС), хотя эти системы работают не в КВ диапазоне, а ионосфера является для них поглощающей средой.

Вообще, методы исследования и диагностики ионосферы делятся на дистанционные и контактные. Кроме того, радиозондирование можно осуществлять как с Земли (передатчики и приемники – на Земле), так и со спутников (передатчики и приемники – на спутниках), возможны и смешанные схемы, существует также трансionoсферное спутниковое зондирование [1]. В данной работе рассматриваются данные только дистанционного наземного радиозондирования, и только КВ радиосигналами. Из методов наземного радиозондирования наибольший интерес представляют вертикальное, наклонное, и в несколько меньшей степени возвратно-наклонное зондирование ионосферы, соответственно ВЗИ, НЗИ, ВНЗИ [1–5]. Здесь рассматриваются интернет-ресурсы со свободным доступом преимущественно к данным ВЗИ, однако на указанных ресурсах имеется некоторое количество данных НЗИ (практически в тех же форматах).

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.

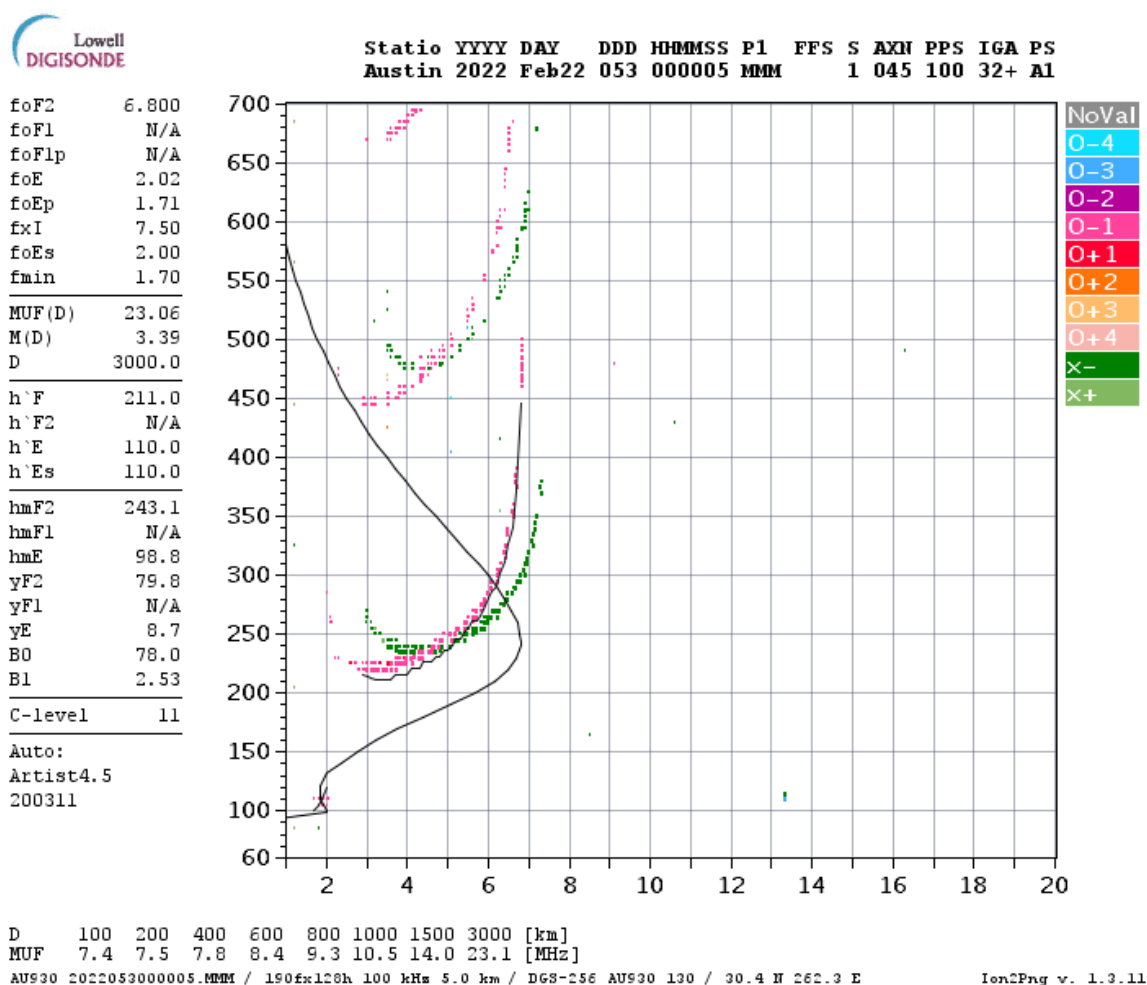


Рис. 1. Ионограмма ВЗИ «дигизонда» DPS в формате растрового изображения

Ионограмма НЗИ представляет собой зависимость времени группового запаздывания (вертикальная ось) и амплитуды сигнала (изображается цветом или яркостью) от рабочей частоты (горизонтальная ось).

Интерес к большим массивам данных радиозондирования ионосферы обусловлен, кроме прочего, возможностью «тренировки» статистических моделей методами машинного обучения, тем более если наряду с сырыми данными имеются и обработанные – выделенные треки мод радиосигнала, критически частоты ионосферных слоёв и др. (то есть уже размеченные датасеты).

ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

В данной работе нами рассматривались следующие интернет-ресурсы [6–12], конкретнее – их архивы ионосферных данных из следующих источников: Национальный центр геофизических данных США [6], Канадская арктическая ионосферная

сеть [7], Служба космической погоды Бюро метеорологии Австралии [8], База данных Европейского ионосферного центра [9], Институт физики атмосферы Чешской Академии Наук [10], Центр космических исследований Польской академии наук [11], Центр изучения космоса и атмосферы радиотехническими средствами Киотского университета [12].

Наилучший вариант в смысле удобства и качества обработки, когда ионограммы представлены в хорошо документированных специализированных форматах (т. н. «сырых», «raw») [13–18]; часть данных, полученная после 1990-х годов, в таких форматах и представлена. Гораздо более трудной является ситуация когда данные представлены только в виде картинок ионограмм (raw-файлы недоступны).

НАИБОЛЕЕ ПОПУЛЯРНЫЕ ФОРМАТЫ «СЫРЫХ» ДАННЫХ

В мире наиболее часто используемыми ионозондами являются различные версии (поколения) ионозонда (также называемого «дигизонд») DPS (Digisonde Portable Sounder) Центра атмосферных исследований Lowell Массачусетского университета [15, 16], канадские ионозонды CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) [13], а также австралийский ионозонд IPS (Ionospheric Predictions Service, представленный также в нескольких версиях (поколениях) [14]. Разумеется, это далеко не полный список, например, здесь не упомянуты российский ионозонды, однако в свете целей данной статьи рассмотрены только те архивы данных, которые можно найти в интернете в открытом доступе. Указанные выше интернет-ресурсы [6–12] содержат ионограммы в каких-либо из перечисленных форматов, причем один ресурс может содержать данные в разных форматах (так, например, австралийский архив [8] содержит данные и с IPS, и с DPS, и с CADI ионозондов). Важной проблемой для практического использования всех этих открытых данных в научных исследованиях (в случае обработки программным обеспечением собственной разработки) является неполная документированность форматов.

Так, формат ионограмм CADI хоть и документирован [13], но, по-видимому, документирован не полностью, т. к. остаются нерешенными проблемы с просмотр-

ром некоторой доли ионограмм как при самостоятельной реализации программного обеспечения в соответствии с документацией, так и при использовании open-source реализаций, которые можно найти в интернете.

Из различных поколений форматов австралийских ионозондов IPS документированы не все: так, на сайте самой Службы космической погоды Бюро метеорологии Австралии [8] представлены ионограммы «поколений» 4a, 4b, 4c, 4d, 5a, 5b, 5c, 5d, однако имеющееся описание [14] соответствует по-видимому только наиболее современному формату IPS 5d.

Из всей «линейки» поколений «сырых» форматов дигизондов – ART, DFT, ION, MMM, BEM, SBF, RSF-flex, PGH, RSF, BIT удастся найти только лишь описания форматов MMM, SBF, RSF [16].

Отдельного упоминания заслуживает формат 16C – «самый сырой» формат «16-ти канальных ионограмм» дигизондов [19], из которого могут быть получены «сырые» ионограммы (таких форматов, как MMM, SBF, RSF). Как можно понять из [19], каналы представляют комбинации доплеровских ячеек, соответствующих поляризации антенны и положению луча приемной антенной решетки, т. е. этот «самый сырой» формат позволяет получить не только ионограммы, но и информацию о направлениях прихода и поляризации радиоволн.

Следует упомянуть также «дигизондовские» форматы SAO [17] и SAOXML [18], не предназначенные для хранения «сырых» данных ионограмм, но предназначенные для хранения результатов обработки ионограмм (выделенные треки мод распространения КВ радиосигнала, идентифицированные ионосферные слои и их высоты, восстановленные профили электронной концентрации и др.); форматы SAO и SAOXML широко используются для указанных целей на интернет-ресурсах, указанных в работе, причем не только с «дигизондами».

ДАННЫЕ В ФОРМАТЕ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С точки зрения реализации алгоритмов автоматической обработки, гораздо более тяжелой является ситуация, когда данные представлены только в виде растровых изображений (картинок) ионограмм, а raw-файлы при этом недоступны. Причем это касается не только старых архивных данных до 1990-х, но и часть современных данных в некоторых общедоступных архивах может быть представлена только картинками (такими, как представлено на рис. 1). Прежде чем приступить к традиционной для ионограмм обработке (выделению треков, определению критических частот ионосферных слоёв, восстановлению профилей электронной концентрации), необходимо, как минимум, распознать само поле ионограммы на картинках. Далее неплохо бы автоматически распознавать надписи на осях (для автоматического восстановления хотя бы части метаданных), а в перспективе и в других областях картинки (так, могут представлять интерес данные о пункте зондирования в случае ВЗИ, приемном и передающем пунктах в случае НЗИ).

Совсем трудная ситуация складывается с обработкой наиболее старой части архивных данных, полученных в «доцифровую» эпоху, представленных отсканированными фотопленками с изображениями ионограмм (например, [6]); примеры таких изображений приведены на рис. 2. (в подрисучночных подписях указаны год и координаты пункта ВЗИ-радиозондирования).

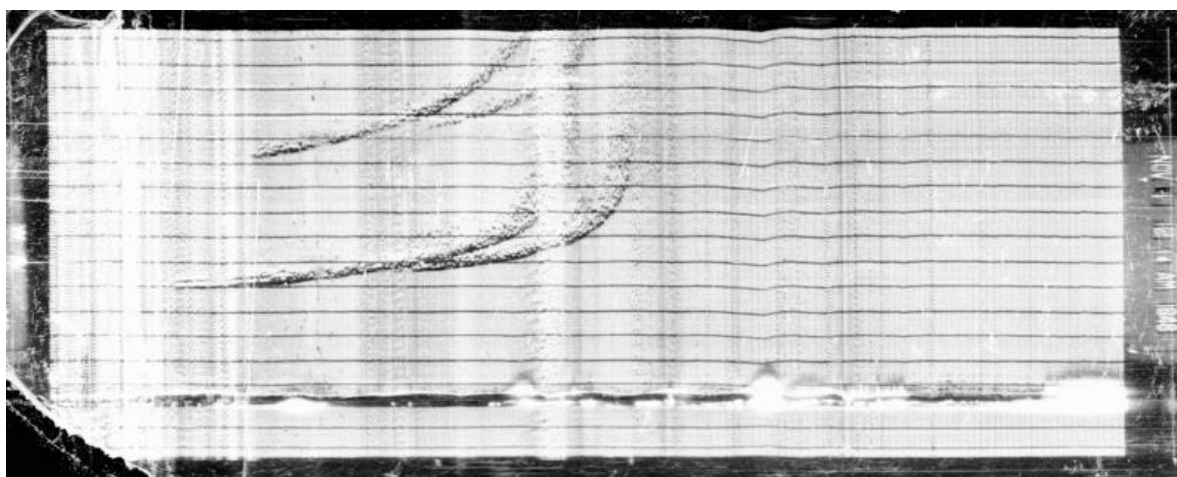


Рис. 2а. Ионограмма ВЗИ, 1948 г, Lat:38.7, Long:–77.1, скан с пленки

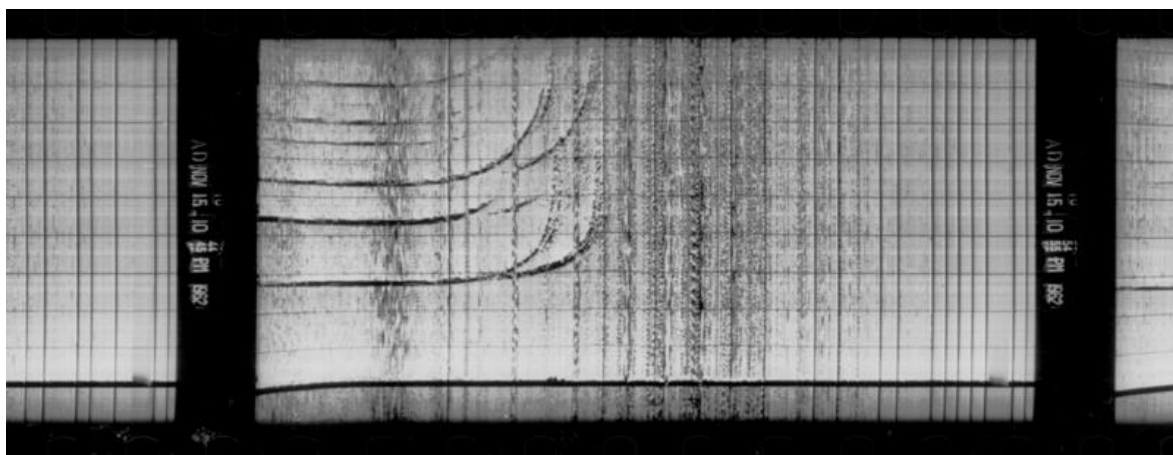


Рис. 26. ИONOграмма ВЗИ, 1962 г, Lat:51.9, Long:–176.6, скан с пленки

В материалах международной группы INAG (Ionospheric Network Advisory Group, Консультативная группа по ионосферной сети) можно найти упоминание, что типичными трудностями при регистрации ионограмм на фотопленку были: заедание пленки; неправильная настройка фокуса и яркости; ошибки при проявке пленки. На рис. 3 показаны примеры подобных проблемных данных.

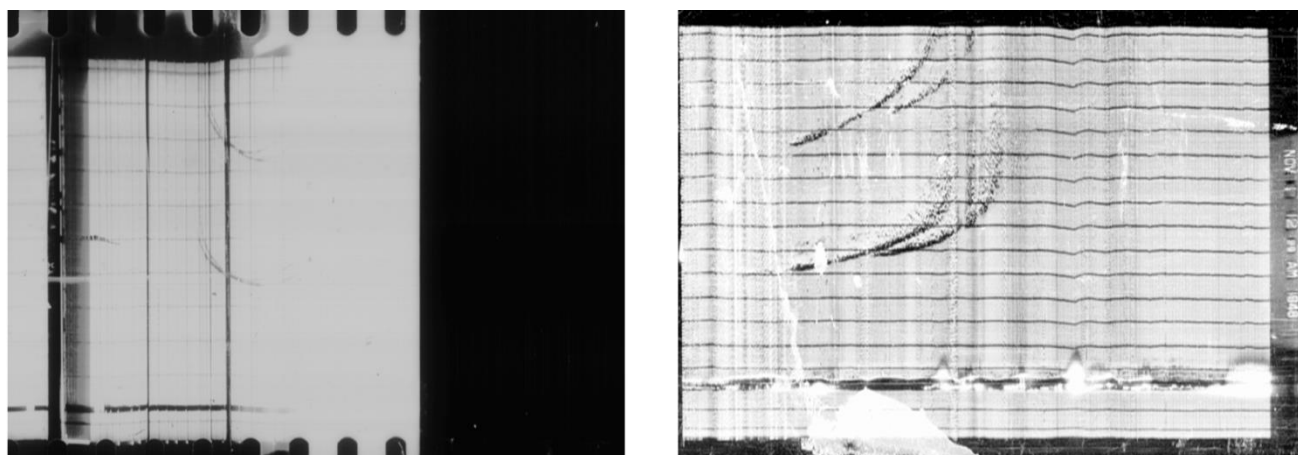


Рис. 3. Сканы ионограмм с пленок: «тяжелые случаи»

Часть наборов сканов с пленок содержит метаданные – в виде первых снимков серии на фотопленке (см. рис. 4). В этом случае для восстановления метаданных (или их части) можно попытаться применить методы машинного зрения [20], однако ряд очевидных проблем (в т. ч. рукописный текст) могут осложнить автоматизацию этого процесса.

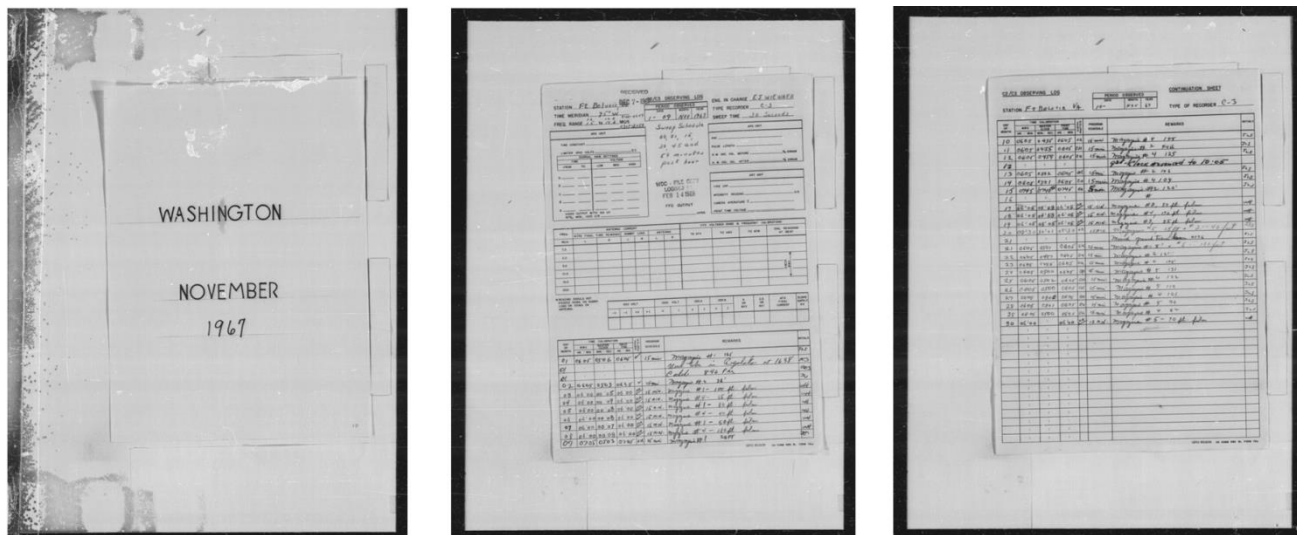


Рис. 4. Сканы с пленок: первые снимки серии, содержащие метаданные

Внимание, уделяемое здесь данным, сканированным с фотопленок, обусловлено большим временным периодом (1940–1980-е гг.), представленным только такими ионосферными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены интернет-ресурсы со свободным доступом к данным радиозондирования ионосферы. Интерес к таким большим массивам данных обусловлен, кроме прочего, возможностью «тренировки» статистических моделей методами машинного обучения. Рассмотрены наиболее популярные форматы данных, отмечена недостаточная документированность некоторых из них.

Наибольшие технические трудности представляет работа с данными, доступными только лишь в виде растровых изображений, существенная часть из которых к тому же отсканирована с фотопленок. Прежде чем приступить к традиционной для ионограмм обработке (выделению треков, определению критических частот ионосферных слоёв, восстановлению профилей электронной концентрации), необходимо, как минимум, распознать само поле ионограммы на картинках. В случае изображений ионограмм, отсканированных с фотопленок, добавляются задачи исправления деформирующих искажений поля картинки ионограммы (по соответствующим деформациям границ). Кроме того, необходимо также распознавание надписей на осях и других служебных надписей на изображениях ионограмм (для восстановления метаданных). Все перечисленные задачи

необходимо решать автоматически [20], иначе обработка миллионов архивных ионограмм не будет представляться реализуемой в разумные сроки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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> (дата обращения 01.12.2023)

2. *Reinisch B., Sales G.* 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 01.12.2023)

3. *Щирий А.О.* Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. №5. С. 170–173.

4. *Щирий А.О.* Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. 2022. №10.

<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>

5. *Shiriy A.O.* HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. Vol. 5. 2002. P. 365–369.

<https://doi.org/10.1109/apede.2002.1044964>

6. USA National Geophysical Data Center (NGDC) Data Services.

URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/> (дата обращения 01.12.2023)

7. Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) Data Download.

URL: http://chain.physics.unb.ca/chain/pages/data_download (дата обращения 01.12.2023)

8. Australian Government – Bureau of Meteorology, Space Weather Services. Ionospheric data archive.

URL: https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/wdc_ion_archive/ (дата обращения 01.12.2023)

9. IDCE (Ionospheric Dispatch Centre in Europe) data base.

URL: <ftp://ftp.cbk.waw.pl/idce/> (дата обращения 01.12.2023)

10. Institute of Atmospheric Physics CAS, Czech Republic.

URL: <http://147.231.47.3> (дата обращения 01.12.2023)

11. Space Research Centre PAS, Poland. URL: <http://www.rwc.cbk.waw.pl> (дата обращения 01.12.2023)

12. Radio Science Center for Space and Atmosphere at Kyoto University.

URL: <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/mudb/data/ionosonde/text/> (дата обращения 01.12.2023)

13. CADI users manual, Scientific Instrumentation Ltd. 2002.

URL: https://www.naic.edu/~phil/hardware/cadi/Cadi_users_Manual.pdf (дата обращения 01.12.2023)

14. Ionogram Data Format. Australian Space Weather Services.

URL: https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/2/8/3 (дата обращения 01.12.2023)

15. The New Digisonde for Research and Monitoring Applications / B.W. Reinisch, I.A. Galkin, G.M. Khmyrov, A.V. Kozlov, K. Bibl, I.A. Lisysyan, G.P. Cheney, X. Huang, D.F. Kitrosser, V.V. Paznukhov, Y. Luo, W. Jones, S. Stelmash, R. Hamel, J. Grochmal // Radio Sci. 2009. Vol. 44, iss. 1. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>

16. Digisonde 4D an HF Radar System for Ionospheric Research and Monitoring. Technical Manual. Ver. 1.2.11.

URL: http://digisonde.com/pdf/Digisonde4DManual_LDI-web.pdf (дата обращения 01.12.2023)

17. Standard Archiving Output (SAO) Format. 2006.

URL: <https://ulcar.uml.edu/~iag/SAO-4.3.htm> (дата обращения 01.12.2023)

18. *Reinisch B.W., Galkin I.A.* SAO.XML format specification v 5.0, Univ. of Mass. Lowell, Lowell. 2008.

URL: <http://ulcar.uml.edu/SAOXML> (дата обращения 01.12.2023)

19. *Bullett T.W., Galkin I.A., Kitrosser D.F.* Digisonde 256 data decoding: 16 channel ionograms. Air Force Research Lab., Space Vehicles Division, Hanscom AFB, Univ. of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, Lowell, 2002.

URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/documentation/Digisonde/D256%2016C%20Specification.pdf> (дата обращения 01.12.2023)

20. Щирый А.О., Писаренко А.А. Автоматическая обработка отсканированных изображений архивных ионограмм радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами. Постановка задачи // Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком-2023»), 20-24 ноября 2023г., Москва, МИРЭА — Российский технологический университет. М.: РТУ МИРЭА, 2023. С. 50–53.

OPEN ARCHIVES OF GROUND-BASED IONOSPHERIC RADIOSOUNDING DATA BY SHORTWAVE SIGNALS

A. O. Schiriy¹ [0000-0001-7312-4424], **A. A. Pisarenko**² [0000-0001-7312-4424]

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow;*

²*Moscow Industrial College*

¹andreyschiriy@gmail.com, ²pisarenko.alina.04@bk.ru

Abstract

By the radiosounding of the ionosphere with short-wave signals, can be obtained information about the processes in the ionospheric plasma, about its structure and state; these data are also extremely important for radio engineering systems operating in the short-wave range. To date, a large amount of experimental data has been accumulated for various geo- and heliophysical, spatial and temporal conditions. The interest in large amounts of ionospheric radiosonde data is also motivated by the possibility of constructing statistical models using machine learning theory methods. The paper presents some Internet resources with ionospheric radiosonde data, shows the prospects for their application, and also identifies some problems, such as insufficient documentation of some data formats and the presentation of ionograms only in the form of raster images, most of which are also scanned from photographic films.

Keywords: *ionosphere, propagation of radio waves, radiosounding, vertical sounding of the ionosphere, ionogram, ionogram processing*

REFERENCES

1. Radiozondirovanie ionosfery sputnikovymi i nazemnymi ionozondami / Pod red. S.I. Avdjushina. Trudy instituta prikladnoj geofiziki im. akademika E.K. Fjodorova. M.: IPG, 2008. URL: <http://ipg.geospace.ru/publications/book-2008.pdf> (date of access 01.12.2023)
2. *Reinisch B., Sales G.* 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> (date of access 01.12.2023)
3. *Schiriy A.O.* Razvitie sredstv avtomatizacii nazemnogo radiozondirovanija ionosfery // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priboro-rostroenija. 2014. №5. S. 170–173.
4. *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>
5. *Shiriy A.O.* HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. Vol. 5. 2002. P. 365–369. <https://doi.org/10.1109/apede.2002.1044964>
6. USA National Geophysical Data Center (NGDC) Data Services. URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/> (дата обращения 01.12.2023)
7. Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN) Data Download. URL: http://chain.physics.unb.ca/chain/pages/data_download (дата обращения 01.12.2023)
8. Australian Government – Bureau of Meteorology, Space Weather Services. Ionospheric data archive. URL: https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/wdc_ion_archive/ (дата обращения 01.12.2023)
9. IDCE (Ionospheric Dispatch Centre in Europe) data base. URL: <ftp://ftp.cbk.waw.pl/idce/> (дата обращения 01.12.2023)
10. Institute of Atmospheric Physics CAS, Czech Republic. URL: <http://147.231.47.3> (дата обращения 01.12.2023)

11. Space Research Centre PAS, Poland. URL: <http://www.rwc.cbk.waw.pl> (дата обращения 01.12.2023)

12. Radio Science Center for Space and Atmosphere at Kyoto University. URL: <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/mudb/data/ionosonde/text/> (дата обращения 01.12.2023)

13. CADI users manual, Scientific Instrumentation Ltd. 2002. URL: https://www.naic.edu/~phil/hardware/cadi/Cadi_users_Manual.pdf (дата обращения 01.12.2023)

14. Ionogram Data Format. Australian Space Weather Services. URL: https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/2/8/3 (дата обращения 01.12.2023)

15. The New Digisonde for Research and Monitoring Applications / B.W. Reinisch, I.A. Galkin, G.M. Khmyrov, A.V. Kozlov, K. Bibl, I.A. Lisysyan, G.P. Cheney, X. Huang, D.F. Kitrosser, V.V. Paznukhov, Y. Luo, W. Jones, S. Stelmash, R. Hamel, J. Grochmal // Radio Sci. 2009. Vol. 44, iss. 1. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>

16. Digisonde 4D an HF Radar System for Ionospheric Research and Monitoring. Technical Manual. Ver. 1.2.11. URL: http://digisonde.com/pdf/Digisonde4DManual_LDI-web.pdf (дата обращения 01.12.2023)

17. Standard Archiving Output (SAO) Format. 2006. URL: <https://ulcar.uml.edu/~iag/SAO-4.3.htm> (дата обращения 01.12.2023)

18. *Reinisch B.W., Galkin I.A.* SAO.XML format specification v 5.0, Univ. of Mass. Lowell, Lowell. 2008. URL: <http://ulcar.uml.edu/SAOXML> (дата обращения 01.12.2023)

19. *Bullett T.W., Galkin I.A., Kitrosser D.F.* Digisonde 256 data decoding: 16 channel ionograms. Air Force Research Lab., Space Vehicles Division, Hanscom AFB, Univ. of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, Lowell, 2002.

URL: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/ionosonde/documentation/Digisonde/D256%2016C%20Specification.pdf> (дата обращения 01.12.2023)

20. *Schiriy A.O., Pisarenko A.A.* Avtomaticheskaja obrabotka otskanirovannyh izobrazhenij arhivnyh ionogramm radiozondirovanija ionosfery korotkovolnovymi sig-

nalami. Postanovka zadachi // Sbornik nauchnyh statej po materialam VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitija radiotekhnicheskikh i infokommunikacionnyh sistem» («Radioinfokom-2023»), 20-24 nojabrja 2023g., Moskva, MIRJeA — Rossijskij tehnologicheskij universitet. M.: RTU MIRJeA, 2023. С. 50–53.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

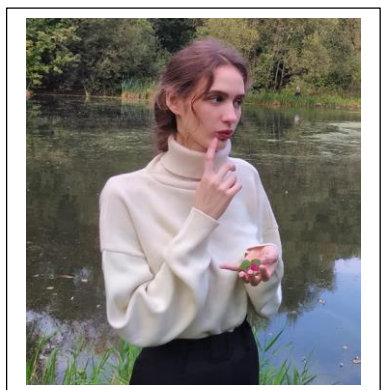


ЩИРЫЙ Андрей Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), Москва.

Andrey Olegovich SCHIRIY – PhD (Candidate of Technical Sciences), Senior Researcher at Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow.

email: andreyschiriy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7312-4424



ПИСАРЕНКО Алина Александровна – студентка Московского промышленного колледжа, Москва.

Alina Alexandrovna PISARENKO – student of Moscow Industrial College.

email: pisarenko.alina.04@bk.ru

ORCID: 0009-0008-6926-7172

Материал поступил в редакцию 10 декабря 2023 года