

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.033

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И ИНДЕКСОВ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ ПО ОПТИЧЕСКИМ И GNSS ДАННЫМ

С.В. Пильгаев¹, Б.В. Козелов¹, М.В. Филатов¹, Ю.В. Федоренко¹,
А.В. Ларченко¹, А.В. Ролдугин¹, П.А. Будников²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
"Полярный геофизический институт, Апатиты", Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение
"Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова", Москва, Россия

Аннотация

В декабре 2020 года сотрудники Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова в здании Полярного геофизического института г. Апатиты ввели в эксплуатацию новый GNSS приемник Septentrio PolaRx5S. Среди возможностей данного приемника можно выделить автоматический расчет ПЭС, фазовых и амплитудных индексов сцинтилляций. Так же камеры всего неба Полярного геофизического института работают в месте установки приемника в г. Апатиты и в обс. Ловозеро. Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс, позволяющий просматривать в каждый момент времени кадры оптических камер с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующими индексами сцинтилляций.

Введение

Неоднородности электронной концентрации в ионосфере могут влиять на прохождение электромагнитных сигналов и вызывать быстрые колебания амплитуды и фазы волны, принятой на Земле. Такие явления называют сцинтилляциями [1]. Первые исследования ионосферных сцинтилляций описаны в [2]. Последующие исследования показали, что явления сцинтилляций наиболее часто происходят в экваториальной и высокоширотной областях [1, 3-10]. Возрастающая активность человека в арктических регионах привела к росту сцинтилляционных исследований, особенно при помощи GNSS (Global Navigation Satellite System) систем [11-19]. Было обнаружено, что фазовые сцинтилляции преобладают над амплитудными в высокоширотных областях [20, 21].

Изучение ионосферных сцинтилляций может помочь в исследованиях неоднородностей ионосферы, поскольку они связаны между собой. Был предложен ряд объяснений возникновения высокоширотных неоднородностей на больших высотах [22-25], которые включают в себя плазменную турбулентность [26, 27], дрейфовые неустойчивости (GDI) [22, 28], неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (КНГ) [23, 29], нестабильность температурного градиента [30], тококонвективная неустойчивость (CCI) [31]. Позже в метод GDI был включен эффект CCI, который проявляется, в основном, в области продольных токов [24]. Carlson [32] предложил двухэтапную КНГ-GDI обработку, где КНГ используется для генерации неоднородностей в методе GDI, с целью ускорения процесса обработки. Измерения «на месте» (in situ) имеют решающее значение в оценке темпов роста плазменных неоднородностей [33-36].

Связь между полярными сияниями и сцинтилляциями подтверждена рядом исследований. Jin et al. [16] показали, что сильные сцинтилляции зависят от положения авроральной зоны и связали это с высыпанием частиц. Чаще всего сильные фазовые сцинтилляции в Европейском Арктическом регионе наблюдаются вблизи магнитной полуночи, чем в дневное время [16].

Межпланетное магнитное поле влияет на патчи в полярной шапке от дня к ночи [37-40]. На протяжении полярной ночи движение патчей полярной шапки может быть зафиксировано при помощи камер всего неба [7, 41-46]. Есть несколько исследований, показывающих, как светящиеся патчи выходят из полярной шапки и входят в авроральную зону. Moen et al. [43] показали, что 60% пятен выходят из полярной шапки между 22 и 01 MLT (локальное магнитное время), но полное распределение длится с 18:30 MLT до 04:50. Патчи полярной шапки плазмы F слоя выходят из полярной шапки ночью и возвращаются днем [47, 39, 40].

Когда патчи, которые выходят из полярной шапки, располагаются внутри аврорального овала, они называются авроральными блобами. Несмотря на то, что блобы были изучены более, чем три десятилетия назад [24, 25, 29, 47-50], они получили свое название лишь недавно. Блобы разделены на два типа ВТ-1 и ВТ-2. Первый тип связан с высокоплотной плазмой полярной шапки, которая входит в авроральную зону. Второй связан с плазменными уплотнениями, сгенерированными локальными высыпаниями частиц.

Исследование *C. van der Meeren et al.* [18] утверждает, что самые сильные сцинтилляции были обнаружены в овале полярных сияний в ночное время, когда патч из полярной шапки входит в авроральный овал.

Вышеуказанные исследования подтверждают наличие пространственных корреляций интенсивности фазовых и амплитудных сцинтилляций с оптическими изображениями авроральных эмиссий в высокоширотных областях. Экспериментальные результаты подтверждают необходимость продолжений исследований в различных геомагнитных условиях на основе данных дистанционных измерений распределений интенсивности авроральных эмиссий с помощью оптических приборов одновременно с получением уровней сцинтилляций сигналов глобальных навигационных систем. Для постановки и реализации экспериментов необходимо дальнейшее совершенствование средств диагностики, т.е. орбитального и наземного комплексов аппаратуры на основе современных изображающих детекторов и новых методик [51].

В зимний период в условиях полярной ночи на высокоширотных станциях ПГИ проводятся оптические наблюдения при помощи камер всего неба, в том числе на здании ПГИ, Апатиты. В декабре 2020 года Институт прикладной геофизики имени Е. К. Фёдорова на здании Полярного геофизического института г. Апатиты установил новый современный сцинтилляционный GNSS приемник Septentrio PolaRx5S. Использование спутниковых и оптических приборов в одной точке дает возможность исследовать взаимную корреляцию регистрируемых данных.

Оборудование

Оптическая камера всего неба **ASB** на базе модуля SONY IMX385 IP и GNSS приемник расположены рядом на крыше здания Полярного Геофизического института в г. Апатиты с координатами 67.571N, 33.398E.

Камера всего неба основана на базе модуля SONY IMX385 IP и широкоугольного объектива M12 1,85 мм 1/1.8" «рыбий глаз» 185°. Цветной датчик изображения CMOS IMX385 (1/2" 1945X1097 2,13МП) позволяет получать поток 1920X1080 25/30 кадров в секунду.

Многочастотный малопотребляющий 544 канальный GNSS приемник генерирует данные, содержащие малозумные индексы сцинтилляций, кодовые, фазовые и навигационные нефильтрованные данные с частотой до 100 Гц. Особенностью прибора является предоставление потребителю данных о полном электронном содержании (ПЭС) и индексов сцинтилляций в реальном времени. Проверенная на практике технология Advanced Interference Mitigation (AIM+) компании Septentrio позволяет PolaRx5 отфильтровывать как преднамеренные, так и непреднамеренные источники радиопомех, от узкополосных сигналов по импульсным сигналам высокой мощности до глушителей ЛЧМ-сигналов и источников помех Iridium. Запатентованная Septentrio технология подавления многолучевого распространения (APME+) - уникальная возможность устранения многолучевого распространения с короткой задержкой без внесения смещения - гарантирует превосходное качество измерений. При необходимости пользователь может активировать или деактивировать APME+ для получения полностью неизмененных измерений.

Case study

Для упрощения поиска и отбора случаев корреляции оптических и GNSS данных. был создан WEB интерфейс. Он позволяет в единой шкале времени просматривать данные GNSS приемника и камеры всего неба. На странице изображена суточная кеограмма по данным камеры всего неба. Под ней расположено изображение с индексами фазовых сцинтилляций с таким же временным разрешением.

Для демонстрации работы страницы взяты кадры цветной камеры obs. Ловозеро. В дальнейшем предполагается возможность выбора камеры.

Слева сверху – текущее изображение камеры с нанесенными на изображение спутниками. При увеличении индекса сцинтилляции изменяется цвет и размер изображения спутника увеличивается. Справа сверху - суточная кеограмма. Слева внизу – текущий индекс сцинтилляций. Справа внизу – индекс сцинтилляций за сутки.

Страница интерактивная. При клике мышью на изображении кеограммы или суточных сцинтилляций происходит обновление текущих изображений камеры и индексов сцинтилляций.

В качестве примера, в выделенном красном прямоугольнике показано время, где происходят одновременные флуктуации фазы спутниковых сигналов и сияния, зарегистрированные камерой всего неба.

Заключение

Для облегчения целей исследования связи полярных сияний и индексов сцинтилляций реализован интерактивный WEB-интерфейс, позволяющий просматривать в каждый заданный момент времени кадры оптической камеры с нанесенными на них положениями GNSS спутников и соответствующие индексы сцинтилляций. В настоящее время WEB-интерфейс функционирует в тестовом режиме. Производится накопление данных приборов, отладка и коррекция работы страницы.

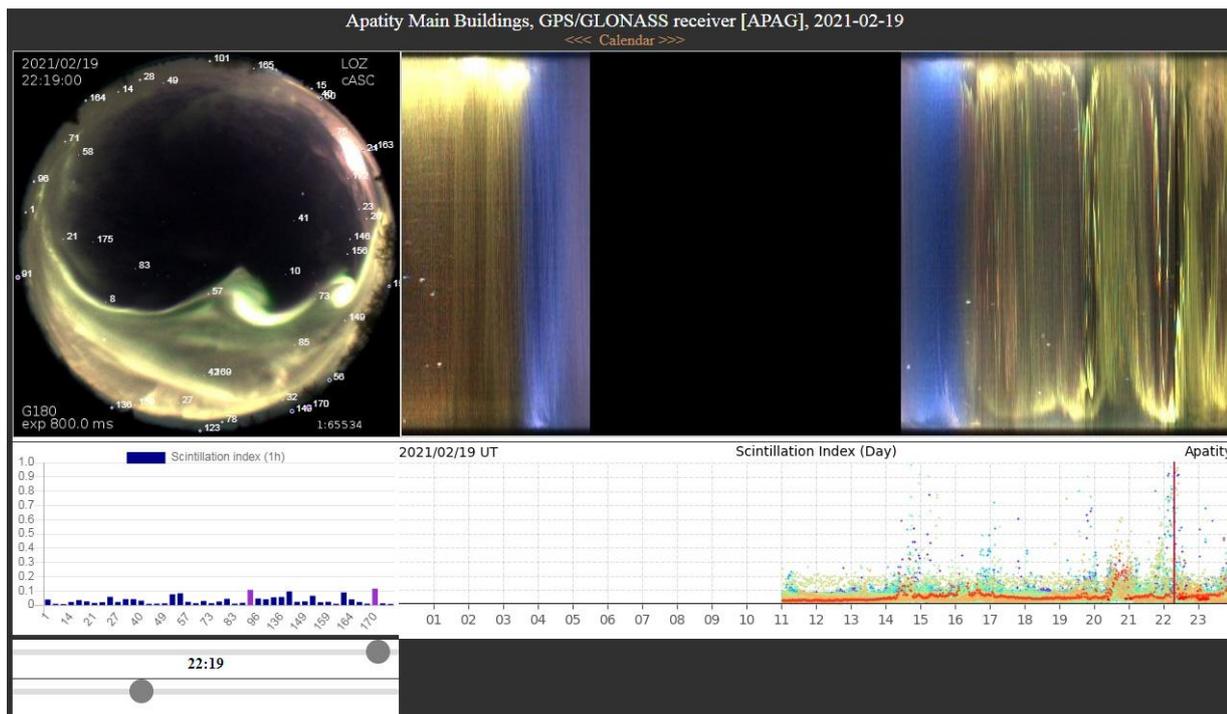


Рисунок 1. Пример страницы событие 19 февраля 2021 с камерой всего неба в obs. Ловозеро.

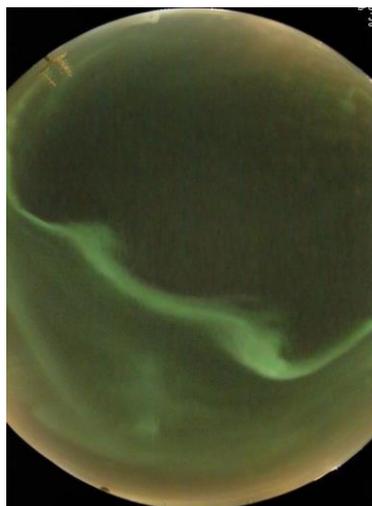


Рисунок 2. Снимок камеры всего неба в г. Апатиты 19 февраля 2021, 22:19.

Литература

1. Yeh K.C., Liu C.-H. (1982). Radio wave scintillations in the ionosphere // Proc. IEEE, V. 704, P. 325–378.
2. Hey J.S., Parsons S.J., Phillips J.W. (1946). Fluctuations in cosmic radiation at radiofrequencies // Nature, V. 158, P. 234.
3. Fremouw E.J., Leadabrand R.L., Livingston R.C., Cousins M.D., Rino C.L., Fair B.C., Long R.A. (1978). Early results from DNA wideband satellite experiment: Complex-signal scintillation // Radio Sci., V. 13, P. 167–187, doi:10.1029/RS013i001p00167
4. Kelley M.C., Baker K.D., Ulwick J.C., Rino C.L., Baron M.J. (1980). Simultaneous rocket probe, scintillation, and incoherent scatter radar observations of irregularities in the auroral zone ionosphere // Radio Sci., V. 15, P. 491–505, doi:10.1029/RS015i003p00491
5. Aarons J. (1982). Global morphology of ionospheric scintillations // Proc. IEEE, V. 70 (Is. 4), P. 360–378.
6. Aarons J., Klobuchar J.A., Whitney H.E., Austen J., Johnson A.L., Rino C.L. (1983). Gigahertz scintillations associated with equatorial patches // Radio Sci., V. 18 (Is. 3), P. 421–434, doi:10.1029/RS018i003p00421

7. Buchau J., Weber E.J., Anderson D.N., Carlson H.C., Moore J.G., Reinisch B.W., Livingston R.C. (1985). Ionospheric structures in the polar-cap — Their origin and relation to 250 Mhz scintillation // *Radio Sci.*, V. 20, P. 325–338, doi:10.1029/RS020i003p00325
8. Basu S., MacKenzie E., Basu S. (1988). Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods // *Radio Sci.*, V. 23, P. 363–378, doi:10.1029/RS023i003p00363
9. Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. (2002). Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, V. 64 (Is. 16), P. 1745–1754.
10. Basu S., Groves K.M. (2001). Specification and forecasting of outages on satellite communication and navigation systems // in *Space Weather*, edited by P. Song, H.J. Singer, and G.L. Siscoe, AGU, Washington, D.C., doi:10.1029/GM125p0423
11. Mitchell C.N., Alfonsi L., DeFranceschi G., Lester M., Romano V., Wernik A.W. (2005). GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm // *Geophys. Res. Lett.*, V. 32, L12S0, doi:10.1029/2004GL021644
12. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., Pokhotelov D., MacDougall J.W., Donovan E., Spanswick E., Maurice J.P.S. (2010). GPS TEC, scintillation and cycle slips observed at high latitudes during solar minimum // *Ann. Geophys.*, V. 28 (Is. 6), P. 1307–1316.
13. Moen J., Oksavik K., Alfonsi L., Daabakk Y., Romano V., Spogli L. (2013). Space weather challenges of the polar cap ionosphere // *J. Space Weather Space Clim.*, V. 3, A02, doi:10.1051/swsc/2013025
14. Andalsvik Y.L., Jacobsen K.S. (2014). Observed high-latitude GNSS disturbances during a less-than-minor geomagnetic storm // *Radio Sci.*, V. 49, P. 1277–1288, doi:10.1002/2014RS005418
15. Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. (2014). GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: Direct comparison // *J. Space Weather Space Clim.*, V. 4, A23, doi:10.1051/swsc/2014019
16. Jin Y., Moen J.I., Miloch W.J. (2015). On the collocation of the cusp aurora and the GPS phase scintillation: A statistical study // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 9176–9191, doi:10.1002/2015JA021449
17. van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D., Moen J.I., Romano V. (2014). GPS scintillation and irregularities at the front of an ionization tongue in the nightside polar ionosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 119, P. 8624–8636, doi:10.1002/2014JA020114
18. van der Meeren C., Oksavik K., Lorentzen D.A., Rietveld M.T., Clausen L.B.N. (2015). Severe and localized GNSS scintillation at the poleward edge of the nightside auroral oval during intense substorm aurora // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 10,607–10,621, doi:10.1002/2015JA021819
19. Oksavik K., van der Meeren C., Lorentzen D.A., Baddeley L.J., Moen J. (2015). Scintillation and loss of signal lock from poleward moving auroral forms in the cusp ionosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 9161–9175, doi:10.1002/2015JA021528
20. Spogli L., Alfonsi L., De Franceschi G., Romano V., Aquino M.H.O., Dodson A. (2009). Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid latitude European regions // *Ann. Geophys.*, V. 27 (Is. 9), P. 3429–3437.
21. Prikryl P., Jayachandran P.T., Mushini S.C., Chadwick R. (2011). Climatology of GPS phase scintillation and HF radar backscatter for the high-latitude ionosphere under solar minimum conditions // *Ann. Geophys.*, V. 29 (Is. 2), P. 377–392.
22. Keskinen M.J., Ossakow S.L. (1983). Theories of high-latitude ionospheric irregularities: A review // *Radio Sci.*, V. 18, P. 1077–1091, doi:10.1029/RS018i006p01077
23. Keskinen M.J., Mitchell H.G., Fedder J.A., Satyanarayana P., Zalesak S.T., Huba J.D. (1988). Nonlinear evolution of the Kelvin-Helmholtz instability in the high-latitude ionosphere // *J. Geophys. Res.*, V. 93, P. 137–152, doi:10.1029/JA093iA01p00137
24. Tsunoda R.T. (1988). High-latitude F region irregularities: A review and synthesis // *Rev. Geophys.*, V. 26, P. 719–760, doi:10.1029/RG026i004p00719
25. Kelley M.C., Vickrey J.F., Carlson C.W., Torbert R. (1982). On the origin and spatial extent of high-latitude F region irregularities // *J. Geophys. Res.*, V. 87, P. 4469–4475, doi:10.1029/JA087iA06p04469
26. Huba J.D., Hassam A.B., Schwartz I.B., Keskinen M.J. (1985). Ionospheric turbulence: Interchange instabilities and chaotic fluid behavior // *Geophys. Res. Lett.*, V. 12, P. 65–68, doi:10.1029/GL012i001p00065
27. Kintner P.M., Seyler C.E. (1985). The status of observations and theory of high-latitude ionospheric and magnetospheric plasma turbulence // *Space Sci. Rev.*, V. 41, P. 91–129.
28. Gondarenko N.A., Guzdar P.N. (2004). Plasma patch structuring by the nonlinear evolution of the gradient drift instability in the high-latitude ionosphere // *J. Geophys. Res.*, V. 109, A09301, doi:10.1029/2004JA010504
29. Basu S., Basu S., MacKenzie E., Coley W.R., Sharber J.R., Hoegy W.R. (1990). Plasma structuring by the gradient drift instability at high-latitudes and comparison with velocity shear driven processes // *J. Geophys. Res.*, V. 95, P. 7799–7818, doi:10.1029/JA095iA06p07799
30. Hudson M.K., Kelley M.C. (1976). The temperature gradient drift instability at the equatorward edge of the ionospheric plasma trough // *J. Geophys. Res.*, V. 81, P. 3913–3918, doi:10.1029/JA081i022p03913

31. Ossakow S.L., Chaturvedi P.K. (1979). Current convective instability in the diffuse aurora // *Geophys. Res. Lett.*, V. 6, P. 332–334, doi:10.1029/GL006i004p00332
32. Carlson H.C. (2012). Sharpening our thinking about polar cap ionospheric patch morphology, research, and mitigation techniques // *Radio Sci.*, V. 47, RSOL21, doi:10.1029/2011RS004946
33. Moen J., Walker I.K., Kersley L., Milan S.E. (2002). On the generation of cusp HF backscatter irregularities // *J. Geophys. Res.*, V. 107 (Is. A4), doi:10.1029/2001JA000111
34. Moen J., Oksavik K., Abe T., Lester M., Saito Y., Bekkeng T.A., Jacobsen K.S. (2012). First in-situ measurements of HF radar echoing targets // *Geophys. Res. Lett.*, V. 39, L07104, doi:10.1029/2012GL051407
35. Oksavik K., Moen J., Lester M., Bekkeng T.A., Bekkeng J.K. (2012). In situ measurements of plasma irregularity growth in the cusp ionosphere // *J. Geophys. Res.*, V. 117, A11301, doi:10.1029/2012JA017835
36. Spicher A., Cameron T., Grono E.M., Yakymenko K.N., Buchert S.C., Clausen L.B.N., Knudsen D.J., McWilliams K.A., Moen J.I. (2015). Observation of polar cap patches and calculation of gradient drift instability growth times: A swarm case study // *Geophys. Res. Lett.*, V. 42, P. 201–206, doi:10.1002/2014GL062590
37. Foster J.C., et al. (2005). Multiradar observations of the polar tongue of ionization // *J. Geophys. Res.*, V. 110, A09S31, doi:10.1029/2004JA010928
38. Oksavik K., Barth V.L., Moen J., Lester M. (2010). On the entry and transit of high-density plasma across the polar cap // *J. Geophys. Res.*, V. 115, A12308, doi:10.1029/2010JA015817
39. Zhang Q.H., et al. (2013). Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches // *Science*, V. 339 (Is. 6127), P. 1597–1600.
40. Zhang Q.-H., Lockwood M., Foster J.C., Zhang S.-R., Zhang B.-C., McCreary I.W., Moen J., Lester M., Ruohoniemi J.M. (2015). Direct observations of the full Dungey convection cycle in the polar ionosphere for southward interplanetary magnetic field conditions // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 4519–4530, doi:10.1002/2015JA021172
41. Weber E.J., Klobuchar J.A., Buchau J., Carlson H.C., Livingston R.C., Delabaujardiere O., McCreedy M., Moore J.G., Bishop G.J. (1986). Polar cap F layer patches: Structure and dynamics // *J. Geophys. Res.*, V. 91, P.12,121–12,129, doi:10.1029/JA091iA11p12121
42. Lorentzen D.A., Shumilov N., Moen J. (2004). Drifting airglow patches in relation to tail reconnection // *Geophys. Res. Lett.*, V. 31, L02806, doi:10.1029/2003GL017785
43. Moen J., Gulbrandsen N., Lorentzen D.A., Carlson H.C. (2007). On the MLT distribution of F region polar cap patches at night // *Geophys. Res. Lett.*, V. 34, L14113, doi:10.1029/2007GL029632
44. Moen J., Hosokawa K., Gulbrandsen N., Clausen L.B.N. (2015). On the symmetry of ionospheric polar cap patch exits around magnetic midnight // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 120, P. 7785–7797, doi:10.1002/2014JA020914
45. Hosokawa K., Shiokawa K., Otsuka Y., Ogawa T., St-Maurice J.P., Sofko G.J., Andre D.A. (2009). Relationship between polar cap patches and field-aligned irregularities as observed with an all-sky airglow imager at Resolute Bay and the PolarDARN radar at Rankin Inlet // *J. Geophys. Res.*, V. 114, A03306, doi:10.1029/2008JA013707
46. Hosokawa K., Moen J.I., Shiokawa K., Otsuka Y. (2011). Decay of polar cap patch // *J. Geophys. Res.*, V. 116, A05306, doi:10.1029/2010JA016297
47. Crowley G., Ridley A.J., Deinst D., Wing S., Knipp D.J., Emery B.A., Foster F., Heelis R., Hairston M., Reinisch B.W. (2000). Transformation of high-latitude ionospheric F region patches into blobs during the March 21, 1990, storm // *J. Geophys. Res.*, V. 105, P. 5215–5230, doi:10.1029/1999JA900357
48. Vickrey J.F., Rino C.L., Potemra T.A. (1980). Chatanika/Triad observations of unstable ionization enhancements in the auroral F-region // *Geophys. Res. Lett.*, V. 7, P. 789–792, doi:10.1029/GL007i010p00789
49. Rino C.L., Livingston R.C., Tsunoda R.T., Robinson R.M., Vickrey J.F., Senior C., Cousins M.D., Owen J., Klobuchar J.A. (1983). Recent studies of the structure and morphology of auroral-zone F region irregularities // *Radio Sci.*, V. 18, P. 1167–1180, doi:10.1029/RS018i006p01167
50. Weber E.J., Tsunoda R.T., Buchau J., Sheehan R.E., Strickland D.J., Whiting W., Moore J.G. (1985). Coordinated measurements of auroral zone plasma enhancements // *J. Geophys. Res.*, V. 90, P. 6497–6513, doi:10.1029/JA090iA07p06497
51. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. (2019). Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. часть 1 (ВУФ-диапазон) // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*, Т. 167, № 6, С. 9-41.