Аннотация
к циклу статей С.А. Пулинца и др.
Многофункциональный спутниковый ионозонд ЛАЭРТ как основа глобальной системы мониторинга ионосферы

1. Авторы

Поскольку на конкурс подаётся цикл статей, в каждой из которых состав авторов различный, для каждой из статей можно просмотреть список авторов в отдельном файле, где представлены ссылки на все 7 статей. С.А. Пулинец является первым автором в 6 из 7 представляемых на конкурс статей.

2. Название

Названия всех статей представлены в файле ссылок

3. Ссылки на публикацию

1. Pulinets S., Tsybulya K., Depuev V., Danilov I., Pulinets M., Ionospheric topside sounding revival, *Advances in Space Research*, **2026**. 77, Issue 2, 2574-2587, https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.10.093. **Q1**

2. Пулинец С.А., Цыбуля К.Г. Глобальный мониторинг ионосферы Земли, эффектов космической погоды и космических излучений по данным многофункционального бортового ионозонда ЛАЭРТ. *Метеорология и гидрология*, **2026**, № 10, С. 36-60 **DOI:** 10.7868/S3034550226010104

3. Пулинец С.А., Цыбуля К.Г., Депуев В.Х., Данилов И.С., Пулинец М.С. Спутниковый ионозонд ЛАЭРТ как основа глобальной системы мониторинга ионосферы. *Космические исследования*, 64 №3, **2026**, 393-415. **DOI**: 10.7868/S3034550226030058

4. Пулинец С.А., Цыбуля К.Г., Данилов И.С., Пулинец М.С. Первые результаты регистрации плазменных волн во внешней ионосфере по данным спутников "*Ионосфера-М*" № 1 и № 2. *Космические исследования*, **2026**, том 64, № 1, с. 124–139. **DOI:** 10.7868/S3034550226010104

5. Pulinets, S.; Kotonaeva, N.; Depuev, V.; Tsybulya, K. Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm of 12–14 November 2025, Based on Multi-Parameter Analysis of Data from the LAERT Topside Sounder. *Atmosphere* **2026**, 17, 150. https://doi.org/10.3390/atmos17020150

6. Xiong, P., Chen, J., Shen, X., Liu, T., De Santis, A., & Pulinets, S. **2026**. Multi-instrument constraints on a hemispherically asymmetric positive ionospheric storm in the 60–180°E sector during the 12–13 November 2025 geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 131, e2026JA035326. https://doi.org/10.1029/2026JA035326 **Q1**

7. Пулинец С.А., Депуев В.Х. Радиофизические аспекты интерпретации данных спутникового ионозонда ЛАЭРТ. Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром **2026**. С. 161-168. DOI: 10.1016/2304-0297-2026-1-1-161-168

4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Необходимость уточнения наших знаний о структуре и динамике ионосферы Земли в различных гелиогеофизических условиях приобретает все большую актуальность в связи с развитием спутниковых и наземных систем навигации, радиосвязи и других

приложений, связанных с распространением радиоволн разных диапазонов. При этом сами Глобальные навигационные сети ГЛОНАСС, GPS, Beidou, Galileo и другие не могут обеспечить качественный прогноз ионосферных возмущений, поскольку обладают информацией только об интегральном содержании электронов в столбе от спутника на высоте порядка 20 000 км до поверхности земли, где расположены наземные приемники. Точность радиозатменных измерений весьма низка, и все спутники, проводящие такие измерения, расположены на низкоширотных орбитах.

При этом все официальные организации и учреждения, использующие системы навигации и связи, обязаны пользоваться официальным стандартом ионосферы, последняя версия которого была выпущена в 1990 г. При этом процесс глобальных изменений климата затронул не только тропосферу, но и ионосферу. что доказано последними исследованиями долговременных трендов параметров ионосферы.

Для надежных прогнозов необходимо оперативное знание внутренней структуры ионосферы в виде вертикальных профилей электронной концентрации, которые могут быть получены только с помощью зондирования ионосферы спутниковыми ионозондами.

Последний спутниковый ионозонд был запущен в 1987 г., т.е. порядка 40 лет назад. Поэтому возобновление спутникового зондирования стало не просто актуальной, а суперактуальной задачей. Такая задача была решена в рамках проекта «Ионозонд», для которого был разработан спутниковый ионозонд ЛАЭРТ, описанию которого и новым результатам о динамике ионосферы, полученным в течение первого года их эксплуатации и посвящены представляемый на конкурс публикации.

5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

В представленных работах решается сразу несколько задач.

5.1. Оценка всех функциональных параметров спутникового ионозонда ЛАЭРТ в условиях функционирования на борту ИСЗ в условиях открытого космического пространства и их соответствия Техническому заданию

5.2. Обеспечение регулярного глобального мониторинга ионосферы с целью получения ее параметров в виде вертикальных профилей электронной концентрации

5.3. Исследование динамики отклика ионосферы на проявления солнечной и геомагнитной активности в виде электромагнитных излучений и потоков высыпающихся энергичных частиц

5.4. Исследование плазменных резонансов и плазменно-волнового взаимодействия в окрестности спутника

5.5. Исследование глобального распределения электромагнитных излучений естественного и антропогенного происхождения в диапазоне частот 0.1 – 20 МГц

5.6. Регистрация солнечных радиовсплесков III типа

5.7. Проводить диагностику модификации ионосферы в нагревных экспериментов со стендом Сура

6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

При создании спутникового ионозонда ЛАЭРТ было применено большое количество инновационных подходов и разработок. По своим возможностям и параметром он намного превосходит все предыдущие версии подобных инструментов, созданных разными странами. в том числе:

6.1. Для облегчения конструкции спутника в целях обеспечения его трехосной стабилизации антенно-фидерное устройство ионозонда вместо медно-бериллиевого сплава было изготовлено из углепластика. Такая конструкция АФУ была применена впервые в мире

6.2. Вместо переключателя прием-передача были изготовлены отдельно передающая и приемная антенны

6.3. Конструкция приемной антенны представляет собой скрещенный диполь, что позволяет определять поляризацию принимаемых сигналов и применить ИИ для автоматической оцифровки ионограмм

6.4. По сравнению со всеми предыдущими версиями спутниковых ионозондов расширен диапазон рабочих частот до 0.1 – 20 МГц

6.5. Функционал ионозонда, ЛАЭРТ фактически обеспечивает его работу как собственно традиционного ионозонда, так и широкополосного радиоспектрометра, работающего как в пассивном, так и в активном режиме релаксационного зонда

6.6. Широкий набор режимов работа (9 режимов) ионозонда ЛАЭРТ позволяет обеспечивать проведение различных космических экспериментов, в том числе трансионосферное и обратное трансионосферное зондирования, синхронизацию двух аппаратов и проводить взаимное трансионосферное зондирование между спутниками, работы на фиксированной частоте при экспериментах с нагревным стендом и пр.

Гибкость работы прибора позволила за короткое время получить большое количество новой научной информации, в том числе во время геомагнитных бурь. Эти результаты отражены в представленных на конкурс публикациях.

7. Полученные результаты и их значимость

Полученные результаты можно расположить в порядке описанных в разделе 5 задач.

В работах 1 и 3 были рассмотрены результаты по функциональному соответствию параметров ионозонда ЛАЭРТ поставленным техническим требованиям. Все четыре прибора на спутниках Ионосфера-М №1-4 подтвердили высокую надежность и возможность непрерывной работы во всех предусмотренных режимах. Они с первых дней работы показали возможность их использования для глобального оперативного мониторинга ионосферы в интересах Росгидромета. Система из непрерывно работающих 4-х спутников вывела Россию на одно из первых мест в мире по организации глобального мониторинга ионосферы Земли.

К неожиданным результатам можно отнести широкий диапазон вариаций электронной концентрации: были зарегистрированы как концентрации порядка $2 \cdot 10^2$ эл/см^3 вплоть до порядка 10^7 эл/см^3, что выходило за пределы диапазона рабочих частот ионозонда 0.1 - 20 МГц. Еще одним неожиданным результатом оказалось, что вблизи геомагнитного экватора высота максимума электронной концентрация достаточно часто превосходит высоту орбиты спутника Ионосфера-М. Все эти результаты получены впервые.

Была установлена исключительно высокая активность формирования плазменных пузырей и эффекта F-рассеяния в экваториальной ионосфере на вечерних витках спутников Ионосфера-М №1 и №2 (21 LT).

В работе 4 была показан возможность мониторинга аврорального овала путем регистрации низкочастотных шумов свистового диапазона $f<f_{ce}$, а также определения питч-угла высыпающихся частиц по форме спектра этих излучений.

Был получен большой объем данных по различным типам плазменных волн, регистрируемых в окрестности спутника. в том числе возбуждаемых импульсами передатчика ионозонда плазменных резонансов, а их соотношение используется для автоматической оцифровки ионограмм при определении частот обрезания.

Получены оригинальные результаты по динамике ионосфера во время сильных геомагнитных бурь 11-14 ноября 2025 г. и 19-20 января 2026 г. (работы 5 и 7 и доклад на Ассамблее КОСПАР в августе 2026 г). В частности, для ноябрьской бури была обнаружена сильная асимметрия реакции северного и южного полушарий. Но если в данных по полному электронному содержанию (работа 7) была обнаружена положительная аномалия в северном полушарии, то в максимуме слоя F при явно асимметрии не было зарегистрировано увеличение электронной концентрации, что говорит о вздутии внешней ионосферы во время бури.

Во время январской бури было зарегистрировано аномальное увеличение электронной концентрации в северном горбе экваториальной аномалии. когда критическая частота превысила 20 МГц – верхний предел частотного диапазона ионозонда ЛАЭРТ.

Во время январской бури 19 января наблюдалось практически полное разрушение среднеширотной ионосферы, при котором главный ионосферный провал переместился на широту 40°, а далее следовал непрерывный ряд плазменных пузырей вплоть до средних широт южного полушария.

Количество полученных результатов можно перечислять довольно долго, но в данном случае сошлемся на работу 2, которая является наиболее полным обзором результатов полученных с помощью ионозондов ЛАЭРТ в течение первого года штатной работу спутниковой группировки «Ионозонд».