1. **Автор**

А.А. Чернышов, С.А. Пулинец, Д.В. Чугунин, М.А. Евдокимова, М.М. Могилевский.

2. **Название**

Эффекты ВЧ-нагрева, наблюдаемые снизу и сверху: первые результаты совместного эксперимента СУРА–Ионосфера-М

3. **Ссылки на публикацию**

A.A. Chernyshov, A.M. Padokhin, S.M. Grach, D.A. Kogogin, A.V. Shindin, S.A. Pulinets, I.A. Nasyrov, A.B. Beletsky, I.D. Tkachev, J.K. Legostaeva, D.V. Chugunin, M.A. Evdokimova, G.A. Kurbatov, K.G. Tsybulya, A.E. Solin, A.V. Shchennikov, E.V. Tareeva, V. V. Emelyanov, M.M. Mogilevsky HF Heating Effects as Seen From Below and Above: First Results of Joint SURA–Ionosfera-M Experiment. *Geophysical Research Letters,* 2026, Vol. 53, e2026GL123503. DOI: 10.1029/2026GL123503

https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2026GL123503

4. **Общая формулировка научной проблемы и её актуальность**

Мощное высокочастотное (ВЧ) воздействие на ионосферу является эффективным инструментом для экспериментального исследования нелинейных процессов в ионосферной плазме. Взаимодействие мощного ВЧ-излучения с плазмой приводит к комплексу взаимосвязанных явлений: нагреву электронов, развитию плазменных неустойчивостей и неоднородностей, генерации электромагнитных волн, изменению электронной концентрации, появлению искусственного свечения атмосферы и формированию каналов распространения волн вдоль магнитного поля Земли. При этом физическая картина воздействия имеет как локальные, так и пространственно протяжённые проявления.

Одной из важных нерешённых задач является получение целостной картины пространственно-временного развития возмущений, возникающих при ВЧ-нагреве. Наземные методы диагностики - ионозонды, оптические системы, радиоприёмники и ГНСС - обеспечивают высокое временное разрешение, однако дают ограниченную информацию о пространственной структуре возмущённой области. Спутниковые измерения, напротив, позволяют непосредственно исследовать плазму на больших высотах и получать данные «сверху», но возможны только при пролёте спутника через возмущённую магнитную силовую трубку. Поэтому совместное применение наземных и спутниковых средств является принципиально важным для установления связи между процессами в области нагрева и их распространением в верхнюю ионосферу. Актуальность работы определяется также развитием российского проекта «Ионосфера-М», спутники которого оснащены комплексом инструментов для одновременного исследования электронной концентрации, радиоволн, электромагнитных полей и других характеристик ионосферы. В рассматриваемой работе впервые реализована возможность сопоставить результаты наземных наблюдений комплекса СУРА с непосредственными измерениями спутника «Ионосфера-М» при прохождении над областью искусственного воздействия.

## 5. Конкретная решаемая в работе задача и её значение

Основной задачей работы являлось комплексное исследование реакции ионосферной плазмы на мощный ВЧ-нагрев с одновременным использованием наземных и спутниковых измерений. Исследование выполнено в рамках первого научного совместного эксперимента СУРА–Ионосфера-М, проведённого 20 августа 2025 г. В эксперименте установка СУРА осуществляла нагрев ионосферы в направлении магнитного зенита. Частота накачки составляла 5350 кГц, эффективная излучаемая мощность около 150 МВт. В момент пролёта спутника «Ионосфера-М2» над стендом использовались бортовые приборы Маяк, ЛАЭРТ и НВК, а на Земле проводились ионозондовые, оптические и радио измерения. В работе решались несколько взаимосвязанных задач: определение пространственного положения области искусственного свечения и уменьшения электронной концентрации; исследование проникновения энергии ВЧ-накачки в верхнюю ионосферу; выявление изменений низкочастотных электромагнитных полей; сравнение данных наземного и спутникового зондирования; а также анализ механизмов генерации наблюдаемых волн и плазменных возмущений. Значение этой задачи заключается в возможности связать наблюдаемые на разных высотах эффекты в единую физическую картину и непосредственно проследить распространение последствий ВЧ-нагрева от области взаимодействия в F-слое до верхней ионосферы.

## 6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

Ключевой особенностью исследования является одновременное применение нескольких независимых методов диагностики, расположенных как под областью нагрева, так и выше неё. На спутнике «Ионосфера-М2» использовались:

Маяк — для определения вариаций полного электронного содержания (ПЭС) по сигналам на частотах 150 и 400 МГц;

ЛАЭРТ — для вертикального радиозондирования и регистрации спектра в диапазоне 0,1–20 МГц;

НВК — для измерения электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в диапазоне 10 Гц–23 кГц.

Наземная диагностика включала ионозонд КАДИ, измерение стимулированного электромагнитного излучения (SEE), оптические CCD-камеры и трёхканальный фотометр. Оптические наблюдения проводились в линиях атомарного кислорода 630 и 557,7 нм, а также в полосах молекулярного азота 391,4 и 427,8 нм.

Новизна работы состоит прежде всего в одновременном пространственно-временном сопоставлении наземных и спутниковых наблюдений в условиях искусственно возмущённой ионосферы. Сравнение результатов наземного КАДИ и бортового ЛАЭРТ ионозондов в искусственно возмущённой ионосфере выполнено впервые. Такой подход позволяет не только зарегистрировать сам факт изменения параметров плазмы, но и определить взаимное расположение области искусственного свечения, области уменьшения электронной концентрации,

области воздействия антенны и канала проникновения энергии в верхнюю ионосферу.

## 7. Полученные результаты и их значимость

В результате эксперимента установлено, что область искусственного свечения, уменьшения электронной концентрации и проникновения энергии ВЧ-накачки в верхнюю ионосферу пространственно связаны и формируются преимущественно в направлении магнитного зенита. По данным двух CCD-камер высота источника искусственного свечения в красной линии 630 нм составила примерно 300–305 км, а его медианная яркость достигала около 12,5 R.

По данным Маяка обнаружено уменьшение ПЭС в области ВЧ-воздействия, наиболее выраженное у южной границы диаграммы направленности стенда СУРА вблизи магнитного зенита. Амплитуда локального уменьшения достигала около 0,5 TECU, а относительное изменение вертикального ПЭС оценено примерно в 5%. При этом область уменьшения ТЕС пространственно совпадала с областью искусственного свечения.

ЛАЭРТ зарегистрировал сигнал частоты ВЧ-накачки 5350 кГц в верхней ионосфере, несмотря на то, что нагрев осуществлялся в режиме, когда частота накачки была ниже критической частоты F2. Это свидетельствует о проникновении энергии накачки выше области её обычного отражения. Возможные механизмы такого распространения: преобразование O–Z–O-мод и распространение L-моды.

Особенно важным результатом стали наблюдения прибора НВК. В электрическом и магнитном полях зарегистрированы компоненты около 8–9 и 17–18 кГц, соответствующие нижнегибридной частоте и её второй гармонике на высоте взаимодействия. Согласованное поведение электрической и магнитной компонент указывает на волны свистящего диапозона (whistler mode). Их возникновение связано с параметрическим распадом ВЧ-волны и последующим преобразованием нижнегибридных волн в электромагнитные свистящие волны, распространяющиеся вдоль геомагнитного поля до высот спутника. Кроме того, спутниковые измерения выявили в возмущённой области структуру, сходную с главным ионосферным провалом, что свидетельствует о существенном перераспределении плазмы под воздействием нагрева.

Таким образом, показано, что совместный эксперимент Сура–Ионосфера-М позволяет одновременно исследовать оптические, радиофизические и плазменные проявления искусственного воздействия на ионосферу и прослеживать их от области взаимодействия на высотах около 250-300 км до верхней ионосферы. Полученные результаты уточняют пространственную структуру возмущённой области, подтверждают связь между уменьшением электронной концентрации и искусственным свечением, демонстрируют проникновение ВЧ-энергии в верхнюю ионосферу и впервые для подобных условий обеспечивают прямое сопоставление наземного и спутникового радиозондирования.