

## **Нагревный стенд СУРА в 2022 году: итоги модернизации и новые перспективы**

А.В. Шиндин

*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*  
603022, г.Нижний Новгород, пр.Гагарина, 23.  
E-mail: [shindin@rf.unn.ru](mailto:shindin@rf.unn.ru)

*Созданный в 1981 г., стенд СУРА на сегодняшний день является единственной среднеширотной нагревной установкой в мире. Стенд используется для проведения исследований по генерации искусственной ионосферной турбулентности, возбуждению искусственного радиоизлучения ионосферы, параметрической генерации низкочастотных волн, управления радиотрассами, а также отработки методов активной диагностики околоземной плазмы и радиозондирования. В 2020-2021 гг. стенд прошел ремонт и модернизацию. Особое внимание было уделено системе управления передатчиками стенда и созданию новых диагностических средств. Сегодня СУРА – это установка, которая обеспечит сохранение ведущих позиций отечественной науки в области активного ионосферного эксперимента в ближайшие 5 – 10 лет.*

*Ключевые слова: стенд СУРА; ионосфера; короткие радиоволны; диагностика ионосферных возмущений; ионосферная турбулентность; фазированная антенная решетка.*

### **“Sura” heating facility in 2022: results of modernization and new prospects**

A.V. Shindin

*Lobachevsky University.*

*Built in 1981, the “Sura” facility is currently the only medium-latitude heating facility in the world. The facility is used to conduct research on the generation of artificial ionospheric turbulence, the excitation of artificial ionospheric radio emission, the parametric generation of low-frequency waves, the control of radio paths, as well as the development of methods for active diagnostics of near-Earth plasma and radio sounding. In 2020-2021 the facility has been renovated and upgraded. Particular attention was paid to the transmitter control system and the creation of new diagnostic tools. Today, “Sura” is facility that will ensure the preservation of the leading positions of domestic science in the field of active ionospheric experiment in the next 5-10 years.*

*Keywords: “Sura” facility; ionosphere; short radio waves; formulas; diagnostics of ionospheric disturbances; ionospheric turbulence; phased antenna array.*

### **Введение**

Систематические исследования эффектов взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферой начали проводиться с начала 1970-х годов на специализированных установках США в Платтевилле (Боулдер, штат Колорадо) и Аресибо (о. Пуэрто-Рико), а также в СССР (НИРФИ, полигон «Зименки»). Практически сразу стало ясно, что для установления картины наблюдаемых физических явлений и их использования требуется строительство более мощных стендов. В 1980-1981 годах были созданы сразу две установки, авроральный нагревный стенд EISCAT (Тромсё, Норвегия) и среднеширотный нагревный стенд СУРА. Позднее,

в 2000-х, США запустили самую мощную на сегодня нагревную установку – стенд НААРР.

Стенд СУРА – единственный действующий среднеширотный нагревный стенд мира, это крупнейший проект НИРФИ (в настоящее время входит в состав ННГУ им. Н.И. Лобачевского). Научное руководство созданием стенда СУРА осуществлял директор НИРФИ Г.Г. Гетманцев, непосредственно строительством руководил В.И. Морозов. Начальником полигона «Васильсурск», а позднее руководителем лаборатории был Ю.В. Токарев. Разработка фазированной антенной решетки (ФАР) нагревного стенда проведена И.Ф. Беловым, реализовал конструкцию антенны Д.М. Козицын. Акт ввода стенда в эксплуатацию был подписан в феврале 1981 года: в 2021 году нагревному стенду СУРА исполнилось 40 лет.

### **Описание стенда и направлений исследований**

Стенд СУРА находится в Нижегородской области вблизи границы с Республикой Марий Эл, к востоку от рабочего посёлка Васильсурск. Координаты стенда 56,13 с.ш., 46,10 в.д., магнитное склонение 71°. Нагревная установка состоит из трехсекционной антенны и трех передатчиков ПКВ-250 номинальной мощностью 250 кВт каждый. Каждый передатчик работает на свою секцию антенны. Общий размер антенного поля 300 × 300 м (рис. 1). Антенное поле состоит из 144 элементов ФАР, поднятой на мачтах высотой 22 м (рис. 2), пространственный период ФАР составляет 25 метров. Передатчики могут работать как синфазно, так и независимо. Сканирование луча возможно в плоскости магнитного меридиана в диапазоне углов ±40 градусов. Рабочий диапазон частот ФАР от 4,5 до 9,0 МГц. ФАР нагревной установки может использоваться не только на передачу, но и на прием волн обыкновенной и необыкновенной поляризации. В режиме приема ФАР является низкочастотным радиоастрономическим инструментом с уникальными характеристиками.



**Рис. 1. Вид на ФАР стенда СУРА на фоне реки Волга**

Кроме ФАР нагревной установки, на полигоне развернуто еще несколько антенных полей. К ФАР примыкает приемо-передающая антенна передатчика пробных волн АИС, рассчитанная на диапазон 4 – 8 МГц. Размер антенного поля АИС 50 × 50 м, широкополосные уголкового вибраторы растянута на мачтах высотой 22 м. Для активной волновой диагностики ионосферы применяется приемо-передающая антенна в северной части полигона, которая представляет собой синфазную горизонтальную решетку размером 126 × 126 м, подвешенную на 12 мачтах высотой 16 м. Каждой из двух линейных поляризации соответствует по 12 излучателей. Каждый излучатель состоит из трех диполей разной длины, соединенных параллельно, благодаря чему антенна имеет три резонансных частоты: 2,95; 4,6; 5,7 МГц. Отдельно размещаются

передающая и приемные антенны станции вертикального зондирования ионосферы CADI, прямо-передающая антенна станции наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы. Все перечисленное антенное оборудование формирует комплекс инструментов волновой диагностики ионосферы в диапазонах средних и коротких волн, используемый для пассивных измерений и при активных воздействиях с использованием нагревной установки.

На стенде СУРА проводятся исследования по следующим направлениям:

- генерация искусственной ионосферной турбулентности F-области, развитие стрикционной и тепловой параметрической неустойчивости ионосферной плазмы в поле мощной радиоволны;
- генерация искусственного радиоизлучения ионосферы;
- исследование оптического и микроволнового излучения ионосферы, модифицированной мощными радиоволнами;
- параметрическая генерация низкочастотных волн при воздействии на ионосферу модулированными пучками КВ излучения, в том числе – при наличии естественных ионосферных токовых систем (эффект Гетманцева);
- развитие методов диагностики ионосферы и мезосферы методами обратного рассеяния, в том числе рассеяния на искусственных периодических неоднородностях (ИПН);
- исследование диагностических возможностей и приложений эффектов ракурсного рассеяния радиоволн на искусственных ионосферных неоднородностях;
- исследование искусственных ионосферных неоднородностей методами радиопросвечивания в диапазоне от СДВ до УКВ с использованием передатчиков и приемников спутникового базирования, включая радиотомографию;
- контролируемые воздействия на факторы космической погоды и радиосвязь;
- радиолокационные исследования магнитосферы и объектов ближнего космоса;
- радиоастрономические наблюдения.



**Рис. 2. Антенное поле стенда СУРА.**

В последние годы на стенде СУРА были получены следующие важнейшие результаты:

- с использованием аппаратуры ИСЗ DEMETER, SWARM, CSES, NorSat при пролетах над нагревной установкой, а также радиотомографическими методами по

сигналам GPS исследованы характеристики разномасштабных возмущений ионосферной плазмы, модифицированной пучком мощных радиоволн [1,2];

– бортовой аппаратурой ИСЗ SWARM над пятном нагрева стенда СУРА обнаружены продольные токи, предположительно обусловленные униполярным термодиффузионным переносом плазмы в модифицированной мощным КВ излучением магнитной трубке [3];

– обнаружена новая компонента искусственного радиоизлучения ионосферы (IDM – intermediatedownshiftedmaximum) [4];

– по результатам одновременной регистрации полного электронного содержания и искусственного оптического свечения ионосферы установлено, что свечение происходит из областей пониженной концентрации плазмы [5];

– в результате систематических наблюдений искусственного оптического свечения на стенде СУРА обнаружено, что свечение в красной линии при различных углах наклона диаграммы направленности стенда к югу наблюдается в направлении магнитного зенита вне зависимости от угла наклона диаграммы [6];

– предложен новый метод определения уровня турбопаузы, основанный на анализе высотной зависимости времени релаксации сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями ионосферной плазмы (ИПН), в разных гелиогеофизических условиях; выявлен волновой характер турбопаузы [7,8].

– в нагревных воздействиях на мезосферу подтверждено значительное (до 20%) уменьшение интенсивности излучения атмосферы в линии озона, предположительно обусловленное увеличением коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода во время сеансов работы нагревной установки [9].

### **Модернизация стенда СУРА в 2020-2021 гг.**

За несколько десятилетий непрерывной эксплуатации многие технические параметры стенда СУРА были утрачены. К началу 2020 года пришло в неудовлетворительное состояние антенное поле нагревной установки; было нарушено штатное функционирование высоковольтного распределительного устройства, сроки службы высоковольтных кабелей питания истекли. Существенной проблемой явилось старение инфраструктуры стенда – зданий павильона передатчиков, лабораторного и хозяйственного корпусов, систем отопления, бытового электро- и водоснабжения.

В апреле 2020 года ННГУ им. Н.И. Лобачевского был получен грант Министерства образования и науки Российской Федерации на восстановление и модернизацию, повышение надежности оборудования стенда СУРА. В июне 2020 года на полигоне «Васильсурск» начались работы, сопоставимых с которыми по масштабу не было с момента строительства нагревного стенда. Подрядчикам были поставлены задачи по очистке территории от леса и поросли, восстановлению конструктивных элементов ФАР, обследованию и ремонту высоковольтных систем питания передатчиков ПКВ-250, проведению работ по капитальному и декоративному ремонту пяти зданий полигона, замене коммуникаций, созданию современных систем информатизации и безопасности стенда СУРА.

Одной из важнейших работ стал ремонт поляризаторов ФАР, выполненных как открытая система направленных ответвителей на двойных линиях и линий задержки, которая занимает территорию более половины гектара. Поляризаторы, отвечающие за формирование диаграммы направленности антенного поля и качание луча, за 40 лет эксплуатации пришли в негодность из-за износа деревянных опор и старения изоляторов. В ходе проводившихся с конца июля до начала ноября работ были полностью заменены опоры и несущие конструкции поляризаторов, системы алюминиевых шин (192 штуки, длина каждой – около 11 м) были отремонтированы,



укреплены и собраны с новыми изоляторами и креплениями, изготовленными, для долговечности, из нержавеющей стали (рис. 3).



а)



б)

**Рис. 3. Поляризаторы ФАР стенда СУРА после реконструкции (панель а) и новое оборудование системы высоковольтного питания передатчиков (панель б).**

В ходе модернизации инфраструктуры стенда выполнена полная замена высоковольтного коммутационного и защитного оборудования в системе электропитания передатчиков, включая ячейки КСО (рис. 3) и кабельные перемычки. Проложены в земле новые кабели высоковольтного питания между закрытым распределительным устройством (ЗРУ) и передатчиками ПКВ-250; закуплена новая трансформаторная подстанция. Выполнен капитальный ремонт павильона передатчиков, включая перекладку аварийной стены, замену оконных блоков и кровли. В двухэтажном лабораторном корпусе устроена новая кровля, заменены все окна и входные группы, утеплен фасад, произведен полный внутренний ремонт с заменой систем отопления, водоснабжения и канализации, включая коммуникации вне здания. Капитально отремонтированы павильон АИС и хозяйственный корпус. На территории полигона установлена система видеонаблюдения с центральным пультом, организован канал ЛВС. С антенного поля удалены деревья и поросль, поле обработано гербицидом. Изношенные деревянные опоры фидерных линий заменены на новые; проведен профилактический ремонт антенного полотна.

В конце 2021 года закуплены комплектующие и расходные материалы для передатчиков, что должно обеспечить надежную и бесперебойную работу нагревного стенда на протяжении нескольких лет.

### **Перспективы дальнейшего использования стенда СУРА**

На сегодняшний день стенд СУРА – единственная в России специализированная установка для активного волнового воздействия на ионосферу. Срок исправной работы нагревной установки при надлежащем обслуживании передатчиков и антенного поля составляет еще не менее 10 лет. На ближайшие годы стенд СУРА является единственным инструментом нагрева ионосферы, который может быть включен в научные программы отечественных спутниковых исследований, в первую очередь, запускаемых в 2022–2023 гг. низкоорбитальных КА «Ионосфера» с комплексами научной аппаратуры на борту. Стенд СУРА следует рассматривать как площадку для отработки различных методик и инструментов, и, главное, передачи знаний новому поколению исследователей в области активных воздействий на ионосферу. Сложившееся в НИРФИ сообщество специалистов по КВ нагреву ионосферы – уникально, накопленный ими опыт – бесценен.

Иницированы работы, направленные на возвращение стенду СУРА статуса уникального радиоастрономического инструмента в КВ диапазоне: необходимо обеспечить качество ФАР, требуемое для ее использования при радиоастрономических наблюдениях в качестве приемной антенны, полностью или частично, в диапазоне 4 – 9 МГц при активном зондировании космических объектов (КА, поверхность Луны), а также при измерениях космического фона.

### **Выводы**

Нагревный стенд СУРА в результате выполненных работ по ремонту и модернизации выведен на свои проектные параметры, и в настоящее время может использоваться для решения широкого круга задач, связанных с воздействием на ионосферу пучков КВ излучения на уровне эффективной мощности до 200-300 МВт. Производится обновление приборного парка полигона «Васильсурск», развивается техническая инфраструктура, создаются современных условий для работы и проживания специалистов. Срок службы стенда СУРА продлен не менее чем на 10 лет.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФ№21-72-10131.*

### **Литература**

1. Zhang, X., V. Frolov, C. Zhou et al. Plasma perturbations HF-induced in the topside ionosphere // J. Geophys. Res. Sp. Phys., 121, 2016, doi: 10.1002/2016JA022484.
2. Chernyshov, A. A., D. V. Chugunin, V. L. Frolov et al. In situ observations of ionospheric heating effects: First results from a joint SURA and NorSat-1 experiment // Geophys. Res. Lett., 47, doi: 10.1029/2020GL088462, 2020.
3. Lukianova, R., V. Frolov, A. Ryabov. First SWARM observations of the artificial ionospheric plasma disturbances and field-aligned currents induced by the SURA power HF heating // Geophys. Res. Lett., 46, doi: 10.1029/2019GL085833, 2019.
4. Grach, S. M., E. N. Sergeev, E. V. Mishin et al. Intermediate downshifted maximum of stimulated electromagnetic emission at high-power HF heating: A new twist on an old problem // J. Geophys. Res. Sp. Phys., 120, doi: 10.1002/2014JA020423, 2015.
5. Grach, S. M., I. A. Nasyrov, D. A. Kogogin et al. Mutual allocation of the artificial airglow patches and large-scale irregularities in the HF-pumped ionosphere // Geophys. Res. Lett., 45, doi: 10.1029/2018GL080571, 2018.
6. Grach, S. M., E. N. Sergeev, E. V. Mishin, A. V. Shindin Dynamic properties of ionospheric plasma turbulence driven by high-power high-frequency radiowaves // Phys. Usp., 59, doi: 10.3367/UFNe.2016.07.037868, 2016.
7. Tolmacheva, A. V., N. V. Bakhmetieva, G. I. Grigoriev, M. N. Egerev. Turbopause range measured by the method of the artificial periodic irregularities // Adv. Sp. Res., 64, doi: 10.1016/j.asr.2019.05.002, 2019.
8. Bakhmetieva, N. V., G. I. Grigoriev, A. V. Tolmacheva, I. N. Zhemyakov. Investigations of atmospheric waves in the Earth lower ionosphere by means of the method of the creation of the artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma // Atmosphere, 10, doi: 10.3390/atmos10080450, 2019.
9. Bakhmetieva, N. V., Yu. Yu. Kulikov, I. N. Zhemyakov. Mesosphere ozone and the lower ionosphere under plasma disturbance by powerful high-frequency radio emission // Atmosphere, 11, doi: 10.3390/atmos11111154, 2020.