

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУ «АНИИ»
д.г.н., проф. РАН  А.С. Макаров
«16»  2026 г.



ОТЗЫВ

Ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»
(ФГБУ «АНИИ»)
на диссертационную работу

Семеновй Надежды Александровны

«Моделирование распространения КВ радиоволн в магнитоактивной плазме в задачах исследования характеристик ионосферных возмущений»

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Диссертационная работа Семеновй Надежды Александровны посвящена моделированию распространения радиоволн КВ диапазона лучевым методом при исследовании естественных и искусственных ионосферных возмущений. Несмотря на развитие радиотехнических средств наземного и космического базирования УКВ диапазона, КВ диапазон активно используются в системах связи, радиолокации и навигации. Внедрение новых протоколов связи и цифровой обработки сигналов послужило импульсом для дальнейшего развития радиотехнических систем декаметрового диапазона. Помимо этого, волны КВ диапазона широко используются и в средствах дистанционной диагностики параметров околоземного космического пространства. Основной проблемой КВ радиосвязи является нестационарность ионосферного канала, который подвержен воздействию факторов естественного и искусственного происхождения. Воздействие космической погоды проявляется в виде замираний, внезапной девиации частоты и аномального ослабления сигнала, отклонении траектории распространения от дуги большого круга.

В настоящее время интенсивно развиваются исследования по искусственному воздействию на ионосферу мощным КВ радиоизлучением специальных наземных станций. Подобные широкомасштабные исследования выполняются на нагревных станциях Сура (пос Васильсурск, Нижегородская обл.), HAARP (Аляска, США) и EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия). Волна накачки (ВН) станции при взаимодействии с ионосферной плазмой вызывает генерацию разнообразных нелинейных явлений в искусственно возмущенной области ионосферы, таких как:

возбуждение поперечных (верхних гибридных и нижних гибридных плазменных волн) и продольных (ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн), изменения температуры и концентрации электронов, искусственного радио- и оптического излучения ионосферы, генерацию искусственных мелкомасштабных магнито-ориентированных неоднородностей (ММН) и т.д.

Для понимания ионосферных процессов естественного и искусственного происхождения с использованием радиофизических средств диагностики необходима детальная информация о фоновом состоянии среды, а также проведение расчетов траекторий распространения декаметровых радиоволн, что позволяет определить характеристики сигналов для последующего их сопоставления с результатами наблюдений. Для этого требуется программное обеспечение, позволяющее производить расчет лучевых траекторий с последующим извлечением, накоплением и сортировкой параметров радиосигналов в каждой точке лучевой траектории, как временная задержка, направление волнового вектора и т.д. В связи с этим, тема исследований диссертационной работы представляется несомненно актуальной и практически значимой.

Целью работы является применение траекторных расчетов для интерпретации данных экспериментов по воздействию на F-область ионосферы мощными КВ радиоволнами обыкновенной (О-мода) поляризации и по развитию исследований характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на основе сопоставления экспериментальных данных и результатов моделирования.

К наиболее значимым результатам, полученным Н.А. Семеновым в диссертационной работе, на наш взгляд, относятся следующие:

1. Интерпретация эффекта уменьшения интенсивности ИРИ при частотах ВН ниже четвертой гармоники электронной циклотронной частоты ($f_0 \leq 4f_{ce}$) по сравнению со случаем $f_0 \geq 4f_{ce}$ при увеличении угла наклона центрального луча диаграммы направленности (ДН) станда «Сура» от вертикали на юг в плоскости магнитного меридиана.

2. Объяснение эффекта «зеркального магнитного зенита» в поведении ИРИ при наклоне диаграммы направленности станда Сура на 14° на север относительно вертикали..

3. Результаты исследования положения пятна искусственного оптического свечения при вертикальном и наклонном (12° на юг) излучении ВН станда Сура.

4. Развитие методики определения местоположения и характеристик искусственных мелкомасштабных магнито-ориентированных неоднородностей (ММН) в F-области ионосферы, ответственных за обратное и ракурсное рассеяние диагностических сигналов на коротких радиотрассах. .

5. Результаты исследования параметров ПИВ, регистрируемых в эксперименте по одновременному наклонному зондированию на нескольких слабо наклонных трассах, а также в эксперименте на протяженной трассе Кипр–Нижний Новгород, которые дополняют имеющиеся данные по характеристикам ПИВ.

Результаты, полученные Н.А. Семеновым при выполнении диссертационной работы, полезны при интерпретации данных экспериментов по воздействию на ионосферу мощным КВ радиоизлучением. Разработанное программное обеспечение и методика позволяют определить положение и характеристики искусственного радиоизлучения и оптического свечения ионосферы, а также мелкомасштабных искусственных неоднородностей ионосферы, а также применима и к задаче определения характеристик ПИВ с учетом динамики их движения.

Результаты работы могут быть востребованы при решении задач функционирования систем радиосвязи в условиях естественной и искусственной турбулентности ионосферы.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертации, подтверждается использованием современных подходов к постановке и проведению экспериментов, корректностью применения метода геометрической оптики для описания распространения КВ радиоволн в плавно-неоднородной среде, сходством выбора моделей перемещающихся ионосферных возмущений с моделями, используемыми другими авторами.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 научных работах, из которых 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК и цитируемых на платформах Web of Science и Scopus, а также докладывались на 10 российских и международных конференциях.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения.

В **Главе 1** приводится методика расчетов лучевых траекторий в магнитоактивной ионосферной плазме в приближении геометрической оптики. Представлена система уравнений для расчета лучевых траекторий в плоскостной среде в декартовой и в трехмерной сферической системе координат. Приведены примеры численного моделирования распространения радиоволн декаметрового диапазона в ионосфере, проанализированы особенности лучевых траекторий обыкновенной волны при различных углах падения на ионосферу и наличии неоднородностей электронной концентрации.

В **Главе 2** приведены результаты моделирования распространения волны накачки обыкновенной поляризации для интерпретации результатов измерений ИРИ на стендах Сура и НААРР. Результаты расчетов позволили интерпретировать наблюдаемые особенности спектра ИРИ вблизи 4-й электронной гирогармоники и положения пятна искусственного оптического свечения на небосводе.

Показано, что при частоте волны накачки стенда Сура ниже частоты четвертой электронной гирогармоники $f_0 \leq 4fce$ интенсивность ИРИ уменьшается по сравнению со случаем $f_0 \geq 4fce$ при увеличении угла наклона центрального луча ДН стенда «Сура» от вертикали на юг от 14° до 18° в плоскости магнитного меридиана.

Продемонстрировано, что в эксперименте на стенде НААРР максимальная интенсивность всех компонент в спектре ИРИ, наблюдалась при излучении ВЧ в магнитный зенит. При северных наклонах ДН слабый эффект усиления ИРИ соответствует «зеркальному магнитному зениту».

Показано, что смещение к северу пятна искусственного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода ($\lambda = 630$ нм), зарегистрированного в экспериментах на стенде Сура, связано с увеличением высоты области плазменного резонанса и высыпанием ускоренных плазменными волнами электронов вниз вдоль магнитного поля до высот наиболее эффективного возбуждения свечения.

Получены результаты исследования влияния крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации на положение пятна свечения в красной линии атомарного кислорода. Показана возможность захвата волны накачки в вытянутые вдоль магнитного поля крупномасштабные неоднородности с пониженной электронной плотностью (дакты). Наиболее эффективный захват имеет место при расположении неоднородности в области магнитного зенита (МЗ), что вызывает смещение пятна свечения на юг. Полученные результаты демонстрируют возможность применения измерений характеристик пятен оптического свечения для диагностики

крупномасштабных неоднородностей.

В **Главе 3** проведено сопоставление результатов экспериментов по ракурсному рассеянию радиосигналов, выполненных на нагревном стенде «Сура» на короткой трассе возвратно-наклонного зондирования Казань–Васильсурск–Казань с результатами моделирования лучевых траекторий зондирующих и рассеянных сигналов. Полученные результаты позволили определить положение и размер искусственно-возмущенной области, ответственной за ракурсное рассеяние сигналов, характерные масштабы МИИН и их динамику поведения в зависимости от высоты возбуждения и времени суток. По ионограммам возвратно-наклонного зондирования определены зависимости характерных поперечных геомагнитному полю размеров МИИН (в интервале от 42 до 195 м), ответственных за ракурсное рассеяние волн данного диапазона, и положения области рассеяния от частоты зондирующих сигналов.

В **Главе 4** представлены результаты исследований характеристик ПИВ, полученные посредством сопоставления данных наблюдения на трассах наклонного зондирования и моделирования лучевым методом. Параметры моделирования распространения КВ радиоволн подбирались по наилучшему совпадению расчетных дистанционно-частотных характеристик с экспериментально зарегистрированными на трассах наклонного зондирования ионосферы. Полученные результаты позволили оценить размеры, азимут направления перемещения и величину скорости ПИВ

Несмотря на общее положительное впечатление, работа Семеновой Н.А. не лишена недостатков.

1. На основе проведенных исследований утверждается, что поперечный масштаб магнитоориентированных мелкомасштабных неоднородностей (ММН), ответственных за ракурсное рассеяние диагностических сигналов в диапазоне 2 - 7 МГц, составляет $\sim 40 - 200$ м. Учитывая, что минимальная частота нагрева на стенде Сура имеет величину $f_0 = 4.3$ МГц, максимальный поперечный размер ММН, который может возбуждаться во время экспериментов вследствие тепловой параметрической (резонансной) неустойчивости, не должен превышать $l_{\perp} \approx c / f_0 \approx 70$ м. А каким образом создаются искусственные ММН с более крупными масштабами при используемых в рассматриваемых экспериментах на стенде Сура частотах волны накачки?

2. В разделе 2.1.2, где рассмотрена зависимость интенсивности ИРИ от угла наклона диаграммы направленности стенда HAARP к вертикали, утверждается, что возбуждение ленгмюровских волн оказывается сильно подавленным, т.к. большая часть энергии ВН поглощается ниже области их эффективного возбуждения. Как следствие, ленгмюровские волны не дают вклада в ИРИ при длительных нагревах. Это утверждение не верно. Эксперимент на стенде HAARP выполнялся при высокой эффективной мощности излучения Рэфф ≈ 1500 и 1800 МВт. В экспериментах на стенде EISCAT/Heating по данным прямых измерений на радаре некогерентного рассеяния радиоволн было показано (Blagoveshchenskaya et al., JGR, 2020), что воздействие мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации на F-область ионосферы при высоких эффективных мощностях излучения (Рэфф $> 350 - 400$ МВт) приводит к возобновлению генерации ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн при длительных нагревах (несколько минут), сосуществующих одновременно с ММН.

Отмеченные недостатки не снижают значимости диссертационной работы, в которой проведены результаты интерпретации экспериментальных исследований ионосферной турбулентности естественного и искусственного характера, полученные на основе моделирования распространения радиоволн КВ диапазона лучевым методом. Таким образом, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, в котором содержится новое решение актуальных задач, важных в теоретическом и практическом планах. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.4. Радиофизика. Работа соответствует критериям, установленным требованиями действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013г (ред. от 25.01.2024 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Соискатель, Семенова Надежда Александровна, достойна присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Диссертация заслушана на семинаре отдела геофизики ФГБУ «ААНИИ» 16 апреля 2026 г., отзыв обсуждался на семинаре 16 апреля 2026 г.

Отзыв составили:

Зав. лаб. радиофизических исследований – глав. науч. сотр. отдела геофизики ФГБУ «ААНИИ», д.ф.-м.н. по специальности 01.03.03 – физика Солнца

195276 г. Санкт-Петербург, ул. Руставели, д.4, кв.35
тел.8(812) 298 1475, E-mail: nataly@aari.nw.ru

Председатель семинара отдела геофизики, зав. отделом – вед. науч. сотр. ФГБУ «ААНИИ», канд. тех. наук. по специальности 05.13.01 – Системный анализ и обработка информации (в технике и технологии)

188800, г. Выборг, пр. Победы, д. 4а, кв. 45
тел. 8(812) 337 3134, E-mail: askalishin@aari.ru

Я, Благовещенская, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.
«16» апреля 2026 г.

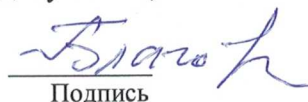
Н.Ф. Благовещенская



А.С. Калишин



Я, Калишин А.С., даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.
«16» апреля 2026 г.



Подпись



Подпись

Сведения об организации

Фактический адрес: 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, литера А.
Тел.: +7 (812) 337-3123
Сайт: <https://www.aari.ru>

