

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.231.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

аттестационное дело N _____
Решение диссертационного совета от 28 мая 2021 г., N 6

О присуждении Носикову Игорю Анатольевичу, гражданину России ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация на тему: «Прямой вариационный метод для расчета траекторных характеристик КВ радиотрасс в ионосфере» по специальности 01.04.03 «Радиофизика» принята к защите 26 февраля 2021 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 002.231.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук (125009, Москва, ул. Моховая, Д.11. корп. 7) (приказ Рособнадзора о создании совета № 2397-1958 от 21.12.2007 г.; приказ Минобрнауки РФ о продлении деятельности совета № 714/нк от 02.11.2012 г.).

Соискатель Носиков Игорь Анатольевич, 1993 года рождения, в 2014 году окончил ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта».

С 01.09.2014 г. по 31.08.2018 г. проходил обучение в аспирантуре ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта».

Работает младшим научным сотрудником Калининградского филиала ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук» (КФ ИЗМИРАН).

Диссертация выполнена в Институте физико-математических наук и информационных технологий ФГАОУ ВПО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта».

Научный руководитель: Клименко Максим Владимирович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Калининградского филиала ИЗМИРАН.

Официальные оппоненты:

- Тинин Михаил Валентинович, д.ф.-м.н., проф., ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет, профессор кафедры радиофизики и радиоэлектроники.
 - Лукин Дмитрий Сергеевич, д.ф.-м.н., проф., АНО ВО «Российский новый университет», ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского центра.
- дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - ФГБНУ «Полярный геофизический институт» (г. Мурманск) - в своем положительном отзыве, подписанном д.ф.-м.н., проф., зав. сектором вычислительного эксперимента В. С. Мингалевым и утвержденном директором д.ф.-м.н., В. Б. Козеловым указала, что диссертация Носикова И.А., посвященная вариационному методу расчета лучевых траекторий радиоволн с заданными граничными условиями, представляет собой актуальное научное исследование, содержащее новые научные результаты в области радиофизики, изучающей распространение радиоволн в ионосферной плазме. Автором получен ряд новых результатов, которые и вынесены на защиту. Новизна полученных результатов обусловлена тем обстоятельством, что примененный в диссертационной работе подход к расчету распространения коротких волн в ионосферной плазме, который основан на применении прямого вариационного метода для поиска минимумов и седловых точек фазового пути радиолуча, ранее другими авторами не применялся.

Соискатель имеет 22 опубликованные работы, из них 16 – по профилю диссертации, в том числе 2 – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и 2 – в журналах, индексируемых в наукометрических базах данных Web of Science и Scopus, 12 – в сборниках трудов конференций. Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил 88 мп.стр.

К наиболее значительным можно отнести следующие работы соискателя:

1. **Носиков И. А.** Применение метода поперечных смещений для расчёта коротковолновых радиотрасс. Постановка задачи и предварительные результаты / **И. А. Носиков**, П. Ф. Бессараб, М. В. Клименко // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 1. – С. 1-14.

Краткое описание: Приведены основные положения метода минимизации для расчёта коротковолновых радиотрасс. В его основе лежит вариационный принцип для функционала оптической длины радиолуча, однако он не сводится к решению уравнений Эйлера-Лагранжа. Приводится сравнение результатов расчёта радиотрасс вариационного метода с известными аналитическими решениями.

2. **Носиков И. А.** Исследование функционала верхних и нижних лучей в задаче расчета радиотрасс в модельной ионосфере / **И. А. Носиков**, М. В. Клименко // Химическая физика. – 2017. – Т. 36, № 12. – С. 61-66.

Краткое описание: Рассмотрена проблема использования прямого вариационного метода для поиска верхних и нижних лучей с заданными граничными условиями. Обсуждается вопрос о фундаментальном различии между верхними и нижними ионосферными лучами и перспективах использования прямого вариационного метода для их определения.

3. **Nosikov I. A.** Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere / **I. A. Nosikov**, M. V. Klimenko, P. F. Bessarab, G. A. Zhibankov // Advances in Space Research. – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 491-497. – DOI: 10.1016/j.asr.2016.12.003.

Краткое описание: Приведено применение вариационного метода для расчета лучевых траекторий коротких радиоволн. Численное моделирование проводилось с использованием модели IRI-2007. Показано, что верхние и нижние лучи соответствуют минимумам и седловым точкам функционала.

4. **Nosikov I. A.** Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification of High and Low Rays / **I. A. Nosikov**, M. V. Klimenko, G. A. Zhibankov, A. V. Podlesnyi, V. A. Ivanova, P. F. Bessarab // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Т. 68, № 1. – С. 455-467. – DOI: 10.1109/TAP.2019.2938817.

Краткое описание: Представлено развитие вариационного метода для расчета как верхних, так и нижних лучей. Предложен алгоритм глобальной оптимизации, последовательно определяющий все решения без необходимости подбора начальных приближений. Приведено применение метода для расчета лучей в модели IRI-2007 и ионограмм наклонного зондирования.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы из:

- ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» от д.ф.-м.н. **Г. Г. Вертоградова** (замеч.: 1. На стр.11 приведен функционал для изотропной среды. Как следствие, развитый подход не учитывает влияние геомагнитного поля, т.е. заведомо уступает методу характеристик, на основе которого строятся различные способы решения граничной задачи. На сколько сложно распространить предложенный вариационный метод на анизотропную ионосферу? Метод характеристик это делает практически автоматически и не накладывает ограничений на среду в рамках геометрооптического приближения. На сколько при этом возрастет вычислительная трудоемкость? 2. На стр.13 автореферата сказано: «Сведение задачи к поиску локальных минимумов позволяет использовать любые численные схемы минимизации...». Однако предложенный вариационный подход является задачей на поиск локального минимума с большим количеством переменных (десятки или сотни в зависимости от требуемой точности). Остается непонятным как эффективно в вычислительном отношении решается эта задача? Каковы вычислительные затраты предложенных алгоритмов в сравнении с упомянутыми в работе методом характеристик для построения лучевой траектории и, например, методом пристрелки для решения граничной задачи, который автор критикует? 3. Метод характеристик плюс, например, метод пристрелки в неоднородной анизотропной ионосфере позволяет решать все задачи моделирования и прогнозирования характеристик КВ: строить лучевые траектории обыкновенных и необыкновенных лучей, вычислять геометрическую расходимость лучей, определять столкновительные потери, напряженность поля волны в зоне приема, доплеровское смещение частоты в нестационарной ионосфере и т.д. Без всего указанного множества характеристик задачи моделирования и прогнозирования КВ каналов не решаются. Как все эти характеристики определяются при вариационном подходе? Автор работы эти вопросы почему-то не обсуждает. Или предполагается после построения лучевой траектории вариационным методом снова прибегнуть к методу характеристик, но уже с известными начальными данными?).

- ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" от д.ф.-м.н. **Н. В. Бахметьевой**. (замеч.: 1. Неясно, применим ли разработанный метод расчета для анализа многоскачковых радиотрасс и волноводного распространения радиоволн? 2. В автореферате можно было бы дать более определенные понятия верхних и нижних лучей. 3. Вероятно, в диссертации представлено больше примеров численного моделирования радиотрасс с использованием разработанного автором вариационного метода. Увеличение этого раздела в автореферате, несомненно, сделало бы выводы научного исследования более аргументированными и весомыми.).

- Санкт-Петербургского государственного университета от к.ф.-м.н. **В. Э. Герма** (замеч.: к недостатку работы следует отнести то обстоятельство, что предлагаемый метод (по крайней мере, в представленной в автореферате форме) не позволяет учесть анизотропию ионосферы и эффекты поглощения. Кроме того, было бы полезно прояснить следующее. На представленном в автореферате Рис.5 отсутствует нижний луч, соответствующий отражению от слоя E, в то время как верхний E-луч присутствует (луч 1 на рис. 5), что вызывает недоумение. В последующем обсуждении на стр. 17-19 этот факт никак не отмечается и не обсуждается.)

- ФГБУН Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН) от д.ф.-м.н. **И. В. Крашенинникова**,

(замеч.: 1. На рис. 5 представлены результаты сопоставления рассмотренного подхода с классическим способом построения краевых решений, однако, их понимание затруднительно без отображения высотного профиля электронной плотности. 2. В применении разработанного метода к экспериментальным данным – рис. 6, б автор упустил возможность продемонстрировать его возможности в сложной области близкой локализации лучевых траекторий верхних лучей моды 1E и нижних лучей моды 1F2 и оценить влияние ненаблюдаемого в реализации слоя E ионосферы на частотную зависимость группового запаздывания нижней ветви моды 1F2).

- ФГБОУ ВО Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова от к.ф.-м.н. **А. М. Падохина**, (замеч.: 1. Исходя из текста автореферата видно, что все исследования проведены автором для случая изотропной ионосферы, т. е. из рассмотрения исключено магнитное поле Земли. Таким образом, не ясно, сохранится ли в случае неоднородной анизотропной ионосферы ключевой для работы предложенного алгоритма вывод о том, что нижние лучи соответствуют седловым точкам первого порядка функционала радиолуча. 2. Первое защищаемое положение диссертации о соответствии верхних и нижних лучей определенным типам экстремумов (прежде всего для нижних лучей) сформулировано и проверено только для ряда модельных сред, т. е. математически строго не доказана возможность его использования для произвольной среды даже в изотропном случае. 3. Из текста автореферата не понятно, как в предложенном подходе могут быть учтены столкновительное затухание и геометрическая расходимость лучей.)

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается: назначенные советом официальными оппонентами по кандидатской диссертации И. А. Носикова ученые являются специалистами в области распространения радиоволн в ионосферной плазме; они широко известны своими достижениями в данной отрасли науки, имеют многочисленные научные труды в рецензируемых научных журналах, способны определить актуальность, новизну, научную и практическую ценность оппонированной диссертации.

Ведущая организация - ФГБНУ Полярный геофизический институт Российской академии наук является одним из ведущих научных заведений, в котором проводятся фундаментальные и прикладные исследования физики ионосферы и распространения радиоволн. Многочисленные работы его сотрудников в областях распространения радиоволн, физики полярной ионосферы и магнитосферы, свидетельствуют об их способности адекватно оценить результаты, представляемые автором для защиты.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработан новый вариационный метод расчета траекторных характеристик коротких радиоволн с заданными граничными условиями. Продемонстрированы возможности применения метода для расчета лучей в неоднородной ионосфере. Предложено решение проблемы многолучевости двуточечной задачи на основе систематического поиска множества лучей глобальной оптимизацией. Представлено применение метода для моделирования ионограмм наклонного зондирования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в работе представлена новая интерпретация лучевых характеристик радиоволн с точки зрения принципа стационарности Ферма, а также предложен систематический подход к расчету многолучевости ионосферного распространения на основе глобальной оптимизации. Показано, что лучевая траектория может быть найдена прямой оптимизацией функционала Ферма, без необходимости решения вариационного или

лучевого уравнений. Доказано применимость представленного подхода на основе сравнения с известными аналитическими решениями и методом пристрелки.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики

Реализация нового подхода к решению задачи расчета радиотрасс в ионосфере с граничными условиями расширяет возможности моделирования и исследования динамики ионосферной плазмы и ее влияния на качество радиосвязи. Одним из достоинств прямого вариационного метода является точное выполнение граничных условий: начальная и конечная точки по определению совпадают с положениями передатчика и приёмника радиоволн. Метод позволяет осуществлять поиск множества решений в неоднородной ионосфере, где существующие численные методы решения граничной задачи могут испытывать трудности. В перспективе, разработанный метод и созданный комплекс программ могут стать эффективным инструментом в моделировании радиотрасс наклонного зондирования ионосферы и при решении задач низкоорбитальной радиотомографии, в которых требуется многократный поиск лучей с заданными точками передачи и приема. Вместе с этим модифицированный комплекс программ может быть использован для решения прикладных задач из различных областей физики, в которых применимо приближение геометрической оптики.

Достоверность полученных результатов определяется на основе качественного и количественного сравнения аналитических и численных решений, полученных с использованием различных методик. В частности, для простейших сред, задаваемых с помощью аналитических функций, верификация проводилась на основе известных аналитических решений. В случае использования в качестве среды распространения радиоволн эмпирических моделей ионосферы, полученные результаты расчетов радиотрасс сопоставлялись с результатами численного моделирования, полученными с использованием метода пристрелки, а также с наблюдаемыми ионограммами наклонного зондирования.

Личный вклад соискателя. Результаты диссертационной работы получены лично автором под руководством научного руководителя.

Автором выполнены следующие работы:

1. Построены численные схемы исследования функционала фазового пути и представлено свидетельство существования минимумов и седловых точек функционала радиолуча.
2. Разработаны метод обобщенной силы и алгоритм глобальной оптимизации, направленные на поиск решений различного типа и на решение проблемы многолучевости в задаче распространения радиоволн в ионосфере.
3. На основе разработанных алгоритмов и методов реализован комплекс программ на языке C++ для расчета радиотрасс в ионосфере с последующим получением модельных дистанционно-частотных характеристик наклонного зондирования.
4. Проведены численные эксперименты по расчету траекторных характеристик радиотрасс с использованием аналитических и эмпирических моделей ионосферы. Представлены возможности эффективного применения вариационного подхода в задаче численного моделирования.
5. Осуществлена верификация и валидация созданного комплекса программ на основе аналитических решений, численных расчетов, полученных методом пристрелки, и данных радиофизических

Диссертационная работа И. А. Носикова является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит решение фундаментальной задачи о расчете лучевых траекторий коротких радиоволн в неоднородной изотропной ионосфере с заданными граничными условиями и удовлетворяет

требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

На заседании 28 мая 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Носикову И. А. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18; против 0; воздержавшихся 0.

Председатель диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, проф., член-корр. РАН

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, проф. РАН



В. А. Черепенин

Л. В. Кузьмин

« 31 » мая 2021 г.