

УДК: 550.388.2

Физические исследования и численное моделирование воздействия мощного потока радиоизлучения на нижнюю ионосферу. Часть 1. Краткий обзор состояния вопроса и постановка задачи

Д. С. Моисеева^а, Е. Л. Ступицкий^б

Институт автоматизации проектирования Российской академии наук,
Россия, 123056, г. Москва, 2-я Брестская ул., д. 19/18

E-mail: ^а moiseevads@rambler.ru, ^б stup@bk.ru

*Получено 26.10.2022, после доработки — 10.12.2022.
Принято к публикации 27.02.2023.*

В первой части статьи сформулирована общая цель работы, состоящая в численном исследовании химических, ионизационных, оптических и температурных характеристик нижней ионосферы, возмущенной мощным потоком радиоизлучения. Дан краткий обзор основных экспериментальных и теоретических исследований физических явлений в ионосфере при воздействии на нее потока радиоволн коротковолнового диапазона, генерируемого нагревными стендами различной мощности. Показана определяющая роль *D*-области ионосферы в поглощении энергии радиолуча. Выполнен подробный анализ кинетических процессов в возмущенной *D*-области ионосферы, которая является наиболее сложной в кинетическом отношении. Показано, что для полного описания ионизационно-химических и оптических характеристик возмущенной области необходимо учитывать более 70 компонент, которые по своему основному физическому содержанию удобно разделить на пять групп. Представлена кинетическая модель для описания изменения концентраций взаимодействующих между собой компонентов (общее число реакций — 259). Система кинетических уравнений решалась с помощью специально адаптированного к такого рода задачам полуявного численного метода. На основе предложенной структуры разработан программный комплекс, в котором схема алгоритма допускала менять как содержимое отдельных блоков программы, так и их количество, что позволило проводить подробные численные исследования отдельных процессов в поведении параметров возмущенной области. Полный численный алгоритм основан на двухтемпературном приближении, в котором главное внимание уделялось расчету электронной температуры, так как на ее поведение определяющее влияние оказывают неупругие кинетические процессы с участием электронов. Постановка задачи носит общий характер и позволяет рассчитывать параметры возмущенной ионосферы в широком диапазоне мощностей и частот радиоизлучения. На основе разработанной численной методики можно исследовать широкий круг явлений как в естественной, так и в возмущенной ионосфере.

Ключевые слова: активные эксперименты, нижняя ионосфера, КВ-радиоволны, нагревные стенды, численное моделирование, температура, кинетика

Работа выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

UDC: 550.388.2

Physical research and numerical modeling of the lower ionosphere perturbed by powerful radio emission. Part 1. Brief review and problem statement

D. S. Moiseeva^a, E. L. Stupitskij^b

Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences (ICAD RAS),
19/18 2-nd Brestskaya st., Moscow, 123056, Russia

E-mail: ^a moiseevads@rambler.ru, ^b stup@bk.ru

*Received 26.10.2022, after completion – 10.12.2022.
Accepted for publication 27.02.2023.*

The main aim, formulated in the first part of article, is to carry out detailed numerical studies of the chemical, ionization, optical, and temperature characteristics of the lower ionosphere perturbed by powerful radio emission. The brief review of the main experimental and theoretical researches of physical phenomena occurring in the ionosphere when it is heated by high-power high-frequency radio waves from heating facilities is given. The decisive role of the *D*-region of the ionosphere in the absorption of radio beam energy is shown. A detailed analysis of kinetic processes in the disturbed *D*-region, which is the most complex in kinetic terms, has been performed. It is shown that for a complete description of the ionization-chemical and optical characteristics of the disturbed region, it is necessary to take into account more than 70 components, which, according to their main physical content, can be conveniently divided into five groups. A kinetic model is presented to describe changes in the concentrations of components interacting (the total number of reactions is 259). The system of kinetic equations was solved using a semi-implicit numerical method specially adapted to such problems. Based on the proposed structure, a software package was developed in which the algorithm scheme allowed changing both the content of individual program blocks and their number, which made it possible to conduct detailed numerical studies of individual processes in the behavior of the parameters of the perturbed region. The complete numerical algorithm is based on the two-temperature approximation, in which the main attention was paid to the calculation of the electron temperature, since its behavior is determined by inelastic kinetic processes involving electrons. The formulation of the problem is of a rather general nature and makes it possible to calculate the parameters of the disturbed ionosphere in a wide range of powers and frequencies of radio emission. Based on the developed numerical technique, it is possible to study a wide range of phenomena both in the natural and disturbed ionosphere.

Keywords: active experiments, lower ionosphere, HF radio waves, heating facility, numerical simulation, temperature, kinetics

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 619–637 (Russian).

The work was performed within the state task of the ICAD RAS.

1. Введение

Методы исследования ионосферной плазмы делятся на активные и пассивные. Пассивные методы основаны на измерениях и теоретическом анализе параметров естественной ионосферы. В активных методах исследования в ионосферную плазму инжектируются сгустки и пучки химически активных нейтральных и заряженных частиц с геофизических ракет и спутников или она нагревается мощным направленным потоком электромагнитных волн, генерируемых наземными радионагревными стендами.

Воздействие (поглощение) мощных коротких электромагнитных волн приводит к образованию возмущенной области, в которой регистрируются изменение химического и ионизационного состава ионосферы, температуры электронов и тяжелых частиц, возникновение динамических процессов и возбуждение нелинейных эффектов по всей ее толще. Возмущенная область имеет линейные размеры 10–100 км в диаметре и простирается в диапазоне высот 30–1000 км, то есть от самого основания ионосферы до магнитосферы.

В нижней ионосфере (D -области) на высотах ~ 50 – 90 км происходит поглощение основной доли энергии мощного потока радиоизлучения, взаимодействие которого с ионосферой является существенно нелинейным. Вместе с тем именно D -область характеризуется наиболее сложным комплексом кинетических процессов, которые в условиях воздействия мощного радиоизлучения имеют неравновесный характер как по концентрации частиц, так и по температуре.

Исследование параметров нижней ионосферы в условиях возмущения мощным потоком радиоволн не только представляет самостоятельный научный и прикладной интерес, но и позволяет определить энергетические условия воздействия на более верхние слои ионосферы.

Благодаря малой концентрации электронов n_e в ионосфере возникает возможность вызывать достаточно сильное локальное возмущение распределения n_e с использованием слабоинтенсивного воздействия. Именно это обстоятельство лежит в основе экспериментальных исследований физики ионосферной плазмы методом воздействия радиоволн. В отличие от излучения радиостанций излучение станций воздействия сфокусировано вблизи вертикального направления, что дает возможность радиоволнам достичь области резонансов в окрестности максимума n_e в F -слое. В результате в области резонансов происходит сильное возбуждение собственных колебаний электронной плазмы, развивается плазменная турбулентность, что и служит причиной нагрева плазмы, ее структуризации, генерации искусственного радиоизлучения, ускорения электронов, т. е. широкого комплекса нелинейных эффектов, связанных с распространением потока радиоволн сравнительно низкой мощности.

Цель данной работы состоит в исследовании химических, ионизационных, оптических и температурных характеристик возмущенной D -области ионосферы на основе физического и численного моделирования для различных параметров радиоизлучения. Наиболее важным является вопрос о взаимосвязи электронной кинетики и электронной температуры, так как ей определяется весь ход трансформации энергии радиоизлучения.

2. Краткий анализ состояния исследований нижней ионосферы, возмущенной мощным потоком радиоизлучения

Ко времени создания мощных радиоизлучающих стендов было выполнено большое количество работ по исследованию D -области ($40 \leq h \leq 95$ км), E -области ($95 \leq h \leq 140$ км), F_1 -области ($140 \leq h \leq 220$ км), F_2 -области ($220 \leq h \leq 500$ км) ионосферы. Особенно большое количество монографий приходится на 70-е годы прошлого столетия [Иванов-Холодный, Никольский, 1969; Ратклифф, 1975; Бауэр, 1976; Ришбет, Гарриот, 1975; Мак-Ивен, Филлипс, 1978; Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Достаточно полный перечень переведенных на русский язык ранних изданий дан в монографии [Ришбет, Гарриот, 1975]. Так как состояние ионосферы определяющим

образом влияет на эффективность функционирования радиотехнических и оптико-электронных средств обмена информацией, то в настоящее время эти исследования интенсивно развиваются, причем большое значение придается активным методам исследования, из которых наиболее важным является метод воздействия на ионосферу мощного направленного потока радиоизлучения от нагревного стенда. Это потребовало разработки адекватной расчетно-теоретической базы для прогнозирования экспериментов и анализа их результатов.

В работе [Моисеева, Моторин, Ступицкий, 2018] дан краткий обзор ранних работ, направленных на анализ некоторых экспериментальных результатов. Что касается D -области ионосферы, где поглощается основная доля энергии радиолуча и вся ее трансформация сопровождается широким комплексом взаимосвязанных процессов, то ее изучение еще требует детальных и всесторонних исследований, которые можно выполнить лишь с помощью численного моделирования.

Наиболее полный анализ явлений, связанных с возмущением верхней ионосферы, дан в обзорах [Фролов и др., 2007; Гуревич, 2007; Streltsov et al., 2018].

В работе [Enell et al., 2005] авторы дополнили модель [Kero et al., 2000] для диагностики высот 50–140 км и оценили эффект нагрева D -области для нескольких характерных случаев высокой концентрации электронов — дневного света, типичного высыпания авроральных электронов и солнечно-протонного шторма. Изменение температуры электронов зависит от мощности нагрева, частоты излучения радиоволны, поляризации, времени суток и ионосферных условий, что вызывает существенные трудности при ее экспериментальном измерении. В работе [Kero et al., 2008] авторы сообщили о прогрессе в интерпретации радиолокационных измерений, полученных с помощью радара некогерентного рассеяния во время нагрева D -области, и получили определенное согласие между имеющимися экспериментальными данными и теоретическими моделями [Tomko, Ferraro, Lee, 1980; Tomko et al., 1980; Kero et al., 2000; Enell et al., 2005; Kero et al., 2008], а также дали критический анализ этого метода диагностики и предложили варианты по его совершенствованию.

В работах [Черногор, Милованов, 2015a; Черногор, Милованов, 2015b] приводятся численные исследования поведения электронной температуры T_e и концентрации n_e применительно к параметрам установки HAARP на основе упрощенной шестикомпонентной схемы реакций для различных поляризаций радиоволн. Получено увеличение электронной температуры в 33 (для обыкновенной волны) и в 42 (для необыкновенной волны) раза по сравнению с естественным фоном. Основное поглощение происходит на высотах ~ 50 –90 км.

В последние годы развивается целый ряд научных направлений, связанных с воздействием на ионосферу мощного потока радиоизлучения: исследование мезосферного озона [Куликов и др., 2013; Беккер, Козлов, Тасенко, 2016; Bakhmetieva, Kulikov, Zhemyakov, 2020], атмосферной турбулентности, акустико-гравитационных волн и пространственно-динамических течений в возмущенной ионосфере [Бахметьева и др., 2018; Cheng et al., 2017; Cheng et al., 2019; Li, Guo, Cheng, 2020], генерация низкочастотных электромагнитных волн [Moore, 2007; Cohen et al., 2010a; Cohen et al., 2010b; Guo, Fang, Honary, 2021a; Guo, Fang, Honary, 2021b] и оптического излучения возмущенной ионосферы.

Исследование динамических процессов, низкочастотных волн и оптического излучения имеет большое практическое значение, так как эти процессы определяют помеховую обстановку и, следовательно, эффективность работы оптико-электронных информационных средств космических аппаратов.

Следует отметить работы [Cheng et al., 2017; Cheng et al., 2019], где проработаны двух- и трехмерные модели возмущенной ионосферы при высокочастотном нагреве в вертикальном направлении. Эффекты наклонного нагрева D -области следует учитывать при исследованиях

многолучевого нагрева, развиваемых в последнее время. Усовершенствованная версия трехмерной модели нижней полярной ионосферы представлена в работе [Li, Guo, Cheng, 2020]. В ней учтены токи и неоднородности ионосферной плазмы. Обсуждается влияние распределения проводимости Педерсона и Холла, а также характер токов возбуждения.

Подробный разбор ранних работ по генерации низкочастотных электромагнитных волн при воздействии мощного радиоизлучения на высокоширотную (авроральную) ионосферу дан в [Mooge, 2007] и в обзоре экспериментальных результатов [Cohen et al., 2010b]. Направление данных исследований активно развивается, так как имеет самостоятельное радиофизическое значение в геофизике [Guo, Fang, Honary, 2021a; Guo, Fang, Honary, 2021b].

Искусственное свечение ионосферы исследуется с момента ввода в эксплуатацию первых высокочастотных установок (70-е гг.). Первые эксперименты по возбуждению искусственного оптического свечения на стенде «Сура» были проведены в 1983 году.

Активность экспериментальных исследований оптического излучения ионосферы при воздействии мощного потока радиоизлучения резко возросла после начала функционирования более мощных установок, таких как HAARP и EISCAT. В высокоширотной ионосфере оно наблюдалось на нагревных стендах EISCAT [Brandstrom et al., 1999] и HAARP в 1999 году [Pedersen, Carlson, 2001]. В работах [Kosch et al., 2007; Pedersen et al., 2008] представлен обзор результатов экспериментов по искусственному свечению в высокоширотной ионосфере, полученных на нагревных стендах EISCAT и HAARP. На рис. 1 показаны цветные изображения искусственного свечения, сделанные на стенде HAARP, где главным образом преобладает излучение красной линии $O(^1D)$.

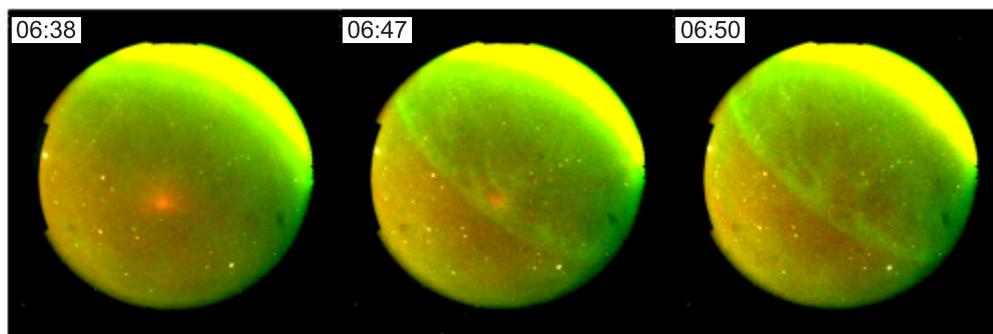


Рис. 1. Искусственное свечение ионосферной плазмы, вызванное высокочастотным нагревом F -области ионосферы нагревным стендом HAARP 23 марта 2004 года. Источник изображения: Pedersen T., Esposito R., Kendall E., Sentman D., Kosch M., Mishin E., Marshall R. Observations of artificial and natural optical emissions at the HAARP facility // Ann. Geophys. — 2008. — Vol. 26. — P. 1089–1099. Материал представлен в соответствии лицензией Creative Commons Attribution 3.0 License. Все права принадлежат авторам [Pedersen et al., 2008]

Важную роль играет направление радиолуча. При высокочастотном нагреве на авроральных широтах интенсивность оптического излучения в F -области усиливается при излучении мощной электромагнитной волны в направлении магнитного поля Земли (магнитный зенит) [Pedersen et al., 2003; Rietveld et al., 2003]. При определенных геофизических условиях искусственное свечение воздуха можно наблюдать невооруженным глазом [Pedersen, Gerken, 2005].

Более детальный анализ оптических экспериментов, выполненных на стенде HAARP, был выполнен в работах [Leyser et al., 2009; Pedersen et al., 2009]. Наблюдения за искусственными оптическими излучениями, вызванными высокочастотным нагревом на установке HAARP мощностью 3,6 МВт, показали неожиданные особенности, которых не было на предыдущем уровне

960 кВт. Оптические изображения показали сложную пространственную структуру, состоящую из центрального пятна усиленного излучения с относительно резкой границей вблизи контура, где эффективная мощность излучения (ERP) составляет 50 % (радиус от центра луча $\sim 8^\circ$), и кольца или фрагментов кольца около контура с 10 % ERP (радиус от центра луча $\sim 13^\circ$). Искусственные нижние слои на ионограммах и положительные возмущения общего электронного содержания предполагают, что оптические картины в виде «яблочка» связаны с локализованным повышением плотности плазмы ниже основного F -слоя. Траектории лучей показывают, что излучаемая мощность передатчика концентрируется в кольцевой структуре, что соответствует данным оптических наблюдений. Расчетные скорости ионизации соответствуют мощности, доступной от передатчика, и хорошо согласуются с наблюдаемой интенсивностью излучения N_2^+ (длина волны — 427,8 нм). Авторы пришли к выводу, что данная оптическая картина является эффектом преломления и индикатором процессов ионизации в луче передатчика.

Возбуждение оптических излучений зависит от энергии электронов относительно пороговых значений для различных возбужденных состояний, при этом обычно наблюдаемые излучения включают возбужденные состояния атомарного кислорода 1D , 1S и 5P , соответствующие длинам волн 630,0; 557,7 и 777,4 нм, что указывает на энергию электронов не менее 1,97; 4,19 и 10,74 эВ. Оптическое излучение с длиной волны 427,8 нм от 1-й отрицательной полосы N_2^+ , возбужденное при 18,75 эВ, является индикатором того, что электроны превысили порог ионизации в результате ускорения в поле высокочастотной волны [Gustavsson et al., 2006].

В работе [Pedersen et al., 2009] дан качественный физический анализ процессов возбуждения свечения и процессов, связанных с моделированием траекторий луча. На рис. 2 показаны траектории высокочастотных (ВЧ) радиолучей, исходящих с интервалом 1° от вертикали до зенитного угла 30° . Лучи передатчика на частоте 2,85 МГц могут проникать в ионосферу почти повсюду, достигая области верхнегибридного резонанса f_{uh} , находящегося в F -области ионосферы. ВЧ-лучи, возникающие между зенитным углом от 4° до 12° , отклоняются от центра луча и собираются вместе, когда они пересекают f_{uh} вблизи 12° .

Из работ последних лет укажем на работы [Грач и др., 2012; Blagoveshchenskaya et al., 2014; Клименко и др., 2017], где проанализированы результаты экспериментов по исследованию зависимости свечения ионосферы в красной (630 нм) и зеленой (557,7 нм) линиях атомарного кислорода от частоты и поляризации волны накачки в F -области ионосферы на стендах EISCAT и «Сура». В работе [Blagoveshchenskaya, 2020] представлен краткий обзор экспериментальных исследований воздействия коротковолнового излучения от нагревного стенда EISCAT на высокоширотную верхнюю ионосферу, проведенных за 25-летнее сотрудничество между Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) и Европейской научной ассоциацией по некогерентному рассеянию (EISCAT).

Так как излучение определяется главным образом концентрацией и энергетикой электронов, то для подробного объяснения этого явления необходима разработка всесторонней физической модели и соответствующего численного алгоритма для ее описания.

Вместе с тем следует отметить, что существенная трудность в сравнении расчетных и экспериментальных данных связана со сложной поперечной структурой радионагревного излучения, обусловленной не только общим средним распределением энергии по радиусу луча, но и более мелкой структурой, связанной с дифракцией радиоизлучения и начальными характеристиками антенного поля. Так как детальные экспериментальные исследования вызывают серьезные трудности, то были разработаны численные алгоритмы для моделирования диаграммы направленности существующих и перспективных антенных решеток радионагревных стендов [Cohen et al., 2010a; Rietveld et al., 2016; Васильев и др., 2020].

Реалистичная диаграмма направленности ВЧ-излучения от антенного массива HAARP (включая боковые лепестки) дана в работе [Cohen et al., 2010a]. На рис. 3 показана относи-

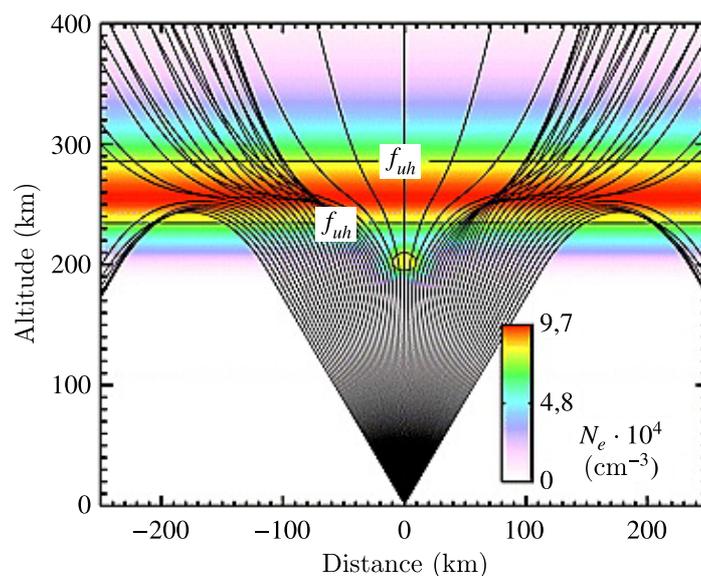


Рис. 2. Траектория лучей на частоте 2,85 МГц через фоновую ионосферу, возмущенную локализованным слоем дополнительной ионизации. Источник изображения: *Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., MacKenzie E., Carlson H. C., Starks M., Mills T.* Optical ring formation and ionization production in high-power HF heating experiments at HAARP // *Geophys. Res. Lett.* — 2009. — Vol. 36, No. L18107. Материал размещен с разрешения правообладателя John Wiley and Sons (лицензионное соглашение № 5472000109171 от 18.01.2023 г.)

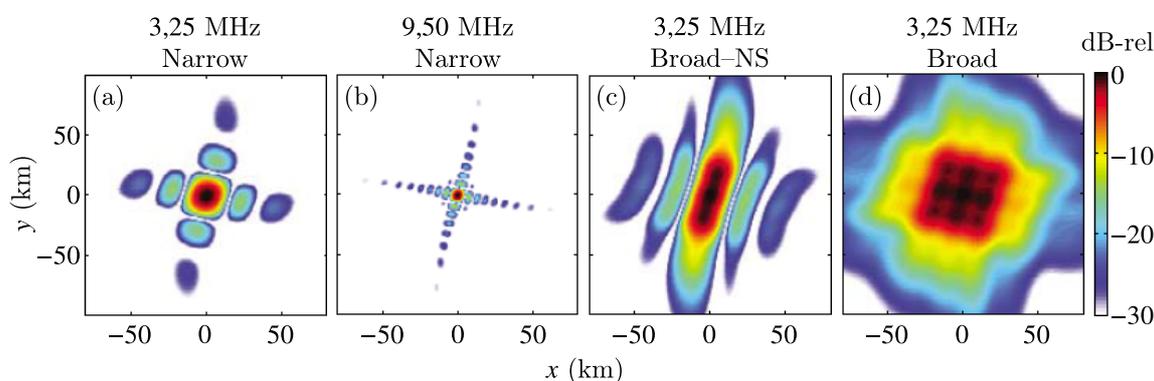


Рис. 3. Относительная плотность мощности на 60 км от группы ВЧ-антен нагревного стенда HAARP в четырех режимах луча: а) 3,25 МГц, «узкий луч»; б) 9,50 МГц, «узкий луч»; в) 3,25 МГц, расширенный в направлении «север-юг»; д) 3,25 МГц, расширенный в обоих направлениях. Источник изображения: *Cohen M. B., Inan U. S., Goikowski M., Lehtinen N. G.* On the generation of ELF/VLF waves for long-distance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* — 2010. — Vol. 115, No. A07322. Материал размещен с разрешения правообладателя John Wiley and Sons (лицензионное соглашение № 5471991371626 от 18.01.2023 г.)

тельная плотность мощности на высоте 60 км для нескольких различных режимов луча HAARP, при этом нагревный стенд способен расширять луч либо в одном направлении (с), либо в обоих направлениях (д), объединяя основной луч с боковыми лепестками, таким образом распределяя мощность по большей площади. Результаты моделирования диаграммы направленности и ERP для антенного массива 1 и массива 2 нагревного стенда EISCAT представлены в работе [Rietveld et al., 2016].

В обзоре [Васильев и др., 2020] дается представление о возможной архитектуре будущего нагревного стенда, рассматривается моделирование антенной решетки для случаев прямоугольной, гексагональной и кольцевой структуры.

Таким образом, исследование оптических явлений и численное моделирование структуры радиолуча показали возможность возникновения сложной неоднородной структуры в области прохождения луча. Это существенно усложняет задачу создания подробного пространственного численного алгоритма по определению ионизационно-оптической структуры области возмущения. Однако для решения практических задач важной является прежде всего корректность самой физической модели, построенной на основе взаимосвязи многочисленных кинетических процессов и энергии электронов, полученной от радиолуча. Именно этим определяется направление исследований в данной работе.

3. Компонентный состав возмущенной области ионосферы

На основе подробного анализа кинетических процессов в нижней естественной и возмущенной ионосфере и с учетом необходимости подробного определения ионизационно-химических и оптических характеристик возмущенной области ионосферы в работе принят следующий компонентный состав среды, условно подразделенный на группы (табл. 1).

Таблица 1. Компонентный состав нижней ионосферы

Группа I	$O_2, O, O_3, O_2^+, O^+, O_2^-, NO, NO^+, NO_2, N_2O, N_2, N, N_2^+, N^+, C, CO, CN, CO_2, H, OH, H_2O$
Группа II	$O(^1D), O(^1S), N(^2D), N(^2P), O_2(^1\Delta_g), N_2(A^3\Sigma), O(^2D), O(^2P), O_2(a^4\Pi_u), O_2(b^1\Sigma_g^+), N(^1D), N(^1S), N_2(a^1\Sigma_u^-)$
Группа III	$O_4^+, O_2^+(H_2O), H_3O^+, H_3O^+(OH), H^+(H_2O)_2, H_5O_2^+, NO^+(H_2O), NO^+N_2, NO^+(CO_2), NO^+(H_2O)_2, O^-, O_3^-, NO_2^-, CO_3^-$
Группа IV	$N_2(1), N_2(2), O_2(1), N^{14}N^{15}(0), N^{14}N^{15}(1), NO(1), OH(1), CO(1), NO^+(1), N_2O(001), N_2O(010), N_2O(100), H_2O(001), H_2O(010), H_2O(100), O_3(001), O_3(010), O_3(100), CO_2(001), CO_2(010), CO_2(020), CO_2(100)$
Группа V	A, AO, AO_2, A^+, AO^+

Молекулы каждой группы имеют свою структурную особенность, которая определяет их роль в кинетических процессах:

- 1) простые атомные, молекулярные и ионные составляющие;
- 2) частицы в метастабильных электронно-возбужденных состояниях;
- 3) положительные и отрицательные ионные связки;
- 4) колебательно возбужденные молекулярные компоненты;
- 5) примеси, привнесенные в атмосферу в результате проведения крупномасштабных экспериментов,

Последняя группа компонентов — дополнительная, учитывается при внесении в ионосферу примесей (выброс сгустков, плазменных струй или взрывов).

Такое подразделение на группы было использовано при разработке численного алгоритма, которое позволяет при таком большом количестве компонент (и, соответственно, реакций) проводить численные исследования влияния отдельных процессов на поведение возмущенной

области. В работе [Моисеева, Моторин, Ступицкий, 2018] дан подробный анализ выбора численного алгоритма решения системы кинетических уравнений, проведено его тестирование по закону сохранения элементного состава и приведены некоторые результаты для групп 1 и 2.

Для расчета изменения концентраций использовалась кинетическая схема, предложенная в работе [Ступицкий, Холодов, 2019]. Анализ показал, что для решения задачи о развитии во времени разогретой области необходимо использовать десятки реакций. В модели учитывается: 36 ионизационно-химических реакций, 9 реакций диссоциации малых компонент ионосферы, 39 реакций образования и разрушения сложных положительных и отрицательных ионов-связок, 69 реакций возбуждения и дезактивации метастабильных и 106 реакций — метастабильных колебательных состояний. Константы скоростей реакций взяты из известных монографий, научно-методических материалов и оригинальных статей (см. [Мак-Даниэль, 1967; Митчнер, Кругер, 1976; Мак-Ивен, Филлипс, 1978; Омхольт, 1974; Ришбет, Гарриот, 1975; Хастед, 1965; Елецкий, Палкина, Смирнов, 1975; Гордиец, Марков, Шелепин, 1978; Ступицкий, Репин, 2002; Перов, Хриган, 1980; Турсо, 1975; Справочник, 1988] и др.).

4. Постановка полной кинетической задачи

В полном виде система уравнений многокомпонентной многоскоростной газодинамики частично ионизованного газа при наличии магнитного и гравитационного поля представлена в монографии [Ступицкий, Холодов, 2019]. При повышении температуры тяжелых частиц в D -области возможно формирование газодинамического течения [Моисеева и др., 2021], и, хотя среда может оставаться определенное время неравновесной как по кинетическим процессам, так и по температурам, плотности частиц достаточно, чтобы среда оставалась односкоростной.

Таким образом, с учетом высказанных замечаний полная схема пространственно-временного решения задачи имеет вид, показанный на рис. 4.

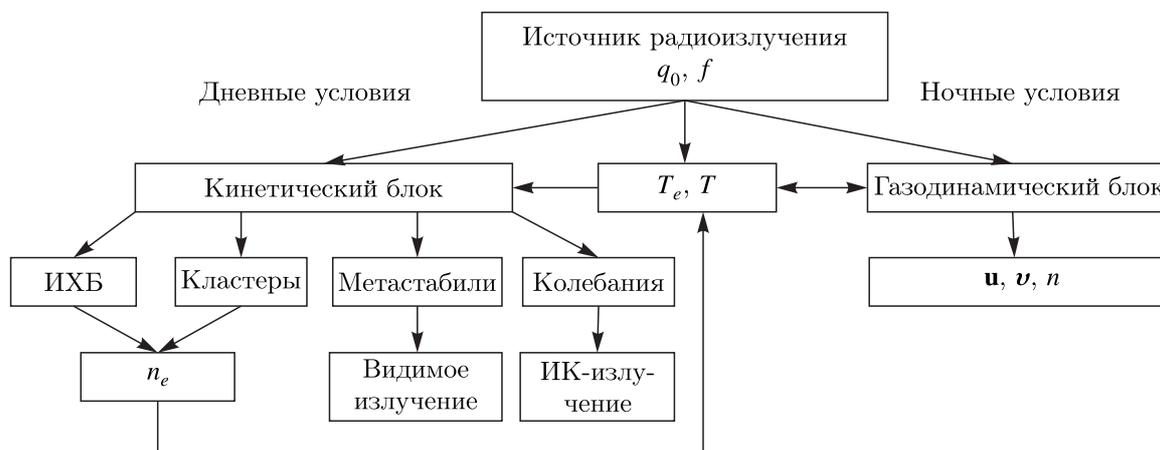


Рис. 4. Схема решения пространственно-временной задачи с учетом взаимосвязи кинетической и динамической части. Здесь ИХБ — атомы, ионы и молекулы, участвующие в ионизационно-химических процессах; q_0 — плотность потока радиоволн у поверхности земли; f — частота радиоволны; \mathbf{u} , \mathbf{v} — вертикальная и радиальная составляющие скорости; n — концентрация частиц

Изменение концентрации произвольного k -го компонента n_k , в рамках механики сплошной среды, описывается кинетическим уравнением

$$\frac{\partial n_k}{\partial t} + \operatorname{div} n_k \mathbf{u}_k = S_k, \quad k = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где N — количество компонент: атомов, молекул, ионов, положительных и отрицательных связей, метастабилей с возбуждением на определенный электронный уровень, молекул с возбуждением на определенный колебательный уровень; S_k — скорость изменения n_k в различных столкновительных процессах и процессах излучения. Аналогичный вид имеет кинетическое уравнение для концентрации электронов n_e .

Так как в нижней ионосфере среду можно считать односкоростной, то есть при возникновении газодинамического движения можно полагать, что направленная скорость всех компонент одинакова: $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_e = \mathbf{u}$ ($k = 1, \dots, N$), то общая концентрация тяжелых частиц в смеси (табл. 1) будет

$$n = \sum_{k=1}^N n_k. \quad (2)$$

Как видно из таблицы 1, атомарный (элементный) состав молекул смеси существенно различен, но при отсутствии примеси он состоит только из следующих элементов: N, O, H, C. Если рассматривается задача с примесью, то ее можно ввести как дополнительный элемент. Таким образом, суммарная концентрация s -го элемента в составе атомов, молекул и ионов будет

$$n_s = \sum_k n_k \nu_{sk}, \quad (3)$$

где $\nu_{sk} = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ — количество атомов и ионов s -го элемента в частице k -го компонента. Например, наибольшее количество $\nu = 5$ атомов водорода в ионе-связке H_5O_2^+ .

Кинетические процессы не изменяют количество любого s -го элемента в единице объема. Это изменение происходит только за счет расширения или сжатия газовой смеси. Таким образом, в односкоростном приближении

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \text{div } n_s \mathbf{u} = 0. \quad (4)$$

Если просуммировать по всем s , то концентрация атомов воздуха в смеси — $n_B = \sum_{s=1}^4 n_s$ и для нее

$$\frac{\partial n_B}{\partial t} + \text{div } n_B \mathbf{u} = 0. \quad (5)$$

При численном решении системы кинетических уравнений удобно ввести относительные концентрации $\alpha_k = \frac{n_k}{n_B}$. Тогда уравнение (1) преобразуется к виду

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} = \frac{S_k}{n_B}, \quad (6)$$

а для n_B — использовать уравнение (5). Если мощность и время воздействия радиоизлучения невелики, то $n_e \ll n_B$ и температура тяжелых частиц практически не отличается от естественной и газодинамическое течение не развивается. Тогда $n_B(\mathbf{r}, t) = n_B(\mathbf{r}, 0) = n_B(h)$ и можно использовать атмосферное значение $n_B(h)$ для каждой расчетной высоты h . Основной вклад в $n_B(h)$ дают атомы азота и кислорода, причем для расчетов в диапазоне высот $h = 30$ – 90 км можно также использовать концентрацию молекул N_2 и O_2 , которая равна $2n_B$.

Совместный расчет кинетических уравнений для всех блоков одновременно неоправданно усложняет решение задачи по определению концентраций компонент, указанных в таблице 1. Как в естественной, так и в возмущенной радиоволнами нижней ионосфере основными компонентами являются компоненты, образованные из азота и кислорода. Именно они определяют главным образом ионизационно-химический состав возмущенного воздуха. Молекулы H_2O , OH , CO_2 , CO в основном и колебательно возбужденном состоянии, метастабилей, положительные

и отрицательные связи относятся к малым составляющим верхней ионосферы. Их концентрация на несколько порядков меньше концентрации основных компонент, и они слабо влияют на них. Поэтому их концентрацию можно рассчитывать независимо, на фоне расчета основных компонент.

Алгоритм расчета построен таким образом, чтобы можно было решать всю кинетическую задачу одновременно или «выключать» блоки малых составляющих ионосферы.

Отладка численного алгоритма расчета кинетического блока производилась на решении релаксационной по времени кинетической задачи для различных начальных температур и плотности воздушной смеси. Известно, что задача химической кинетики относится к особому классу жестких задач [Калиткин, 2011; Калиткин, 1995; Полак, Гольденберг, Левицкий, 1984; Хайрер, Ваннер, 1999]. Особенностью этих задач является существенно различные времена протекания химических реакций, что приводит к отличию по порядку величины действительных частей собственных значений матрицы Якоби системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение таких задач проводится с использованием исключительно неявных методов, по которым к настоящему моменту существует достаточно обширная литература (например, [Калиткин, 1995; Полак, Гольденберг, Левицкий, 1984; Хайрер, Ваннер, 1999]). Рассматриваются две группы методов: одноточечные (в основном методы Рунге–Кутты и методы Розенброка) и многоточечные (формулы дифференцирования назад, или методы Гира) [Полак, Гольденберг, Левицкий, 1984]. При этом особую популярность приобрели методы с переменным шагом [Полак, Гольденберг, Левицкий, 1984].

Численные исследования показали, что использование полностью неявного метода Гира 4-го порядка с постоянным шагом или Розенброка также 4-го порядка приводит к системе линейных алгебраических уравнений часто с плохо обусловленной матрицей, что создает серьезные трудности в их решении. Многоточечный метод Гира, хотя и дает высокую точность решения, из-за необходимости иметь решение вплоть до сотен секунд и больше приводит к чрезмерно большому времени счета.

Результаты исследований показали, что при записи кинетических уравнений в виде

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} = -\alpha_k R_k + I_k, \quad (7)$$

где $(-\alpha_k R_k)$ определяет убыль вещества, I_k — образование вещества, наиболее оптимальным по времени счета и точности для решения системы (7) является полунеявный метод Эйлера с реализацией алгоритма автоматического выбора шага интегрирования [Полак, Гольденберг, Левицкий, 1984]. При этом функции R_k и I_k могут использоваться в явном виде:

$$[\alpha_k]_{i+1} = \frac{[\alpha_k]_i + \tau I_{ki}}{1 + \tau R_{ki}}, \quad (8)$$

где индексы i и $i + 1$ обозначают предыдущий и следующий моменты времени. На каждом шаге интегрирования по формуле (8) проводится расчет концентраций $[\alpha_k]_{i+2}^{(\tau)}$ и $[\alpha_k]_{i+1}^{(2\tau)}$ для момента времени $t + 2\tau$ с шагом τ и 2τ соответственно и рассчитывалась максимальная относительная погрешность:

$$\delta = \max_k \left| \frac{[\alpha_k]_{i+2}^{(\tau)} - [\alpha_k]_{i+1}^{(2\tau)}}{[\alpha_k]_{i+2}^{(\tau)}} \right|.$$

Если $\delta < \frac{3\varepsilon}{2}$, где ε — заданная относительная погрешность на шаге (в расчетах, как правило, полагалось $\varepsilon = 10^{-4}$), то результат, полученный с шагом τ , принимался; если $\delta < \frac{\varepsilon}{2}$, то далее пытаемся увеличить шаг вдвое. Если же $\delta > \frac{3\varepsilon}{2}$, то результат, полученный с шагом τ , отвергается, расчет повторяется с шагом $\frac{\tau}{2}$.

По ходу расчета проверялось выполнения закона сохранения каждого s -го элемента:

$$\sum_s n_s v_{sk} = \text{const.} \quad (9)$$

Для анализа возможностей алгоритма и оценки характера поведения различных компонент во времени были выполнены отдельные и совместные расчеты ионизационно-химического, метастабильного и колебательного блоков для различных значений температур и концентраций среды.

Плотность и скорость возможного движения возмущенной среды определяются уравнениями газодинамики в односкоростном приближении, которые применимы для нижнего слоя ионосферы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{u} = 0, \quad (10)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g}, \quad (11)$$

где $\rho = \sum_k m_k n_k$ — плотность газа, $p = p_e + p_i + p_0$ — давление газа.

Для тяжелых частиц можно полагать $T_k = T$ для всех k компонентов и в теплоемкости учитывать только одноатомные, двухатомные и трехатомные молекулы и ионы, предполагая, что вращательные степени свободы у них полностью возбуждены. Тогда, обозначая индексом m основные характеристики тяжелых частиц, получаем для температуры уравнение

$$\left(\frac{3}{2}n_1 + \frac{5}{2}n_2 + 3n_3 \right) k \frac{dT}{dt} + p_m \text{div } \mathbf{u} = Q_m, \quad (12)$$

где $Q_m = Q_m^y + Q_m^{\text{Hy}}$. Отметим, что основной вклад в Q_m дают упругие столкновения с электронами.

Давление и плотность рассчитываются по формулам

$$p_m = (n_3 + n_2 + n_1)kT, \quad (13)$$

$$\rho = \sum_k (m_{k1}n_1 + m_{k2}n_2 + m_{k3}n_3), \quad (14)$$

где m_{k1} , m_{k2} , m_{k3} — массы k -х компонентов, имеющих один, два и три атома.

Аналогичную общую структуру имеет уравнение для электронной температуры:

$$\frac{3}{2}kn_e \frac{dT_e}{dt} + p_e \text{div } \mathbf{u}_e = Q_e, \quad (15)$$

$$Q_e = Q_e^\mu + Q_e^y + Q_e^{\text{Hy}} + Q_e^\lambda + Q_e^v \text{ эрг}/(\text{см}^3\text{с}).$$

В начальный момент времени задаются плотность потока радиоволн у поверхности земли q_0 , частота излучения f и высотные распределения температур и концентраций компонентов, входящих в химический состав невозмущенной ионосферы в рассматриваемой области.

Скорость изменения энергии электронов за счет поглощения радиоизлучения на высоте h будет

$$Q_e^\mu = q(h)\mu(h) \text{ эрг}/(\text{см}^3\text{с}), \quad (16)$$

$$\mu = \frac{\omega_p^2 v_e}{c [(\omega \pm \omega_{ce})^2 + v_e^2]}, \quad (17)$$

где μ — коэффициент поглощения, 1/см; $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m}} = 5,64 \cdot 10^4 n_e^{1/2}$ — плазменная частота, 1/с; $\omega_{ce} = \frac{eB}{cm}$ — гирочастота электронов, рад/с.

В знаменателе верхний знак относится к левой, обыкновенной волне, нижний — к правой, необыкновенной волне.

$$q = q_0 \frac{A_0}{A(h)} \exp\left(-\int_0^h \mu(x) dx\right), \quad (18)$$

где q_0 — плотность потока радиоизлучения у поверхности земли, $\frac{A_0}{A(h)}$ — отношение поперечных сечений радиолуча на высоте $h = 0$ и h .

За счет дифракционной расходимости плотность мощности излучения падает с высотой как

$$\frac{A_0}{A(h)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{h}{h_0}\right)^2},$$

где $h_0 = \frac{L_0^2}{2,44\lambda}$ — характерный масштаб дифракционной расходимости луча, λ — длина радиоволны, L_0 — эффективный диаметр антенны $\left(A_0 = \frac{\pi L_0^2}{4}\right)$.

Частота столкновений электронов равна

$$\nu_e = \nu_{eo} + \nu_{ei}, \quad (19)$$

$$\nu_{eo} = \frac{4}{3} \bar{\sigma}_{eo} \bar{v}_e n_0, \quad \nu_{ei} = \frac{4 \sqrt{2\pi} e^4 n_i \bar{z}^2 \Lambda}{3 \sqrt{m} (kT_e)^{3/2}}, \quad (20)$$

где $\Lambda = 24,46 + 1,5 \ln(T_e) - 0,15 \ln(\bar{z}^3 n_i)$ — кулоновский логарифм, n_i — концентрация ионов, 1/см³.

Выражение для скорости передачи энергии электронам в упругих столкновениях имеет вид

$$Q_{eo}^y = \frac{3}{2} k n_e \frac{2m_e}{M} \nu_{eo} (T - T_e) = 4 \frac{m_e}{M} \bar{\sigma}_{eo} \bar{v}_e n_0 k n_e (T - T_e), \quad (21)$$

$$Q_{ei}^y = \frac{16e^4 \Lambda}{M \bar{v}_e k T_e} n_e n_i k (T - T_e). \quad (22)$$

Выражение для скорости изменения энергии электронов в неупругих процессах имеет вид $Q_e^{\text{Hy}} = Q_e^i + Q_e^B + Q_e^{\text{D}} + Q_e^k$, где энергия, расходуемая на ионизацию, равна

$$Q_e^i = - \sum_{\alpha} \left(I_{\alpha} + \frac{3}{2} k T_e \right) (n_e n_{\alpha 0} j_{oe} - n_e^2 n_{\alpha i} \bar{j}_{ei}). \quad (23)$$

Здесь I_{α} — потенциал ионизации; j_{oe} , \bar{j}_{ei} — константы скорости ионизации и тройной рекомбинации. (В данной задаче можно рассматривать лишь однократные ионы.)

Энергия, расходуемая на возбуждение электронных состояний:

$$Q_e^B = - \sum_{\alpha} \sum_k \sum_{m \neq k} E_{\alpha km} (n_{\alpha k} n_e j_{km}^e - n_{\alpha m} n_e j_{mk}^e). \quad (24)$$

Энергия, расходуемая на диссоциацию:

$$Q_e^{\text{D}} = - \sum_{\alpha} D_{\alpha} (n_{\alpha} n_e j_{se} - n_{\alpha}^2 n_e j_{es}). \quad (25)$$

С учетом важности потерь энергии электронами на возбуждение колебательных состояний, отсутствия надежных данных по сечениям возбуждения молекул электронами вблизи порога необходимо детально исследовать влияние этого процесса на всю энергетику возмущенной области. В расчетах принималось следующее выражение для Q_e^k , учитывающее возбуждение указанных компонент в первом колебательном состоянии:

$$Q_e^k = - \sum E_{\alpha 01} (n_e n_{\alpha 0} j_{\alpha 01} - n_e n_{\alpha 1}^* \bar{j}_{\alpha 10}). \quad (26)$$

В работах [Прияткин, Ступицкий, 1992; Ступицкий, Холодов, 2019] было показано, что при фоторекомбинации электронов их температура может расти из-за ухода электронов из низкоэнергетической части спектра. С учетом зависимости сечения фоторекомбинации от энергии электронов было получено выражение для фоторекомбинационного подогрева электронов:

$$Q_e^v = \left(\frac{3}{2} - F(T_e) \right) n_e n_i j_{ei}^v, \quad (27)$$

где $F(T_e) = 0,64 + 0,11 \lg \left(\frac{I}{T_e} \right)$.

Для тяжелых частиц можно приближенно учесть переход энергии к ним в результате дезактивации метастабилей с помощью выражения

$$Q_m^{\text{ny}} = \sum_{\alpha} E_{\alpha 12} n_{\alpha 2}^* n_e j_{21}, \quad (28)$$

где $E_{\alpha 12}$ — энергия между уровнями ($1 \rightarrow 2$), $n_{\alpha 2}^*$ — концентрация метастабилей сорта α , j_{21} — константа скорости.

Таким образом, в данной постановке задачи учтены все наиболее важные кинетические процессы, влияющие на температуру. Расчеты показали, что тормозное излучение практически не влияет на поведение электронной температуры. Электронная теплопроводность также не оказывает существенного влияния на T_e , так как $\mu q \gg \text{div}(\lambda_e \nabla T_e)$. Отметим также, что в процессе разогрева электронов радиоизлучением время максвеллизации будет $\tau_e = \frac{T_e^{3/2}}{3,8 n_e \Lambda} \ll 0,1$ с и введение понятия электронной температуры оправдано.

Постановка и численное решение возможного развития газодинамического течения возмущенной области ионосферы даны во второй части работы.

5. Заключение

За последние годы было выполнено большое количество экспериментальных и численных исследований ионосферы при ее модификации радиоволнами при различных мощностях нагревного стенда и частот радиоволн. В первой части статьи представлен краткий обзор работ, которые затрагивают исследование нижней ионосферы и возникающих в ней нелинейных эффектов, а также дана постановка задачи для описания изменения параметров возмущенной области, образующейся в нижней ионосфере при воздействии на нее мощного потока радиоизлучения. Во второй части работы будут представлены результаты численных исследований, в которых особое внимание уделено изменению электронной температуры и концентрации при нагреве нижней ионосферы мощными радиоволнами.

Список литературы (References)

- Бауэр З. Физика планетных ионосфер. — М.: Мир, 1976.
Bauer S. Physics of planetary ionospheres. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1973. (Russ. ed.: Bauer Z. Fizika planetykh ionosfer. — Moscow: Mir, 1976.)
- Бахметьева Н. В., Григорьев Г. И., Толмачева А. В., Калинина Е. Е. Атмосферная турбулентность и внутренние гравитационные волны, исследуемые методом искусственных периодических неоднородностей // Химическая физика. — 2018. — Т. 37, № 5. — С. 19–30.
Bakhmet'eva N. V., Grigoriev G. I., Tolmacheva A. V., Kalinina E. E. Atmospheric turbulence and internal gravity waves examined by the method of artificial periodic irregularities // Russian Journal of Physical Chemistry B. — 2018. — Vol. 12, No. 3. — P. 510–521. (Original Russian paper: Bakhmet'eva N. V., Grigor'yev G. I., Tolmacheva A. V., Kalinina E. E. Atmosfernaya turbulentsnost' i vnutrenniye gravitatsionnyye volny, issleduyemye metodom iskusstvennykh periodicheskikh neodnorodnostey // Khimicheskaya fizika. — 2018. — Vol. 37, No. 5. — P. 19–30.)
- Беккер С. З., Козлов С. И., Тасенко С. В. Оценка возможности понижения концентрации озона в нижней части D-области под воздействием мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2016. — Т. 56, № 6. — С. 796–799.
Bekker S. Z., Kozlov S. I., Tsenko S. V. Estimation of the ozone decrease possibility in the lower part of the D region under the action of a powerful radiowave // Geomagnetism and Aeronomy. — 2016. — Vol. 56, No. 6. — P. 757–760. (Original Russian paper: Bekker S. Z., Kozlov S. I., Tsenko S. V. Otsenka vozmozhnosti ponizheniya kontsentratsii ozona v nizhney chasti D-oblasti pod vozdeystviyem moshchnoy radiovolny // Geomagnetizm i aeronomiya. — 2016. — Vol. 56, No. 6. — P. 796–799.)
- Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачева А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. — Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999.
Belikovich V. V., Benediktov E. A., Tolmacheva A. V., Bakhmet'eva N. V. Issledovaniye ionosfery s pomoshch'yu iskusstvennykh periodicheskikh neodnorodnostey [Researches of the ionosphere using artificial periodic irregularities]. — N. Novgorod: IPF RAN, 1999 (in Russian).
- Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.
Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. Fizika ionosfery [Physics of the ionosphere]. — Moscow: Nauka, 1988 (in Russian).
- Васильев Р. В., Сетов А. Г., Фролов В. Л. и др. Современный нагревный стенд для исследования ионосферы средних широт // Солнечно-земная физика. — 2020. — Т. 6, № 2. — С. 61–78.
Vasilyev R. V., Setov A. G., Frolov V. L. et al. Modern heating facility for research into the mid-latitude ionosphere // Solar-Terrestrial Physics. — 2020. — Vol. 6, No. 2. — P. 49–62. (Original Russian paper: Vasil'yev R. V., Setov A. G., Frolov V. L. et al. Sovremennyy nagrevnyy stand dlya issledovaniya ionosfery srednikh shirot // Solnechno-zemnaya fizika. — 2020. — Vol. 6, No. 2. — P. 61–78.)
- Гордиец Б. Ф., Марков Н. Н., Шелепин Л. А. Теория инфракрасного излучения околоземного космического пространства // Труды АН СССР. — 1978. — Т. 105. — С. 7–71.
Gordiyets B. F., Markov N. N., Shelepin L. A. Teoriya infrakrasnogo izlucheniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva [Theory of infrared radiation of near-Earth space] // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. — 1978. — Vol. 105. — P. 7–71 (in Russian).
- Грач С. М., Клименко В. В., Шиндин А. В., Насыров И. А., Сергеев Е. Н., Яшинов В. А., Погорелко Н. А. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда СУРА: результаты экспериментов 2010 года // Известие вузов. Радиофизика. — 2012. — Т. 55, № 1–2. — С. 37–56.
Grach S. M., Shindin A. V., Yashnov V. A. et al. Airglow during ionospheric modifications by the SURA facility radiation. Experimental results obtained in 2010 // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2012. — Vol. 55, No. 1–2. — P. 33–50. (Original Russian paper: Grach S. M., Klimenko V. V., Shindin A. V., Nasyrov I. A., Sergeev E. N., Yashnov V. A., Pogorelko N. A. Opticheskoye svecheniye pri vozdeystvii na ionosferu radioizlucheniym stenda SURA: rezul'taty eksperimentov 2010 goda // Izvestiye vuzov. Radiofizika. — 2012. — Vol. 55, No. 1–2. — P. 37–56.)
- Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. — 2007. — Т. 177, № 11. — С. 1145–1177.
Gurevich A. V. Nonlinear effects in the ionosphere // Physics-Uspekhi. — 2007. — Vol. 50, No. 11. — P. 1091–1121. (Original Russian paper: Gurevich A. V. Nelineynyye yavleniya v ionosfere // Uspekhi fizicheskikh nauk. — 2007. — Vol. 177, No. 11. — P. 1145–1177.)
- Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М. Явления переноса в слабоионизированной плазме. — М.: Атомиздат, 1975.
Yeletskiy A. V., Palkina L. A., Smirnov B. M. Yavleniya perenosa v slaboionizirovannoy plazme [Transport Phenomena in Weakly Ionized Plasma]. — Moscow: Atomizdat, 1975 (in Russian).

- Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М.* Солнце и ионосфера. — М.: Наука, 1969.
Ivanov-Kholodnyy G. S., Nikol'skiy G. M. Solntse i ionosfera [Sun and ionosphere]. — Moscow: Nauka, 1969 (in Russian).
- Калиткин Н. Н.* Численные методы. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011.
Kalitkin N. N. Chislennyye metody [Numerical Methods]. — Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2011 (in Russian).
- Калиткин Н. Н.* Численные методы решения жестких систем // Математическое моделирование. — 1995. — Т. 7, № 5. — С. 8–11.
Kalitkin N. N. Chislennyye metody resheniya zhestkikh sistem [Numerical methods of solution of stiff systems] // Matematicheskoe modelirovanie. — 1995. — Vol. 7, No. 5. — P. 8–11 (in Russian).
- Клименко В. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Шиндин А. В.* Характеристики искусственного свечения ионосферы при омическом нагреве и при ускорении электронов плазменной турбулентностью, инициированными мощным радиоизлучением стенда «Сура» // Известие вузов. Радиофизика. — 2017. — Т. 60, № 6. — С. 481–501.
Klimenko V. V., Grach S. M., Sergeev E. N., Shindin A. V. Features of the ionospheric artificial airglow caused by ohmic heating and plasma turbulence-accelerated electrons induced by HF pumping of the Sura heating facility // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2017. — Vol. 60, No. 6. — P. 431–449. (Original Russian paper: *Klimenko V. V., Grach S. M., Sergeyev E. N., Shindin A. V.* Kharakteristiki iskusstvennogo svecheniya ionosfery pri omicheskom nagreve i pri uskorenii elektronov plazmennoy turbulentsht'yu, initsiirovannymi moshchnym radioizlucheniym stenda "Sura" // Izvestiye vuzov. Radiofizika. — 2017. — Vol. 60, No. 6. — P. 481–501.)
- Куликов Ю. Ю., Фролов В. Л., Григорьев Г. И., Демкин В. М., Комраков Г. П., Красильников А. А., Рыскин В. Г.* Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ-радиоизлучением // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2013. — Т. 53, № 1. — С. 102–109.
Kulikov Yu. Yu., Frolov V. L., Grigor'ev G. I., Demkin V. M., Komrakov G. P., Krasilnikov A. A., Ryskin V. G. Response of mesospheric ozone to the heating of the lower ionosphere by high-power HF radio emission // Geomagnetism and Aeronomy. — 2013. — Vol. 53, No. 1. — P. 96–103. (Original Russian paper: *Kulikov Yu. Yu., Demkin V. M., Krasilnikov A. A., Ryskin V. G., Frolov V. L., Grigor'ev G. I., Komrakov G. P.* Otklik mezosfernogo ozona na nagrev nizhney ionosfery moshchnym KV-radioizlucheniym // Geomagnetizm i aeronomiya. — 2013. — Vol. 53, No. 1. — P. 102–109.)
- Мак-Даниэль И.* Процессы столкновений в ионизованных газах. — М.: Мир, 1967.
McDaniel E. Collision phenomena in ionized gases. — New York: Wiley, 1963. (Russ. ed.: *McDaniel E.* Protsessy stolknoveniy v ionizovannykh gazakh. — Moscow: Mir, 1967.)
- Мак-Ивен М., Филлипс Л.* Химия атмосферы. — М.: Мир, 1978.
McEwan M., Phillips L. Chemistry of the atmosphere. — New York: Halsted Press, 1975. (Russ. ed.: *Mak-Iven M., Phillips L.* Khimiya atmosfery. — Moscow: Mir, 1978.)
- Митчнер М., Кругер Ч.* Частично ионизованные газы. — М.: Мир, 1976.
Mitchner M., Kruger Ch. Partially ionized gases. — New York: Wiley, 1973. (Russ. ed.: *Mitchner M., Kruger Ch.* Chastichno-ionizovannyye gazy. — Moscow: Mir, 1976.)
- Моисеева Д. С.* Разработка методологического аппарата для определения параметров ионосферы, возмущенной мощным направленным потоком радиоволн от наземного источника: автореферат дисс. канд. физ.-мат. наук. — Долгопрудный: МФТИ, 2021.
Moiseeva D. S. Razrabotka metodologicheskogo apparata dlya opredeleniya parametrov ionosfery, vozmushchennoy moshchnym napravlenным potokom radiovoln ot nazemnogo istochnika [Development of a methodological apparatus for determining the parameters of the ionosphere, perturbed by a powerful directed flow of radio waves from a heating facility]. — Ph. D. thesis. — Dolgoprudnyy: MIPT, 2021 (in Russian).
- Моисеева Д. С., Моторин А. А., Ступицкий Е. Л.* Численные исследования параметров возмущенной области, образующейся в нижней ионосфере под действием направленного потока радиоизлучения от наземного источника // Компьютерные исследования и моделирование. — 2018. — Т. 10, № 5. — С. 679–708.
Moiseeva D. S., Motorin A. A., Stupitskiy E. L. Chislennyye issledovaniya parametrov vozmushchennoy oblasti, obrazuyushcheyasya v nizhney ionosfere pod deystviyem napravlenного potoka radioizlucheniya ot nazemnogo istochnika [Numerical studies of the parameters of the perturbed region formed in the lower ionosphere under the action of a directed radio waves flux from a terrestrial source] // Computer Research and Modeling. — 2018. — Vol. 10, No. 5. — P. 679–708 (in Russian).
- Омхольт А.* Полярные сияния. — М.: Мир, 1974.
Omholt A. The Optical Aurora. — Springer-Verlag, 1971. (Russ. ed.: *Omkhol't A.* Polyarnyye siyaniya. — Moscow: Mir, 1974.)
- Перов С. П., Хриган А. Х.* Современные проблемы атмосферного озона. — Л.: Гидрометеоздат, 1980.
Perov S. P., Khrgian A. Kh. Sovremennyye problemy atmosfernogo ozona [The current problems of atmospheric ozone]. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980 (in Russian).

- Полак Л. С., Гольденберг М. Я., Левицкий А. А. Вычислительные методы в химической кинетике. — М.: Наука, 1984.
Polak L. S., Gol'denberg M. Ya., Levitskii A. A. Vychislitel'nye metody v khimicheskoi kinetike [Computational methods in chemical kinetics]. — Moscow: Nauka, 1984 (in Russian).
- Пряткин С. Н., Ступицкий Е. Л. Неравновесные процессы при разлете бариевого облака в поле солнечного излучения // Космические исследования. — 1992. — Т. 30, В. 2. — С. 253.
Priyatkin S. N., Stupitskij E. L. Neravnovesnyye protsessy pri razlete bariyevogo oblaka v pole solnechnogo izlucheniya [Non-equilibrium processes during the expansion of a barium cloud in the field of solar radiation] // *Cosmic Research*. — 1992. — Vol. 30, No. 2. — P. 253 (in Russian).
- Ратклифф Дж. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. — М.: Мир, 1975.
Ratcliffe J. A. An introduction to the ionosphere and magnetosphere. — Cambridge University Press, 1972. (Russ. ed.: *Ratkliff J. Vvedeniye v fiziku ionosfery i magnitosfery*. — Moscow: Mir, 1975.)
- Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.
Rishbeth H., Garriott O. K. Introduction to ionospheric physics. — New York: Academic Press, 1969. (Russ. ed.: *Rishbet G., Garriot O. K. Vvedeniye v fiziku ionosfery*. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975.)
- Справочник. Околоземное космическое пространство. — М.: Мир, 1988.
Spravochnik. Okolozemnoye kosmicheskoye prostranstvo [Reference book. Near-Earth outer space]. — Moscow: Mir, 1988 (in Russian).
- Ступицкий Е. Л., Репин А. Ю. Методика исследования кинетики ионизационно-химических и оптических возмущений в атмосфере на основе численного моделирования. — ЦФТИ МО РФ, 2002.
Stupitskij E. L., Repin A. Yu. Metodika issledovaniya kinetiki ionizatsionno-khimicheskikh i opticheskikh vozmushcheniy v atmosfere na osnove chislennogo modelirovaniya [Methodology for studying the kinetics of ionization-chemical and optical disturbances in the atmosphere based on numerical simulation]. — TSFTI MO RF, 2002 (in Russian).
- Ступицкий Е. Л., Холодов А. С. Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов. — Долгопрудный: Интеллект, 2019.
Stupitskij E. L., Kholodov A. S. Fizicheskie issledovaniya i matematicheskoye modelirovanie krupnomasshtabnykh geofizicheskikh eksperimentov [Physical research and mathematical modeling of large-scale geophysical experiments]. — Dolgoprudnyj: Intellect Publishers, 2019 (in Russian).
- Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым излучением // Успехи физических наук. — 2007. — Т. 177, № 3. — С. 330–340.
Frolov V. L., Bakhmet'eva N. V., Belikovich V. V. et al. Modification of the Earth's ionosphere by high-power high-frequency radio waves // *Physics-Uspekhi*. — 2007. — Vol. 50, No. 3. — P. 315–324. (Original Russian paper: *Frolov V. L., Bakhmet'yeva N. V., Belikovich V. V. et al. Modifikatsiya ionosfery Zemli moshchnym korotkovolnovym izlucheniym* // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. — 2007. — Vol. 177, No. 3. — P. 330–340.)
- Хайрер Э., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. — М.: Мир, 1999.
Hairer E., Vanner G. Solving ordinary differential equations II. Stiff and differential-algebraic problems. — 2nd edition. — 1996. (Russ. ed.: *Khairer E., Vanner G. Reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii. Zhestkie i differentsial'no-algebraicheskie zadachi*. — Moscow: Mir, 1999.)
- Хастед Дж. Физика атомных столкновений. — М.: Мир, 1965.
Hasted J. Physics of atomic collisions. — Washington, D.C.: Butterworth, 1964. (Russ. ed.: *Hasted J. Fizika atomnykh stolknoveniy*. — Moscow: Mir, 1965.)
- Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Амплитудное самовоздействие мощных непрерывных проходящих радиоволн в ионосфере: результаты численного моделирования // Радиофизика и радиоастрономия. — 2015а. — Т. 20, № 2. — С. 122–132.
Chernogor L. F., Milovanov Yu. B. Amplitudnoye samovozdeystviye moshchnykh nepreryvnykh prokhodyashchikh radiovoln v ionosfere: rezul'taty chislennogo modelirovaniya [Amplitude self-action of continuous high-power radio waves traveling in the ionosphere: numerical modeling] // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2015a. — Vol. 20, No. 2. — P. 122–132 (in Russian).
- Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Возмущение ионосферы мощным непрерывным проходящим радиоизлучением: результаты численного моделирования // Радиофизика и радиоастрономия. — 2015б. — Т. 20, № 1. — С. 48–63.
Chernogor L. F., Milovanov Yu. B. Vozmushcheniye ionosfery moshchnym nepreryvnym prokhodyashchim radioizlucheniym: rezul'taty chislennogo modelirovaniya [Disturbances in the ionosphere produced by passing high-power radio transmissions: numerical simulations] // *Radio Physics and Radio Astronomy*. — 2015b. — Vol. 20, No. 1. — P. 48–63 (in Russian).

- Bakhmetieva N. V., Kulikov Yu. Yu., Zhemyakov I. N.* Mesosphere ozone and the lower ionosphere under plasma disturbance by powerful high-frequency radio emission // *Atmosphere*. — 2020. — Vol. 11, No. 11. — P. 1154.
- Blagoveshchenskaya N. F.* Perturbing the high-latitude upper ionosphere (F-region) with powerful HF radio waves: A 25-year collaboration with EISCAT // *Radio Science Bulletin*. — 2020. — Vol. 373. — P. 40–55.
- Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kosch M., Sergienko T., Brändström U., Yeoman T. K., Häggström I.* Optical and ionospheric phenomena at EISCAT under continuous X-mode HF Pumping // *J. Geophys. Res.* — 2014. — Vol. 119.
- Brandstrom B. U. E., Leyser T. B., Steen A., Rietveld M. T., Gustavsson B., Aso T., Ejiri M.* Unambiguous evidence of HF pump-enhanced airglow at auroral latitudes // *Geophys. Res. Lett.* — 1999. — Vol. 26. — P. 3561–3564.
- Cheng Q., Guo L.-X., Li H.-M., Li J.-T.* Saturation effects of the lower ionosphere based on two-dimensional HF heating model // *J. Geophys. Res. Space Physics*. — 2017. — No. 122. — P. 874–890.
- Cheng Q., Guo L.-X., Li H.-M., Li J.-T., Zhang D.* Oblique absorption effects of the D-region during HF waves heating // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2019. — No. 186. — P. 28–34.
- Cohen M. B., Inan U. S., Goikowski M., Lehtinen N. G.* On the generation of ELF/VLF waves for long-distance propagation via steerable HF heating of the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* — 2010a. — Vol. 115, No. A07322.
- Cohen M. B., Inan U. S., Goikowski M., McCarrick M. J.* ELF/VLF wave generation via ionospheric HF heating: Experimental comparison of amplitude modulation, beam painting, and geometric modulation // *J. Geophys. Res.* — 2010b. — Vol. 115, No. A02302.
- Enell C.-F., Kero A., Turunen E. et al.* Effects of D-region RF heating studied with the Sodankylä Ion Chemistry model // *Annales Geophysicae*. — 2005. — Vol. 23. — P. 1575–1583.
- Guo Z., Fang H., Honary F.* A novel method to identify the physical mechanism and source region of ELF/VLF waves generated by beat-wave modulation using preheating technique // *Universe*. — 2021a. — Vol. 7, No. 2. — P. 43.
- Guo Z., Fang H., Honary F.* The generation of ULF/ELF/VLF waves in the ionosphere by modulated heating // *Universe*. — 2021b. — Vol. 7, No. 29.
- Gustavsson B., Leyser T. B., et al.* Electron gyroharmonic effects in ionization and electron acceleration during high-frequency pumping in the ionosphere // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 97, No. 19. — P. 195002.
- Kero A., Bösinger T., Pollari P. et al.* First EISCAT measurement of electron-gas temperature in the artificially heated D-region ionosphere // *Annales Geophysicae*. — 2000. — Vol. 18. — P. 1210–1215.
- Kero A., Vierinen J., Enell C.-F., Virtanen I., Turunen E.* New incoherent scatter diagnostic methods for the heated D-region ionosphere // *Ann. Geophys.* — 2008. — Vol. 26. — P. 2273–2279.
- Kosch M. J., Pedersen T., Rietveld M. T., Gustavsson B., Grach S. M., Hagfors T.* Artificial optical emissions in the high-latitude thermosphere induced by powerful radio waves: An observational review // *Advances in Space Research*. — 2007. — Vol. 40, No. 3. — P. 365–376.
- Leyser T. B., Norin L., McCarrick M., Pedersen T. R., Gustavsson B.* Radio pumping of ionospheric plasma with orbital angular momentum // *Phys. Rev. Lett.* — 2009. — Vol. 102, No. 6. — P. 065004.
- Li H., Guo L., Cheng Q.* The distributions of characteristic parameters during long-period modulation heating in the polar region ionosphere // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. — 2020. — Vol. 125.

- Moore R. C. ELF/VLF wave generation by modulated HF heating of the Auroral Electrojet. — Ph. D. thesis. — 2007.
- Pedersen T. R., Carlson H. C. First observations of HF heater-produced airglow at the high frequency active auroral research program facility: thermal excitation and spatial structuring // *Radio Sci.* — 2001. — Vol. 36. — P. 1013–1026.
- Pedersen T., Esposito R., Kendall E., Sentman D., Kosch M., Mishin E., Marshall R. Observations of artificial and natural optical emissions at the HAARP facility // *Ann. Geophys.* — 2008. — Vol. 26. — P. 1089–1099.
- Pedersen T. R., Gerken E. A. Creation of visible artificial optical emissions in the aurora by high-power radio waves // *Nature.* — 2005. — Vol. 433, No. 7025. — P. 498–500.
- Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E., MacKenzie E., Carlson H. C., Starks M., Mills T. Optical ring formation and ionization production in high-power HF heating experiments at HAARP // *Geophys. Res. Lett.* — 2009. — Vol. 36, No. L18107.
- Pedersen T. R., McCarrick M., Gerken E., Selcher C., Sentman D., Carlson H. C., Gurevich A. Magnetic zenith enhancement of HF radio-induced airglow production at HAARP // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — Vol. 30, No. 4. — P. 1169.
- Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., Kornienko V. A., Leyser T. B., Yeoman T. K. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108, No. A4. — P. 1141.
- Rietveld M. T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility // *Radio Sci.* — 2016. — Vol. 51, No. 9. — P. 1533–1546.
- Streltsov A. V., Bertheier J. J., Chernyshov A. A., Frolov V. L., Honary F., Kosch M. J. et al. Past, present and future of active frequency experiments in space // *Space Sci. Rev.* — 2018. — Vol. 214, No. 118. — P. 1–122.
- Tomko A. A., Ferraro A. J., Lee H. S. D-region absorption effects during high-power radio wave heating // *Radio Science.* — 1980. — Vol. 15, No. 03. — P. 675–682.
- Tomko A. A., Ferraro A. J., Lee H. S., Mitra A. P. A theoretical model of D-region ion chemistry modifications during high power radio wave heating // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1980. — Vol. 42. — P. 275–285.
- Turco R. P. Photodissociation rates in the atmosphere below 100 km // *Geophysical Surveys.* — 1975. — Vol. 2. — P. 153–192.