### ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

## Моделирование лучевых траекторий КВ-радиоволн и ионограмм вертикального и наклонного зондирования в искусственно возмущенной ионосфере на основе данных радиотомографии

А. М. Падохин,<sup>а</sup> Е. С. Андреева, М. О. Назаренко, М. А. Анненков, Н. А. Терешин Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 23.12.2018, после доработки 11.01.2019, принята к публикации 21.01.2019.

В работе приведены результаты численного моделирования распространения КВ-радиоволн в искусственно возмущенной ионосфере во время старта ракеты-носителя «Циклон-3» с космодрома Плесецк 18 декабря 1991 г. и мощного промышленного взрыва с магнитудой M = 2.4 на Кольском полуострове 8 апреля 1990 г. Специально разработанный комплекс программ на языке Рython позволяет проводить трехмерное моделирование лучевых траекторий в приближении геометрической оптики путем решения бихарактеристической системы, при этом геомагнитное поле задается по модели IGRF, а распределение электронной концентрации в ионосфере по данным радиотомографии. Моделирование ионограмм проводится с использованием трехмерной пристрелки, основанной на симплексной минимизации Нелдера—Мида. Показано, что искусственные ионосферные неоднородности в периоды рассматриваемых событий представляют собой квазиволновые возмущения, которые оказывают существенное влияние на лучевые траектории КВ-радиоволн и ионограммы вертикального и наклонного зондирований. Это проявляется в виде характерных особенностей лучевых траекторий с множественными от локальных максимумов электронной концентрации и дополнительных следов на ионограммах, вызванных прохождением перемещающихся ионосферных возмущений над зондирующей системой.

*Ключевые слова*: радиоволны, радиотомография ионосферы, моделирование распространения КВ-волн.

УДК: 528.8. PACS: 94.20.Bb.

### введение

Математические основы описания распространения КВ-радиоволн в рамках приближения геометрической оптики были рассмотрены еще в середине прошлого века в работе [1]. В дальнейшем в работах по численному моделированию распространения радиоволн в ионосфере данная задача решалась различными методами, включая метод адиабатического инварианта [2], интерференционного интеграла [3], нормальных волн [4], решения параболического уравнения для расчета волновых полей [5], возмущений для определения вариации луча в неоднородной ионосфере [6]. Метод канонического оператора Маслова [7] позволил учитывать дифракционные эффекты вблизи каустик.

Вместе с тем большинство прикладных программ, используемых для моделирования распространения КВ-радиоволн в ионосфере, начиная с ранних, например кода Джонса [8], и до современных, например IONORT [9], используют приближение геометрической оптики.

С точки зрения математики при моделировании распространения КВ-радиоволн в приближении геометрической оптики решаются два типа задач. Первый тип представляет собой начальную задачу, в которой по заданным параметрам передатчика и среды определяются возможные лучевые траектории КВ-радиоволн. Второй тип — краевая задача определения возможных лучевых траекторий КВрадиоволн, связывающих передатчик и приемник

при заданных параметрах среды. К задачам такого типа относится, например, моделирование ионограмм наклонного зондирования. В первом случае для нахождения лучевых траекторий обычно решается уравнение эйконала методом характеристик [1]. Во втором случае можно использовать методы пристрелки, также основанные на решении уравнения эйконала с последующей минимизацией отклонения координат лучевой траектории на высоте приемника непосредственно от координат приемника [10], или прямой вариационный метод, основанный на принципе Ферма [11-13]. Метод пристрелки требует большего, по сравнению с прямым вариационным методом, количества вычислений и не всегда способен адекватно воспроизводить верхние лучи. При этом использование прямого вариационного метода существенно усложняется при необходимости рассмотрения эффектов, связанных с геомагнитным полем [11].

В обоих случаях определяющим для результатов численного моделирования во многом является выбор модели среды — параметров магнитного поля Земли (обычно используется либо дипольное приближение, либо модель IGRF [14]), а также распределения электронной концентрации и частоты соударений в ионосфере. В настоящее время для целей моделирования распространения КВ-радиоволн в основном используют различные версии моделей IRI и NeQuick [15, 16]. Российская система прогноза распространения КВ-радиоволн использует также модель СМИ-88 [17]. В последнее время для этих целей стала также применяться модель

<sup>&</sup>lt;sup>*a*</sup> E-mail: padokhin@physics.msu.ru

ГСМ ТИП [18, 19]. Основной проблемой в данном случае является тот факт, что даже наиболее адекватные модели не в достаточной мере описывают структурные особенности ионосферы даже в спокойных геомагнитных условиях. Например, на основе сравнения моделей IRI и NeQuick с данными радиотомографии [20] было показано, что рассматриваемые модели описывают в среднем «фонтанэффект», но не отражают устойчивые структурные особенности экваториальной аномалии, зарегистрированные в радиотомографических реконструкциях, при этом наибольшие расхождения наблюдались в областях сильных пространственных градиентов электронной концентрации, особенно в окрестностях гребней экваториальной аномалии. Также широко известна проблема с описанием главного ионосферного провала в российском секторе в моделях семейства IRI [21]. Очевидно, что еще сложнее обстоит дело с модельным заданием ионосферы в периоды гелиогеофизических, а также искусственных возмущений. Несмотря на это, задача моделирования лучевых траекторий и ионограмм наклонного зондирования в случае присутствия искусственных ионосферных возмущений представляется весьма актуальной. Одной из немногих возможностей провести подобные исследования является задание параметров ионосферы на основе данных радиотомографии (РТ) [22]. В течение последних десятилетий методы РТ хорошо зарекомендовали себя в изучении структурных особенностей ионосферы. С их помощью были исследованы разнообразные ионосферные структуры: экваториальная аномалия, перемещающиеся ионосферные возмущения, главный ионосферный провал и др. [22, 23]. Кроме того, метод РТ успешно использовался для анализа искусственных возмущений ионосферы во время нагревных экспериментов на стендах EISCAT/Heating [24] и «Сура» [25-27]. РТреконструкции ранее уже с успехом использовались для моделирования лучевых траекторий в условиях естественной и антропогенной ионосферной возмущенности. Так, в [28] приводятся примеры формирования лучевых траекторий КВ-радиоволн в области экваториальной аномалии и проводятся сравнения с результатами, полученными в рамках модели IRI. В [26, 27] рассматривается лучевая структура для волны накачки стенда «Сура» в искусственно модифицированной среднеширотной ионосфере.

Целью настоящей работы является моделирование лучевых траекторий КВ-радиоволн и ионограмм наклонного зондирования в периоды искусственных ионосферных возмущений над Кольским полуостровом, вызванных промышленным взрывом 8 апреля 1990 г. и стартом ракеты-носителя 18 декабря 1991 г. на основе данных российской низкоорбитальной РТ-системы [30].

### 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### Низкоорбитальная радиотомография ионосферы

Для диагностики искусственных ионосферных возмущений в работе использовался метод низкоорбитальной РТ [22, 23], предполагающий восстановление поля (высотно-широтные распределения) электронной плотности по набору измеряемых интегралов от данного распределения вдоль различных лучей спутник—приемник. При использовании наземного приема двух когерентных частот в диапазонах 150/400 МГц с низкоорбитальных спутников системы Парус/Цикада или Transit, приведенная (к одной частоте) фаза принимаемых радиосигналов с высокой степенью точности пропорциональна линейному интегралу от электронной концентрации вдоль луча спутник—приемник:

$$\lambda r_e \int_l N(r,t) d\sigma = \varphi + \varphi_0, \tag{1}$$

где  $\lambda$  — длина зондирующей волны,  $r_e$  — классический радиус электрона, N(r, t) — распределение электронной концентрации, интегрирование ведется вдоль лучей спутник-приемник *l*. Для низкоорбитальных спутников, время пролета которых над измерительной системой не превышает характерного временного масштаба развития исследуемых неоднородностей, можно положить N(r, t) = N(r). Измерения приведенной фазы  $\varphi$  в нескольких приемных пунктах, расположенных вдоль траектории низкоорбитальных спутников на расстояниях порядка сотен километров, являются исходными данными для обратной задачи PT-реконструкции и образуют систему линейных интегральных уравнений вида (1). Отметим, что в эксперименте приведенная фаза  $\varphi$ определяется с точностью до неизвестной начальной фазы  $\varphi_0$ . Таким образом, встает вопрос ее оценки или исключения из системы уравнений. Наиболее удобным подходом к решению проблемы неизвестной начальной фазы является фазоразностный подход [29], т.е. решение задачи, в которой исходными данными являются приращения приведенной фазы  $\varphi$ , полученные на соседних близких лучах. Это эквивалентно попарному вычитанию уравнений типа (1) в исходной системе, что очевидным образом исключает неизвестные начальные фазы из системы. Полученная разностная система линейных интегральных уравнений может быть дискретизирована путем разложения реконструируемого распределения электронной концентрации N по базисным функциям, обеспечивающим интерполяцию (например, билинейную) значений в узлах выбранной высотноширотной сетки. Полученная в результате система линейных алгебраических уравнений эффективно решается итерационными методами (или их комбинацией) типа ART, DART или SIRT [22, 23].

Реконструкции ионосферы, анализируемые в настоящей работе, получены на первом этапе развития российской трансконтинентальной РТ-системы, когда она состояла всего из трех приемных пунктов: Москва (55.67° N, 37.32° E), Лехта (64.42° N, 33.97° E), Мурманск (69.59° N, 31.76° E). В дальнейшем цепочка приемников была продлена на север до Баренцбурга (78.1° N, 14.21° E) и на юг до Сочи (43.58° N, 39.77° E) с промежуточными пунктами в Воронеже (50.87° N, 39.06° E) и Ростове (47.21° N, 39.7° E) [30]. Геометрия эксперимента, используемая в настоящей работе, и пример записей фаз для одного из анализируемых в работе событий (старт ракеты-носителя с космодрома Плесецк 18.12.1991) приведены на рис. 1.



Рис. 1. Местоположение приемных пунктов РТ-системы и пример записей приведенной фазы во время пролета спутника Парус/Цикада 18.12.1991 (4:06UT)

На записях фаз отчетливо видны неоднородности различной интенсивности и масштаба, сопутствующие запуску ракеты-носителя. Реконструкция распределения электронной концентрации, полученная по этим данным, приведена в следующем разделе на рис. 2.

### Моделирование распространения КВ-радиоволн в ионосфере

Моделирование лучевых траекторий КВ-радиоволн при заданных параметрах передатчика (начальная задача) проводилось в настоящей работе в приближении геометрической оптики и было основано на решении уравнения эйконала методом характеристик, который сводится для каждой из двух нормальных мод к интегрированию системы из шести дифференциальных уравнений для координат и импульсов. В трехмерном виде в сферической системе координат уравнения лучей имеют вид [1, 8]:

$$\frac{dr}{d\tau} = -\frac{1}{c} \frac{\partial H/\partial k_r}{\partial H/\partial \omega},$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{1}{rc} \frac{\partial H/\partial k_{\theta}}{\partial H/\partial \omega},$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = -\frac{1}{rc\sin\theta} \frac{\partial H/\partial k_{\varphi}}{\partial H/\partial \omega},$$

$$\frac{dk_r}{d\tau} = \frac{1}{c} \frac{\partial H/\partial r}{\partial H/\partial \omega} + k_{\theta} \frac{d\theta}{d\tau} + k_{\varphi}\sin\theta \frac{d\varphi}{d\tau},$$

$$\frac{dk_{\theta}}{d\tau} = \frac{1}{r} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial H/\partial \theta}{\partial H/\partial \omega} - k_{\theta} \frac{dr}{d\tau} + k_{\varphi}r\cos\theta \frac{d\varphi}{d\tau}\right),$$

$$\frac{dk_{\varphi}}{d\tau} = \frac{1}{r\sin\theta} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial H/\partial \varphi}{\partial H/\partial \omega} - k_{\varphi}\sin\theta \frac{dr}{d\tau} - k_{\varphi}r\cos\theta \frac{d\theta}{d\tau}\right),$$
(2)

где r,  $\theta$  и  $\varphi$  — радиус, коширота и долгота,  $k_r$ ,  $k_{\theta}$ ,  $k_{\varphi}$  — соответствующие им компоненты волнового вектора,  $\tau$  — групповой путь, H — гамильтониан, взятый аналогично [8] в виде

$$H = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \frac{c^2}{\omega^2} \left( k_r^2 + k_{\theta}^2 + k_{\varphi}^2 \right) - n^2 \right], \qquad (3)$$

где c — скорость света,  $\omega$  — угловая частота, n показатель преломления, взятый согласно формуле Эпплтона-Хартри. В качестве модели геомагнитного поля была использована модель IGRF12 [14]. Поскольку РТ-реконструкции, используемые в качестве модели ионосферы, хорошо описывают F-область и не дают практически никакой информации о D-области, вносящей основной вклад в поглощение КВ-радиоволн, в настоящей работе использовалось бесстолкновительное приближение, т.е. показатель преломления в (3) был чисто действительным. Также отметим, что низкоорбитальные РТ-реконструкции дают информацию только о высотно-широтном распределении электронной концентрации вдоль цепочки приемных пунктов. При этом приемники российской сети расположены вдоль 121°Е геомагнитного меридиана. Тогда, полагая ионосферу однородной на определенном долготном интервале, мы вынуждены в данном случае ограничиться рассмотрением распространения КВ-радиоволн вдоль геомагнитного меридиана. Моделирование при этом проводилось в 3D, но долготный градиент электронной концентрации полагался нулевым. Отметим, что в невозмущенных условиях, в областях удаленных от солнечного терминатора, горизонтальные градиенты электронной концентрации малы по сравнению с вертикальным и приближение распространения КВ-радиоволн в плоскости большого круга выполняется с достаточной точностью [9].

Вопрос влияния долготных градиентов электронной концентрации в случае искусственных ионосферных неоднородностей на распространение КВ-радиоволн может быть достаточно серьезным и требует дополнительных исследований, например с привлечением современных данных РТ на основе глобальных спутниковых навигационных систем GNSS [22], которые позволяют получать трехмерные распределения электронной концентрации, в отличие от двумерных, используемых в настоящей работе. Вместе с тем необходимо отметить, что такие данные имеют в разы худшее пространственное разрешение, по сравнению с данными низкоорбитальной РТ, используемыми в настоящей работе, а для рассматриваемых исторических событий просто отсутствуют.

Система ОДУ (2) традиционно решается явными методами, например, методом Дорманда-Принса (модификация метода Рунге-Кутты 4 порядка точности) [31], однако для ряда начальных условий (например, при моделировании распространения КВрадиоволн в направлении, близком к направлению магнитного поля Земли) система (2) становится жесткой, что требует применения неявных методов решения, например формул обратного дифференцирования [32]. В настоящей работе используются оба этих метода решения ОДУ. Отметим также, что использование группового пути в качестве независимой переменной при решении системы (2) позволяет автоматически использовать меньший шаг интегрирования в области отражения радиоволны от ионосферы. Кроме того, систему (2) удобнее интегрировать в геомагнитных координатах.

Моделирование ионограмм наклонного зондирования в настоящей работе проводилось с использованием метода пристрелки, основанного на симплексной минимизации методом Нелдера-Мида [33]. Этот подход успешно использовался в [10] и показал большую эффективность по сравнению с методами, основанными на многомерном поиске решения [34]. В качестве минимизируемой использовалась функция  $F(az, el) = |\theta(az, el) - \theta_r| + |\varphi(az, el) - \varphi_r|$ , где  $\theta$ ,  $\varphi$  — коширота и долгота последней точки трассируемого луча на высоте приемника;  $\theta_r, \varphi_r$  — коширота и долгота приемника;  $az, \ el \ -$  углы выхода луча. Таким образом решается задача двумерной минимизации относительно азимута и угла возвышения. Преимуществом метода Нелдера-Мида является то, что он использует только значения минимизируемой функции и не использует ее производных, оценка которых в случае сложных моделей среды может быть затруднительна. Это приводит к тому, что данный метод не является оптимальным с точки зрения количества и времени вычислений, но вместе с тем позволяет добиться очень высокой точности пристрелки вплоть до сантиметра. Метод также позволяет, аккуратно варьируя параметры начального симплекса, получить все возможные лучи (верхние и нижние), соединяющие передатчик и приемник, при этом в случае наличия единственного такого луча начальное приближение может быть задано достаточно грубо [10].

Для проведения численного моделирования распространения КВ-радиоволн в ходе работы был разработан комплекс программ для решения бихарактеристической системы (2), являющийся переработкой исходного кода Джонса [8] для языка Python, с возможностью задания геомагнитного поля по модели IGRF и распределения электронной концентрации согласно модели IRI и данным РТ. Также реализован метод пристрелки в 3D, основанный на симплексной минимизации Нелдера-Мида. Нужно отметить, что использование свободно распространяемого языка Python дает доступ к удобной библиотеке научных вычислений scipy [35], содержащей как необходимые методы решения начальной задачи для бихарактеристической системы, так и методы симплексной минимизации, используемые в настоящей работе в процедуре пристрелки. Кроме того, существенно ускоряет скорость разработки доступная для Python библиотека pyglow [36], позволяющая использовать модели IRI и IGRF.

В следующем разделе приведены результаты моделирования лучевых картин и ионограмм наклонного и вертикального зондирования в искусственно возмущенной ионосфере во время промышленного взрыва и старта ракеты, полученные с использованием разработанного комплекса программ.

### 2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Старт ракеты-носителя «Циклон-3» с космодрома Плесецк 18 декабря 1991 г.

В качестве первого примера рассмотрим искусственные ионосферные возмущения, вызванные стартом ракеты-носителя «Циклон-3» с космодрома Плесецк 18 декабря 1991 г. (03:54 UT), и их влияние на синтезированные ионограммы наклонного зондирования. РТ-реконструкция распределения электронной концентрации в ионосфере по данным пролета одного из спутников Парус/Цикада вдоль приемников российской РТ-цепочки (геометрия эксперимента и записи приведенных фаз представлены на рис. 1) приблизительно через 12 мин после старта показана на рис. 2.

Отметим, что космодром Плесецк расположен примерно на 200 км в стороне от плоскости пролета спутника на ~63°с. ш. На представленной реконструкции видно, что структура ионосферных возмущений, вызванных запуском, достаточно сложна. В ней, наряду с достаточно крупными неоднородностями (~200-400 км), присутствуют возмущения с более мелкими масштабами (~50-70 км). Наклон фронта наблюдаемых квазиволновых структур также меняется и говорит о направлении и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений. В работе [37] показано, что зарегистрированные в данном эксперименте волновые возмущения электронной плотности связаны с генерацией акустогравитационных волн (АГВ) в верхней атмосфере при старте ракеты-носителя.

Обратимся теперь к рассмотрению синтезированной по данной реконструкции ионограммы слабонаклонного зондирования. В ходе моделирования гипотетический КВ-передатчик помещался в точке



Рис. 2. Реконструкция распределения электронной концентрации в ионосфере через 12 мин после старта ракетыносителя «Циклон-3» с космодрома Плесецк 18 декабря 1991 г.



Рис. 3. Синтезированные по данным РТ-реконструкции (рис. 2) (слева) и модели IRI2012 (справа) лучевые траектории (сверху) и ионограммы слабонаклонного зондирования (снизу). Сплошные траектории и синие точки на ионограмме соответствуют О-моде, пунктирные траектории и красные точки — Х-моде. Распределение электронной концентрации представлено цветом в изолиниях в диапазоне (0–0.27)·10<sup>12</sup>м<sup>-3</sup>

с геомагнитными координатами  $\theta = 26.66^\circ$ ,  $\varphi = 121^\circ$  (район обсерватории Ловозеро), гипотетический приемник помещался в точке с геомагнитными координатами  $\theta = 32^\circ$ ,  $\varphi = 121^\circ$ , таким образом длина трассы составляла ~595 км вдоль геомагнитного меридиана. На рис. 3 (слева) показаны лучевые траектории (сверху) и соответствующий им участок ионограммы наклонного зондирования для F-области (снизу), полученные на основе PT-реконструкции ионосферных возмущений, вызванных стартом ракеты-носителя (рис. 2). Сплошные траектории и синие точки на ионограмме соответствуют O-моде, пунктирные траектории и красные точки соответствуют X-моде.

Чтобы не перегружать график, результаты приведены с шагом 0.2 МГц для основной части ионограммы и с шагом 0.01 МГц вблизи максимально применимой частоты (МПЧ) и показаны только те траектории, точность пристрелки для которых была лучше 300 м. Результаты аналогичного моделирования, но для распределения электронной плотности, заданного согласно модели IRI2012, приведены на рис. 3 (справа). Хорошо видно, что данные РТ-реконструкции не дают никакой информации о D-области ионосферы. Модель IRI2012 по сравнению с РТ-реконструкциями существенным образом недооценивает значения электронной концентрации в максимуме F2-слоя  $(N_m F2)$ , при этом высота максимума слоя  $F2 (h_m F2)$  по данным РТ оказывается приблизительно на 80 км меньше, чем в модели IRI2012. Сама модель IRI2012 очевидным образом не описывает искусственные квазиволновые возмущения, наблюдаемые в данных РТ. С точки зрения распространения КВ-радиоволн это приводит к: 1) большей длине группового пути для рассматриваемой трассы по данным модели IRI2012 за счет большей  $h_m F2$ и меньшей  $f_O F2$  в модели по сравнению с РТ; 2) наличию характерных для ПИВ изгибов на наклонной ионограмме, синтезированной по РТ-реконструкции, в районе 3.8 МГц (О-мода) и 4.6 МГц (Х-мода), при этом точки отражения группируются в двух разнесенных по широте областях, в отличие от одной области для случая IRI2012; 3) несмотря на указанные выше различия, МПЧ для данных РТ и IRI2012 достаточно близки.

# Промышленный взрыв M = 2.4 на Кольском полуострове 8 апреля 1990 г.

Остановимся теперь на ионосферных возмущениях, вызванных мощным промышленным взрывом, и их влиянии на картину лучевых траекторий КВрадиоволн. Рассматриваемое в настоящей работе событие с магнитудой М = 2.4 произошло 8 апреля 1990 г. в 3:37 UT в точке с координатами 67.7 с.ш., 33.7 в.д. Геометрия расположения РТ-цепочки аналогична использовавшейся при регистрации ионосферных возмущений, вызванных стартом ракеты (рис. 1). Пролет спутника, использовавшегося при зондировании, наблюдался в 4:25 UT, т.е. через 48 мин после взрыва, при этом эпицентр взрыва лежал практически в плоскости пролета спутника. РТ-реконструкция распределения электронной концентрации, полученная во время данного пролета, показана на рис. 4 (слева). Видно, что в области, максимально приближенной к точке взрыва  $( heta \sim 27^\circ)$ , на всех высотах наблюдаются возмущения с характерным масштабом ~100 км. Согласно [38] такие долгоживущие возмущения в ионосфере в непосредственной близости от точки взрыва могут быть вызваны не только АГВ, но и формированием вихревых структур в нейтральной компоненте. На рис. 4 (справа) также в изолиниях приведено распределение электронной концентрации в исследуемое время согласно модели IRI2012. Отметим, что, как и в предыдущем случае, наблюдается некоторая недооценка значений  $N_m F2$  в модели по сравнению с данными РТ, при этом высота h<sub>m</sub>F2 по данным РТ и IRI2012 различаются уже не так значительно (~20 км). Отметим также, что модель IRI2012 адекватно воспроизводит средний широтный градиент электронной плотности, наблюдаемый в эксперименте, при этом очевидным образом в данных IRI2012 отсутствуют искусственные неоднородности, связанные с мощным взрывом, которые наблюдаются



Рис. 4. Синтезированные по данным РТ-реконструкции (слева) и модели IRI2012 (справа) лучевые траектории КВрадиоволн для гипотетического передатчика (О-мода, 6.55 МГц). Распределение электронной концентрации представлено цветом в изолиниях в диапазоне (0-0.61)·10<sup>12</sup>м<sup>-3</sup>

на РТ-реконструкции. Добавим, что, аналогично предыдущему случаю, данные РТ не могут адекватно воспроизвести параметры D-слоя ионосферы.

Рассмотрим влияние наблюдаемых искусственных неоднородностей на картину лучевых траекторий КВ-радиоволн. В численном эксперименте гипотетический КВ-передатчик располагался в точке с геомагнитными координатами ( $\theta = 30.2^{\circ}, \varphi = 121^{\circ}$ ), диаграмма направленности шириной 100° была ориентирована в зенит. Моделирование лучевых траекторий проводилось с шагом 2° по углу возвышения. На рис. 4 приведен пример подобного моделирования для частоты 6.55 МГц и О-моды распространения: слева — на основе данных РТ, справа — на основе данных модели IRI2012.

Хорошо видно, что из-за недооценки значений N<sub>m</sub>F2 в модели IRI2012, по сравнению с данными РТ, для лучевой картины, полученной на основе данных IRI2012, наблюдается большее число траекторий, достигающих высот внешней ионосферы, при этом не претерпевая существенного преломления. Напротив, в лучевой картине, полученной по данным РТ, существенно больше лучей претерпевает отражение от ионосферы. Результатом этого является существенная разница в размере области тени и длине односкачковой трассы по данным IRI2012 и РТ. Кроме того, из-за наличия квазиволновой структуры в распределении электронной концентрации по данным РТ наблюдается более сложная лучевая картина, включающая канальное распространение до высот внешней ионосферы с отражением от максимумов ПИВ. Данное обстоятельство приводит также к появлению дополнительных следов на ионограммах вертикального зондирования.

На рис. 5 приведен пример синтезированной по данным РТ (рис. 4, слева) ионограммы вертикального зондирования в диапазоне частот 5–7.5 МГц. Гипотетический ионозонд располагался аналогично в точке с геомагнитными координатами  $\theta = 30.2^\circ$ ,



Рис. 5. Участок синтезированной по данным РТ (рис. 4, слева) ионограммы вертикального зондирования в диапазоне 5–8 МГц для гипотетического ионозонда с геомагнитными координатами ( $\theta = 30.2^{\circ}, \varphi = 121^{\circ}$ ). Синие маркеры соответствуют О-моде, красные — Х-моде

 $\varphi = 121^{\circ}$ . Рассматривались только лучи с точностью пристрелки лучше 500 м. Отметим наличие двух «серповидных» дополнительных следов на ионограмме для О-моды в диапазоне частот 6.3-6.6 МГц и 6.6-6.8 МГц. Данные следы соответствуют отражениям от двух максимумов электронной концентрации с heta  $\sim$  29° и heta  $\sim$  32° (см. рис. 4, слева), в то время как основной след соответствует квазивертикальному распространению. Заметим, что подобные дополнительные следы хуже наблюдаются в нашем случае для Х-моды, что хорошо соответствует результатам моделирования ионограмм вертикального зондирования при прохождении ПИВ, вызванных АГВ, представленным, например, в [39], где показано, что влияние таких возмущений на основной след О-моды существенно больше по сравнению с влиянием на след Х-моды.

Отметим, что в работе [40] приведены оценки характерных скоростей ПИВ, генерируемых при запусках ракет и промышленных взрывах. Как правило, наблюдались ударные акустические волны (УАВ), распространяющиеся со скоростями ~1000 м/с. Это дает оценку времени проявления эффекта ПИВ на ионограммах порядка нескольких минут, что в целом затрудняет регистрацию на классических ионозондах, но показывает потенциальную возможность уверенной диагностики таких возмущений на основе скоростных ЛЧМ-ионозондов [41]. Вместе с тем необходимо отметить, что в рассматриваемом нами случае промышленного взрыва ионосферные возмущения наблюдались спустя 48 мин в непосредственной близости от эпицентра, что свидетельствует об отличном от УАВ механизме формирования наблюдаемых возмущений, которые в [38] объясняются формированием вихревых структур в нейтральной компоненте. Подобные долгоживущие возмущения могут быть зарегистрированы и с помощью классических ионозондов. Отметим, что моделирование дополнительных следов на ионограммах в период прохождения ПИВ на основе данных РТ затруднено из-за недостаточного временного разрешения метода, определяемого частотой пролета спутников над цепочкой приемников. Даже в период наибольшего развития спутниковых группировок (1990-е и 2000-е гг.) это время составляло ~30 мин, что явно недостаточно, чтобы проследить эволюцию дополнительных следов на ионограммах, вызванных ПИВ с характерными скоростями в сотни метров в секунду.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что методы трассировки КВрадиоволн в неоднородной, анизотропной ионосфере, основанные на решении характеристической системы для уравнения эйконала и методе пристрелки, использующем симплексную минимизацию, позволяют эффективно моделировать особенности лучевых траекторий и ионограмм вертикального и слабонаклонного зондирования в случае присутствия ионосферных неоднородностей искусственного происхождения. Как показали результаты данной работы, на примере старта ракеты-носителя и мощного промышленного взрыва, а также результаты [26, 27] для мощного КВ-радионагрева, наблюдаемые искусственные ионосферные возмущения обладают широким спектром пространственных масштабов от десятков до сотен километров, могут быть как локализованы в области искусственного воздействия, так и распространяться на значительные, до ~1000 км, расстояния в виде АГВ/ПИВ. В комбинации с постоянно присутствующими в ионосфере естественными ПИВ это может приводить к трудностям при автоматической интерпретации ионограмм вертикального и наклонного зондирования за счет наличия дополнительных следов. Методы спутниковой РТ-ионосферы позволяют не только провести моделирование особенностей распространения КВ-радиоволн в ионосфере, но и в сочетании с методами вертикального и слабонаклонного зондирования эффективно исследовать структуру и динамику ионосферных неоднородностей естественного и искусственного происхожления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-01250).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Haselgrove J.* Ray theory and a new method for ray tracing, in: Conference on the Physics of the Ionosphere, Phys. Soc. of London, London, 1954. P. 355
- 2. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. // УФН. 1975. **116**, № 7. С. 540.
- 3. Анютин А. П. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. **12**, № 9. С. 26.
- Куркин В. И., Орлов И. И., Попов В. Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981.
- 5. *Черкашин Ю. Н., Чернова В. А.* // Дифракционные эффекты декаметровых радиоволн в ионосфере. 1977. С. 22.
- 6. *Тинин М. В. //* Изв. вузов. Радиофизика. 1980. **23**, № 4. С. 498.
- 7. Лукин, Д.С., Палкин Е.А. Теоретическое и экспериментальное исследование распространения декаметровых радиоволн. 1976. С. 149.
- Jones R. M., Stephenson J. J. A versatile three dimensional ray tracing computer program for radio waves in the ionosphere. OT Report, 75–76, US Department of Commerce, Office of Telecommunication, US Government Printing Office, Washington, USA, 1975.
- Settimi A., Pezzopane M., Pietrella M. // Radio Sci. 2013. 48. P. 167.
- Strangeways H.J. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. 62, N 15. P. 1361.
- 11. Coleman C. J. // Radio Sci. 2011. 46, N 5. RS5016.
- Носиков И. А., Бессараб П. Ф., Клименко М. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. LIX, № 3. С. 1.
- Nosikov I.A., Klimenko M. V., Bessarab P.F., Zbankov G.A. // Advances in Space Research. 2017. 60, N 2. P. 491.
- 14. Thébault et al. // Planets and Space. 2015. 67, N 1.
- Krasheninnikov I. V., Egorov I. B. // J. Advances in Space Research. 2010. 45. P. 268.
- Zaalov N. Y., Moskaleva E. V., Burmakina T. S. // J. Advances in Space Research. 2017. 60, N 10. P. 2252.
- Часовитин Ю. К., Широчков А. В. и др. // Ионосферные исследования. № 44. М.: МГК, 1988. С. 6.
- Клименко М. В., Клименко В. В., Бессараб Ф. С. // Геомагнетизм и Аэрономия. 2015. 55, № 5.
- Котова Д. С., Клименко М. В., Клименко В. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. 57, № 7. С. 519.
- Andreeva E. S., Anoshin B. A., Kunitsyn V. E., Leont'eva E. A. // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. 51, N 6. P. 783.
- Karpachev A. T., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Pustovalova L. V. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. 146. P. 149.
- Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S., Nesterov I. A. // Physics Uspekhi. 2010. 53, N 5. P. 523.
- 23. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
- 24. Tereshchenko E.D., Kozlova M.O., Evstafiev O.V. et al. // Ann. Geophys. 2000. 18. P. 1197.
- 25. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V. et al. // Phys. Lett. A. 2004. **325**. P. 381.
- 26. Andreeva E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E. et al. // Radio Sci. 2016. 51. P. 638.
- James H. G., Frolov V. L., Andreeva E. S. et al. // Radio Sci. 2017. 52. P. 259.
- Андреева Е. С., Крюковский А. С., Куницын В. Е. и др. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии

ионосферы в окрестности экваториальной аномалии / Распространение радиоволн: Сб. докл. XXIII Всероссийской научной конференции (23–26 мая 2011; Йошкар-Ола). Марийский государственный технический университет, 2011. т. 3. С. 288–291.

- Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Razinkov O. G., Tereshchenko E. D. // International Journal of Imaging Systems and Technology. 1994. 5, N 2. P. 128.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2009. № 6. С. 102. (Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2009. 64, N 6. P. 661.)
- 31. Dormand R., Prince P.J. // Journal of Computational and Applied Mathematics. 1980. **6**, N 1. P. 19.
- 32. Curtiss C. F., Hirschfelder J. O. // Proceedings of the National Academy of Science. 1952. **38**, N 3. P. 235.

- Nelder J. A., Mead R. // The Computer Journal. 1965. 7, N 4. P. 308.
- 34. Reilly M. H. // Radio Sci. 1991. 26, N 4. P. 971.
- 35. https://www.scipy.org
- 36. https://github.com/timduly4/pyglow
- 37. Ahmadov R.R., Kunitsyn V.E. // Int. J. Geomagn. Aeron. 5, N 2. GI2002.
- Andreeva E. S., Gokhberg M. B., Kunitsyn V. E. // Cosmic Res. 2001. 39, N 1. P. 10.
- 39. Cervera M.A., Harris T.J. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2014. **119**. P. 431.
- 40. Afraimovich E. L., Kosogorov E. A., Palamarchouk K. S. et al. // Earth Planet Sp. 2000. **52**. P. 1061.
- 41. Berngardt O. I., Bubnova T. V., Podlesnyi A. V. // Solar-Terrestrial Physics. 2018. 4, N 1. P. 64.

## Modeling the HF Ray Trajectories and Vertical and Oblique Ionograms in the Artificially Disturbed Ionosphere Based on Radiotomographic Data

### A. M. Padokhin<sup>a</sup>, E. S. Andreeva, M. O. Nazarenko, M. A. Annenkov, N. A. Tereshin

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: <sup>a</sup>padokhin@physics.msu.ru.

This paper presents the results of numerical simulation of the propagation of HF radio waves in the artificially disturbed ionosphere during launch of the Tsyklon-3 carrier rocket from the Plesetsk cosmodrome on December 18, 1991, and an industrial high-power explosion with a magnitude of M = 2.4 on the Kola Peninsula on April 8, 1990. A specially developed software package in Python programming language allows three-dimensional modeling of ray trajectories in the geometric optics approximation by solving a bicharacteristic system for the eikonal equation. The geomagnetic field is specified according to the IGRF model, and the ionospheric electron density distribution is specified according to radio tomography data. The ionogram modeling is performed using a three-dimensional shooting method based on the Nelder–Mead simplex minimization. It is shown that the artificial ionospheric irregularities that arise during the periods of the considered events are quasi-wave perturbations that have a significant effect on the ray trajectories of HF radio waves and ionograms of vertical and oblique sounding. This effect manifests itself in the form of characteristic peculiarities of ray trajectories with multiple reflections from the local maxima of the electron density and additional traces on ionograms caused by the passage of traveling ionospheric disturbances above the sounding system.

*Keywords*: HF-rays, radio tomography of ionosphere, HF-rays spread. PACS: 94.20.Bb. *Received 23 December 2018*.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2019. 74, No. 3. Pp. 282-290.

### Сведения об авторах

- 1. Падохин Артем Михайлович канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: padokhin@physics.msu.ru.
- 2. Андреева Елена Станиславовна канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: es\_andreeva@mail.ru.ru.
- 3. Назаренко Марина Олеговна канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: m.o.nazarenko@mail.ru.
- 4. Анненков Михаил Александрович аспирант; e-mail: annenkov@physics.msu.ru.
- 5. Терешин Никита Алексеевич мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-77, e-mail: nikita.tereshin@gmail.com.