



УДК 53.02:087.4

ОБ УЧЕТЕ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛИНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ CHARM-IONS

А. В. Николаев^{1,2}, Е. И. Старовойтов³, А. А. Криволицкий⁴, М. В. Банин⁴,
А. А. Куколева⁵, Д. М. Бодунов², А. А. Логунов⁶

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»), г. Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук (ФГБУН «ИМАШ РАН»), г. Москва, Россия

³АО «Концерн «Вега», г. Москва, Россия

⁴Центральная аэрологическая обсерватория (ФГБУ «ЦАО»), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

⁵Московский государственный технический университет гражданской авиации (ФГБОУ ВО МГТУ ГА), г. Москва, Россия

⁶ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева», Московская обл., г. Королев, Россия

В научной статье рассмотрен вариант описания профиля электронной концентрации атмосферы, вплоть до её физической границы, с помощью функций приближения разного вида. Показано, что для инженерных расчетов при проектировании космических радиолоний могут быть использованы некоторые параметры атмосферы, полученные с помощью гибридной модели CHARM-IONS. Данная модель, созданная авторами путем объединения двух известных моделей CHARM-DE и IRI, позволяет для произвольной радиотрассы в пределах физической границы атмосферы с помощью известных формул оценить интегральное ослабление электромагнитной волны в широком диапазоне радиочастот. Приведены примеры использования стандартных методов аппроксимации экспериментальных данных для получения полиномиальных характеристик и описания профилей электронной концентрации атмосферы на высотах до 1000 км.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АТМОСФЕРА, ИОНОСФЕРА, ГЛОБАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО, АППРОКСИМАЦИЯ, ФУНКЦИЯ ПРИБЛИЖЕНИЯ

DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_93

<https://elibrary.ru/ejqhee>

1. ВВЕДЕНИЕ

Устойчивая и надежная связь с космическими объектами (КО), а также получение от них высокоточной навигационной информации достигаются, если на этапе проектирования космических радиолоний учитываются потери энергии и фазовые искажения электромагнитной волны в пределах физической границы атмосферы Земли, определяющие соответственно отношение сигнал/шум и задержки сигнала на входе радиоприемного устройства.

Электронная почта авторов для переписки:

Николаев Алексей Владимирович, alarmoren@yandex.ru
Старовойтов Евгений Игоревич, evgstarovojtov@yandex.ru
Криволицкий Алексей Александрович, krivolutsky@mail.ru
Банин Максим Викторович, baninmax@yandex.ru
Куколева Анна Александровна, kuanfao@rambler.ru
Бодунов Дмитрий Михайлович, d-bodounov@mail.ru
Логунов Артем Алексеевич, post@rsce.ru



<https://elibrary.ru/ejqhee>

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

В настоящее время существует порядка десяти трехмерных моделей, включая отечественную фотохимическую модель CHARM-DE и международную стандартную эмпирическую модель земной ионосферы IRI, захватывающих воздушное и приземное космическое пространство, а также ближний и частично дальний космос. Список и краткое описание этих моделей можно найти в работах [1] и [2], посвященных результатам международного проекта NEPPA (High Energetic Particle Precipitation in the Atmosphere). Модель CHARM-DE может дополнять отечественную прогностическую модель Гидрометцентра «ПЛАВ» (Глобальная полулагранжева модель атмосферы).

Объединяя две традиционные модели ионосферы CHARM-DE и IRI, результирующая гибридная модель CHARM-IONS приобрела качественно новые свойства и характеристики, позволяющие описывать с помощью числовых функций профиль электронной концентрации в пределах физической границы атмосферы и частично дальнего космоса.

Созданная гибридная модель CHARM-IONS в виде программного кода позволяет оперативно получать и хранить данные, например, с использованием облачного сервиса, начиная с 1 января 1958 г. для заданной даты, времени и географической координаты.

В настоящей статье представлены результирующие данные, полученные с помощью гибридной модели CHARM-IONS, в виде вертикального профиля электронной концентрации (см. рис. 1). В основе отечественной модели ионосферы CHARM-DE лежит решение системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [3, 4], описывающих воздушное и приземное космическое пространство от 0 до 130 км с использованием 167 химических реакций в пределах физической границы атмосферы Земли [5]. Международная модель IRI включает в себя глобальные эмпирические детерминированные модели, построенные на основании обработки большого объема экспериментальных данных, полученных различными радиофизическими методами, а также прямыми измерениями параметров ионосферы с помощью геофизических ракет и искусственных спутников Земли [6]. База данных в модели IRI постоянно пополняется и содержит детальную геофизическую информацию об околоземном космическом пространстве в пределах от 90 до 2000 км.

Для упрощения инженерных расчетов при проектировании космических радиолиний предлагается использовать функцию приближения (например, полиномиальную, экспоненциальную или логарифмическую), описывающую параметры атмосферы с помощью гибридной модели. В [7, 8] отмечается, что решение прикладных задач для космической отрасли на различных этапах развития радиоэлектроники осложнено отсутствием детального описания геофизических параметров атмосферы. В связи с этим, как правило, на практике используют уравнения траекторий радиолучей в ионизированной плазме, в которых учитываются явления отражения и преломления электромагнитной волны. Указанное обстоятельство и привело авторов статьи к идее создания упрощенного описания распределения концентрации электронов по высоте и наклонной дальности в пределах физической границы атмосферы, а также использования известных аналитических выражений для выполнения инженерных расчетов при оценке интегрального ослабления электромагнитной волны на произвольных радиотрассах. Речь, таким образом, идет об использовании некоторой аналитической элементарной функции приближения, способной в реальном времени для конкретной географической координаты пункта передачи и приема радиосигнала описать распределение электронной концентрации и решить прикладные задачи для космической отрасли. К таким задачам прежде всего следует отнести создание единой и общепринятой методики определения характеристик ионосферы, а также оперативной оценки влияния потерь и задержек сигнала, возникающих в космических радиолиниях.

2. АКТУАЛЬНОСТЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО УЧАСТКА РАДИОТРАССЫ ДЛЯ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН

Исторически радиотехника развивалась от низких к высоким частотам, в сторону уменьшения рабочих длин волн. В начале XX в. в технике связи использовались диапазоны длинных (ДВ) и средних волн (СВ), вскоре к ним добавился диапазон коротких волн (КВ), который позволил значительно увеличить дальность уверенного приема радиосигнала. В 1940-е гг. была создана аппаратура сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона, сигналы которой принимались объектами, находящимися под водой, подо льдом и внутри зданий. После создания сети мощных радиостанций для связи с подводными объектами, а также для передачи сигналов эталонных частот и единого времени, это направление не получило дальнейшего развития. Диапазон СВ широко использовался в

радионавигации до применения глобальных навигационных систем (ГНСС). Создание полупроводниковой элементной базы в 1950-е и 1960-е гг. способствовало переходу радио- и телевизионного вещания в диапазон ультракоротких волн (УКВ), а необходимость контроля за воздушным пространством радиолокационными станциями и развитие космических программ способствовали освоению все более высоких частот.

В настоящее время для нужд космической связи, передачи телеметрической информации с борта КО и сигналов ГНСС используется диапазон УКВ, где влияние ионосферы на распространение радиоволн еще проявляется, но не так выражено, как в областях с большими длинами волн. За два десятилетия XXI в. в космической связи был освоен оптический диапазон длин волн, что позволило использовать лазерный канал для передачи данных на Землю с низкой околоземной орбиты [9] и с орбиты Луны [10].

Современная ситуация с доступностью сигналов ГНСС в различных регионах и возможностями непрерывного получения достоверных навигационных данных показывает, что остаются востребованными действующие радионавигационные системы СВ-диапазона, а техника СДВ-диапазона может получить новый импульс для своего развития. При этом, характеристики радиолинии СДВ-диапазона в значительной степени определяются состоянием ионосферы.

Можно уверенно сказать, что актуальные сейчас задачи разработки новых и модернизации существующих систем радионавигации, систем космической связи (в том числе оптического диапазона) связаны с более детальным учетом влияния атмосферного участка трассы распространения сигнала, в первую очередь параметров ионосферы.

3. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛИНИЙ

В настоящее время отсутствует единая и общепринятая методика оценки влияния потерь, возникающих в космических радиолиниях [11, 12]. Эта оценка усложняется тем, что во время сеанса связи в широких пределах изменяется расстояние между КО и наземным пунктом приема (НИП), а также угол места КО, значение которых влияет на ослабление радиосигнала. Так, в НИП минимальная величина угла места ограничена рельефом местности, наличием растительности и застройкой территории вокруг него. Вместе с тем, воздушные измерительные пункты (ВИП) на базе беспилотных летательных аппаратов, предназначенные для постоянного телеметрического контроля КО в произвольных географических районах, лишены этого недостатка и при их эксплуатации на первый план выходят ограничения связанные с влиянием атмосферы на уровень принимаемого радиосигнала. Минимальный угол места определяет размер зоны радиовидимости, от которого зависит количество ВИП, задействованных для слежения за КО [13].

Для частот до 6 ГГц угол места должен быть не менее 3...5°, а работа на частотах выше 10 ГГц возможна при углах места более 10...15°. По этой причине на участках траектории КО, где предполагается установка с ним радиосвязи, значение угла места должно быть не менее 30° [14].

Дальнейшее совершенствование космических технологий, улучшение характеристик и повышение эффективности космической связи и ГНСС на базе спутниковых группировок, требует исследования механизма ослабления радиосигнала на произвольных радиотрассах в пределах физической границы атмосферы Земли. При расчете бюджета космической радиолинии необходимо также учитывать поглощение в ионосфере, обусловленное столкновениями свободных заряженных частиц с нейтральными молекулами и атомами. Поглощение в ионосфере обратно пропорционально квадрату частоты из-за инерционности заряженных частиц и становится пренебрежимо мало на частотах выше 100...150 МГц [11]. При этом ионосфера активно влияет на распространение радиоволн на частотах ниже 5 ГГц, а на частотах менее 3 ГГц, может привести к изменению поляризации и задержке радиосигналов [12].

При прохождении радиоволн с частотой до 10 ГГц в ионосфере происходит фарадеевское вращение плоскости поляризации, угол поворота которого равен [15]

$$\varphi = 2,36 \cdot 10^{-14} \cdot \frac{B_{\alpha} \cdot N_T}{f^2} \quad (1)$$

где B_{α} – средний уровень магнитного поля Земли (Тесла); N_T – полное содержание электронов (эл/м²); f – частота (ГГц).

Заряженные частицы замедляют распространение радиоволн с частотой менее 3 ГГц, формируя групповую задержку сигнала, которая составляет [15]

$$t = 1,345 \cdot \frac{N_T}{f^2 \cdot 10^{-7}} \quad (2)$$

К примеру, групповое запаздывание радиоволн является одним из основных источников погрешностей определения координат одночастотным навигационным приемником ГНСС. Для снижения этих погрешностей необходимы оценки влияния на групповые задержки радиоволн отклонения их реальных криволинейных траекторий от прямых линий. Это может уменьшить ошибки при определении дальности до навигационных спутников с углом места менее 10...15°, наличие которых в зоне видимости позволяет улучшить точность определения местоположения [16].

При прохождении радиоволны через ионосферу Земли проявляется влияние флуктуаций (мерцаний ионосферы), приводящих к изменениям угла прихода, амплитуды и фазы электромагнитной волны в пункте приема, а следовательно, и уровня радиосигнала на входе антенны радиоприемной станции. Интерференция флуктуирующих сигналов на входе антенны является причиной замираний радиоволн (фединг), полный размах которых описывается эмпирическим выражением [15]

$$P = 27,5 * S^{1,26} \text{ дБ} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2}{\langle U \rangle^2}} \quad (4)$$

где S – индекс мерцаний; U – интенсивность сигнала.

Замирания радиоволн на частотах до 5 ГГц, обусловленные случайными и регулярными (как почасовыми, так и среднесуточными, и сезонными) колебаниями электрических параметров атмосферы Земли, могут иметь полный размах более 10 дБ. Групповая задержка радиосигналов на радиотрассе в пределах физической границы атмосферы, влияет на синхронизацию систем, что негативно отражается на работе космической радиолинии.

Единственным способом описания распределения электронной концентрации в ионосфере при оценке ее влияния на качество канала космической связи является использование различных электродинамических моделей среды распространения радиоволн. При этом в существующих моделях сложно поддаются учету солнечная, геомагнитная и атмосферная активность, а также ни в одной глобальной модели не учитывается эффект задержки вариаций электронной концентрации относительно изменений день-от-дня индекса солнечной активности [17]. Для оценки величины полного содержания электронов можно использовать либо процедуру, основанную на эталонной международной модели ионосферы (IRI), либо более гибкую процедуру, также применимую для определения данной величины на наклонных трассах и основанную на модели NeQuick [15]. Следует отметить, что оценки эффектов распространения радиоволн на трассах Земля-космос как правило производят для частот от 0,1 до 12 ГГц в диапазоне высот от 90 до 2000 км, тем самым не учитываются мерцания и замирания, вызванные гидрометеорологическими явлениями на высотах в диапазоне от 0 до 90 км.

4. ОПИСАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ ФУНКЦИЕЙ ПРИБЛИЖЕНИЯ

Разработанная авторами гибридная модель ионосферы CHARM-IONS представляет собой объединение фотохимической модели CHARM-DE [18] и международной модели IRI, позволяющее построить профили электронной концентрации до высоты 1000 км с дискретностью 2 км и разрешением 1 км. При этом, профили для диапазона высот от 0 до 130 км получены с помощью модели CHARM-DE, а в диапазоне высот от 130 до 1000 км используются данные модели IRI (см. рис. 1). В диапазоне высот от 90 до 130 км обе модели дают одинаковую картину профилей электронной концентрации, а высота «стыка» моделей (130 км), является практическим потолком модели CHARM-DE.

Важно отметить, что с помощью гибридной модели возможно построение кривых распределения концентрации электронов с высокой детализацией всего пространства в пределах физической границы атмосферы, и получение слоисто-неоднородной модели трассы распространения радиоволны в широком диапазоне частот. Слоистое представление модели атмосферы позволяет учитывать интегральные потери сигнала на вертикальных и наклонных радиотрассах, а также оценивать преломление электромагнитной волны на границе двух слоев. Последнее важно при расчетах модифицированной дальности до КО, т.е. полученной путем преобразования расчетной траектории луча с учетом коэффициента его преломления.

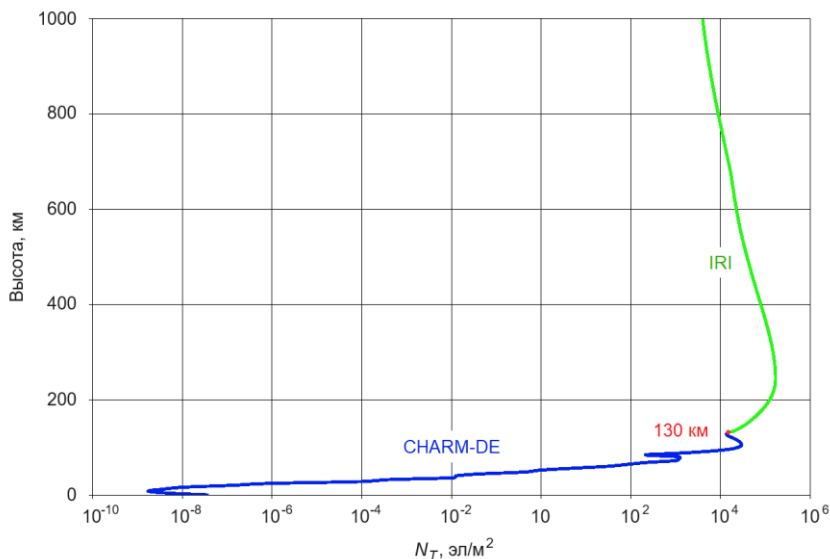


Рис. 1. Профиль электронной концентрации 23.09.1991 (45° с.ш., 180° в.д., полдень), выполненный по расчетам с помощью гибридной модели CHARM-IONS: показаны участки профиля, полученные с помощью модели CHARM-DE (синий цвет) и с использованием модели IRI (зеленый цвет), а также точка «стыка» двух моделей на высоте 130 км

Полученные с помощью модели CHARM-IONS профили электронной концентрации – распределения электронов по высоте выдаются в виде электронной таблицы, что не всегда удобно для решения прикладных задач.

Для удобства и упрощения применения разработанной модели в инженерной практике предлагается для описания электронных профилей использовать функции приближения. В ходе исследования были рассмотрены вопросы построения аппроксимирующих функций стандартными методами приближений и с помощью интерполяции данных сплайнами.

При сравнении результатов экспоненциальной, логарифмической и полиномиальной аппроксимаций [19], наиболее близкое к экспериментальным данным описание электронного профиля было получено двумя полиномами пятой степени вида

$$P(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \alpha_2 \cdot x^2 + \dots + \alpha_n \cdot x^n \quad (5)$$

где $\alpha_i, i = 0, 1, \dots, 5$ – коэффициенты полинома.

На рисунке 2 представлен профиль электронной концентрации, полученный с помощью выражения (5). Был использован полином пятой степени, коэффициенты которого (указаны в таблице 1) были получены аппроксимацией электронных данных.

Таблица 1. Коэффициенты полинома, используемые для описания двух диапазонов высот исследуемой радиотрассы

Коэффициенты полинома	Диапазон высот	
	0...130 км	130...1000 км
a_0	$1,08726108 \cdot 10^3$	43,6100019
a_1	$3,68672111 \cdot 10^{-2}$	$6,21358756 \cdot 10^{-3}$
a_2	$-8,76290670 \cdot 10^{-7}$	$-1,56883412 \cdot 10^{-7}$
a_3	$-1,03576790 \cdot 10^{-11}$	$2,07271507 \cdot 10^{-12}$
a_4	$-5,76752931 \cdot 10^{-17}$	$-1,26535599 \cdot 10^{-17}$
a_5	$-1,21255877 \cdot 10^{-22}$	$2,86771862 \cdot 10^{-23}$

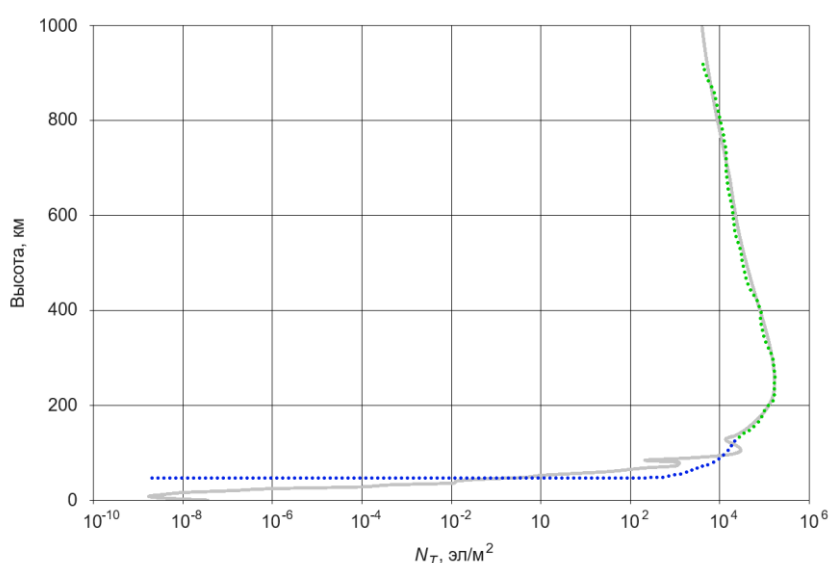


Рис. 2. Описание профиля электронной концентрации, полученного посредством модели CHARM-IONS с помощью полинома пятой степени: синим цветом отмечен участок полинома с коэффициентами для диапазона высот от 0 до 130 км; зеленым цветом отмечен участок полинома с коэффициентами для диапазона высот от 130 до 1000 км; серым цветом показан исходный профиль электронной концентрации 23.09.1991 (45° с.ш., 180° в.д., полдень)

Прямолинейный горизонтальный участок графика функции приближения на рис. 2 соответствует высоте около 50 км. Такой вариант моделирования расслоенного профиля N_T неприемлем при моделировании электронных концентраций на высотах более 50 км, где величина N_T резко возрастает на несколько порядков. Это приведет к значительным погрешностям при инженерных расчетах радиолиний.

Использование отличающихся моделей аппроксимации профиля электронной концентрации приводит к возникновению ошибок различной величины. Выбор оптимальной функции приближения зависит от конкретной задачи, для решения может использоваться как непрерывная функция, так и ее дискретное представление. Следовательно, для наиболее достоверного описания распределения электронов в различных диапазонах высот потребуется использование нескольких аналитических соотношений [6]. Поэтому полученный с помощью гибридной модели CHARM-IONS электронный профиль можно отнести к т.н. «незакономерным кривым», которые в инженерных расчетах можно аппроксимировать различными аналитическими функциями.

В связи с тем, что известны все точки, соответствующие электронной концентрации для значений высоты с дискретностью 2 км, то для получения значений между этими точками может быть

использовано сплайновое приближение, являющееся кусочно-гладким описанием электронного профиля. Недостаток этого подхода заключается в отсутствии общего выражения для всей кривой, характеризующей распределение электронов во всем диапазоне высот на рассматриваемой радиотрассе.

В тоже время полученная дискретная функция может служить фундаментальной основой для модели слоисто-неоднородной радиотрассы и представляет новый подход к проектированию космических радиолиний. Опыт конструирования машин и механизмов показывает, что для аппроксимации «незакономерных кривых», описывающих форму деталей и элементов конструкции могут быть использованы кривые Безье [20], широко используемые в инженерной графике и системах автоматизированного проектирования. В общем виде кривые Безье, характеризующие ионосферный участок радиотрассы, можно представить как

$$\sum_{i=0}^n B_i^n(t) \cdot x_i = \sum_{i=0}^n C_n^i \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \cdot x_i \quad (6)$$

$$C_n^i = \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \quad (7)$$

где $B_i^n(t)$ – базисный полином Бернштейна; $t \in [0, 1]$ – заданный шаг интервала; $B(0) = B_0$ – начальная точка проектируемой радиотрассы; $B(1) = B_n$ – конечная точка трассы. Остальные точки управляют формой кривой и будут зависеть от солнечно-атмосферных связей. Вычисление параметров кривой Безье сводится к вычислению параметров кривых меньшего порядка, что является основой рекурсивного алгоритма де Кастельжо. Каждая из кривых меньшего порядка содержит на одну контрольную точку меньше, чем исходная кривая Безье, и процесс продолжается пока не останется одна точка.

Кривые Безье, в отличие от сплайнов используют контрольные точки для уточнения формы. При изменении контрольной точки происходит локальное искажение формы. Кривая Безье n -степени находится внутри выпуклой оболочки из $n + 1$ точек, что позволяет легко решать задачи визуализации и отсечения. Кроме того, для кривых Безье не требуется задавать в явном виде касательные вектора, а достаточно только опорных точек. В рассматриваемом случае при аппроксимации профиля электронной концентрации используются именно те опорные точки, которые сформированы внешними причинами (активностью Солнца) и определяют особенность профиля – слоев ионосферы D, E, F_1, F_2 и т.д.

В то же время, добавление хотя бы одной опорной точки потребует полного пересчета функциональных коэффициентов в параметрическом задании кривой Безье.

Результат квадратичной аппроксимации кривыми Безье исходного профиля электронной концентрации, полученного посредством модели CHARM-IONS на дату 23.09.1991 (45° с.ш., 180° в.д., полдень) совпадает с данными, представленными на рис. 1.

В то же время пример с полиномами пятой степени показывает, что для использования функции приближения в инженерных расчетах необходима оценка погрешности аппроксимации профиля электронной концентрации. В связи с тем, что значение полного содержания электронов изменяется в диапазоне от 10^{-10} до 10^6 , абсолютная и относительная погрешности в данном случае являются малоинформативными. Поэтому для оценки предлагается использовать приведенную погрешность, определяемую выражением

$$\gamma = \frac{N_T(x) - B(x)}{N_n} \cdot 100\% \quad (8)$$

где N_n – нормирующее значение полного содержания электронов; $N_T(x)$ – полное содержание электронов на высоте x .

В качестве нормирующего значения принята максимальная величина полного содержания электронов $N_n = N_{max}$. Выражение (8) позволяет получить оценку погрешности энергетического расчета радиолинии и изменения фазы радиоволны.

На рисунке 3 представлена кривая приведенной погрешности, являющейся важной оценочной характеристикой точности моделирования процесса. Максимальное расхождение между табличными данными, полученными по модели CHARM-IONS для полдня 23.09.1991, 45° с. ш., 180° в. д., и их

квадратичной аппроксимацией кривой Безье не превышает 0,7%. Это позволяет рекомендовать предложенный вариант описания вертикального профиля к использованию в дальнейших прикладных исследованиях и при инженерных расчетах радиолиний, радиотрасса которых проходит сквозь ионосферу Земли.

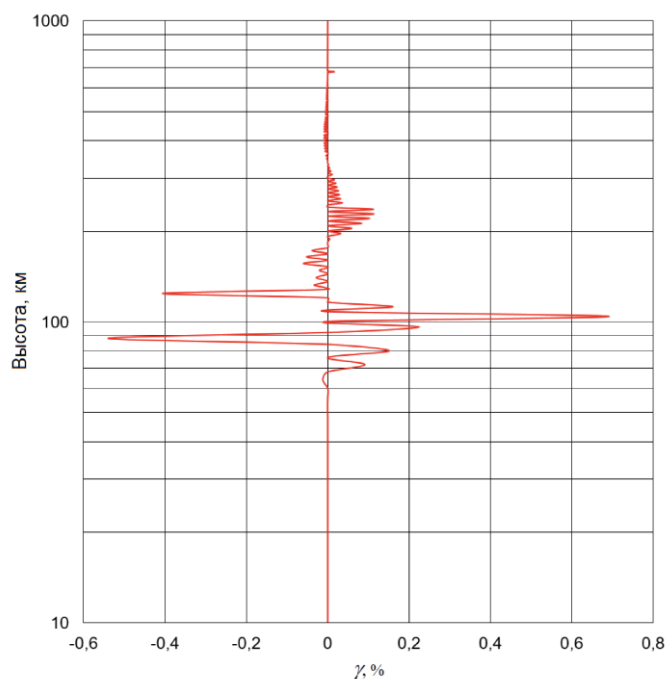


Рис. 3. Приведенная погрешность квадратичной аппроксимации вертикального профиля распределения концентрации электронов в атмосфере Земли на 23.09.1991 (45° с.ш., 180° в.д., полдень) кривыми Безье

5. ВЫВОДЫ

В работе представлен оригинальный подход к упрощенному описанию параметров ионосферы с помощью функций приближения, полученных на основании данных гибридной модели CHARM-IONS, являющихся электронным профилем атмосферы. Показано, что электронный профиль можно отнести к т. н. «незакономерным кривым», которые в инженерных расчетах аппроксимируются различными аналитическими функциями. Показано, что необходимый для проектирования космической радиолинии профиль электронной концентрации, имеющий сложный и нелинейный характер, может быть воспроизведен путем квадратичной аппроксимации кривыми Безье между опорными точками. Эти точки определяются солнечно-земными связями и формируют профиль N_f . Максимальное расхождение между табличными данными профиля и их квадратичной функцией приближения составило не более 0,7%. Такой подход, по мнению авторов, может стать теоретической основой для систем автоматизированного проектирования и мониторинга космических радиолиний, учитывающих как почасовые, так среднесуточные и сезонные колебания параметров земной атмосферы.

Предметом дальнейших исследований является верификация разработанной гибридной модели CHARM-IONS на большом объеме экспериментальных измерений электронной концентрации в атмосфере. Параллельно должна решаться задача выбора функции приближения, наиболее достоверно описывающей профиль электронной концентрации и в то же время достаточно простой и удобной для использования в инженерных расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Функе Б., Баумгертнер А., Калисто М., Егорова Т., Джекман К. Х., Кизер Дж., Криволицкий А., Лопес-Пуэртас М., Марш Д. Р., Реддман Т., Розанов Э., Салми С.-М., Синнхубер М., Стиллер Г. П., Верронен П. Т., Версик С., фон Кларманн Т., Вьюшкова Т. Ю., Витерс Н. и Виссинг Дж. М. Изменения состава после солнечного протонного события "Хэллоуин": модель осаждения частиц высокой энергии в атмосфере (NEPPA) в сравнении с исследованием взаимного сравнения данных MIPAS, Atmos. Chem. Phys., 11, 9089-9139, <https://doi.org/10.5194/acp-11-9089-2011>, 2011.
2. Функе, Б., Болл, У., Бендер, С., Гардини, А., Харви, В. Л., Ламберт, А., Лопес-Пуэртас, М., Марш, Д. Р., Меранер, К., Нидер, Х., Пяйваринта, С.-М., Перо, К., Рэндалл, К. Э., Реддманн, Т., Розанов, Э., Шмидт, Х., Сеппяла А., Синнхубер М., Суходолов Т., Стиллер Г. П., Цветкова Н. Д., Верронен П. Т., Версик С., фон Кларманн Т., Уокер К. А. и Юшков В. Проект взаимного сравнения модели и измерений NEPPA-II: косвенные эффекты EPP во время динамически возмущенной зимы NH 2008-2009, Атмосфера. Химия. Физика., 17, 3573-3604, <https://doi.org/10.5194/acp-17-3573-2017>, 2017.
3. Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю. Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэрномия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.
4. Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В., Толстых М.А. Опытные глобальные прогнозы параметров атмосферы на основе экспериментальной технологии, учитывающей фотохимию озона (модель FOROZ). Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 2. С. 250-260. 2020.
5. Криволицкий А.А., Банин М.В., Черепанова Л.А., Николаев А.В., Куколева А.А., Вьюшкова Т.Ю. Описание глобальной численной модели CHARM-DE при расчете профилей электронной концентрации в околоземном космическом пространстве // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 37,1 – 5, 2023.
6. Беккер С.З. Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 03.06.01; 25.00.29 / Беккер Сусанна Зейтуллаевна; [Место защиты: Ин-т динамики геосфер РАН]. - Москва, 2018. - 129 с.: ил.
7. Chapman S. The absorption and dissociation of ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth. Proc. Phys. Soc. V. 43. P. 26-45. 1931.
8. Формирование радиоэлектроники (середина 20-х - середина 50-х гг.) / [Л. С. Бененсон, В. И. Капустян, З. И. Модель и др.]; Отв. ред. В. М. Родионов; [АН СССР, Ин-т истории естествознания и техники]. - Москва: Наука, 1988. - 381, [1] с.: ил.; 22 см.; ISBN 5-02-000070-1.
9. Космический эксперимент на МКС «Система лазерной связи»: первые результаты / В.Н. Григорьев, О.А. Ивлев, А.Г. Мошнин, Ю.Е. Соколов, В.В. Сумерин, В.Д. Шаргородский // Электромагнитные волны и системы. 2013. Т.18. № 1. С.31-38.
10. Design of the ESA Optical Ground Station for Participation in LLCD. Режим доступа: <http://icsos2012.nict.go.jp/pdf/1569600363.pdf> (дата обращения 06.09.23).
11. Ерохин Г.А., Мандель В.И., Нестеркин Ю.А., Струков А.П. Методика расчета энергетического запаса радиолонии «космический аппарат-станция» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5. Вып. 1. С.65-74. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.65.74.
12. Самойлов А.Г., Самойлов В.С., Насир С.А.Х. Особенности распространения радиоволн на радиолониях космический аппарат-земная станция // Проектирование и технология электронных средств, 2021, №4, С.21-27.
13. Поленов Д.Ю., Мороз А.П. О применении беспилотного летательного аппарата для ретрансляции телеметрической информации разгонного блока // Лесной вестник. 2015. № 3. С.131-136.
14. Аббасов Э.М. Методика оценки дальности приема современными телеметрическими средствами при пусках изделий с космодромов // Информационно-технологический вестник. 2020. № 3 (25). С.3-12.
15. Рек. МСЭ-R P.531-9. Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем.
16. Ларионов А.А., Агарышев А.И. Возможности коррекции влияния ионосферы на точность определения координат приемников спутниковых радионавигационных систем // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. / науч. ред. Г. Я. Шайдулов. Красноярск: Сиб. фе-дер. ун-т, 2011. С.142-147.

17. *Клименко М.В., Карпачев А.Т., Ратовский К.Г. и др.* Проблемы корректного описания ионосферы как среды распространения радиоволн в различных прикладных задачах // Труды конференции РРВ–26, 1–6 июля 2019, Казань. Том I, с. 192–195.
18. *Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В.* Глобальная трехмерная численная фотохимическая модель CHARM. М.: ГЕОС, с.123, 2021.
19. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики: учебное пособие. 8-е изд., стер. СПб. Изд-во. «Лань». 2011. 672 с.
20. *Григорьев М.И., Малоземов В.Н., Сергеев А.Н.* Полиномы Бернштейна и составные кривые Безье // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2006. Т. 46, № 11. С. 1962-1971.

ABOUT CONSIDERING THE EARTH'S ATMOSPHERE WHEN DESIGNING SPACE RADIO LINKS USING THE CHARM-IONS MODEL

Nikolaev A. V., Starovoitov E. I., Krivolutsky A. A., Banin M. V., Kukoleva A. A., Bodunov D. M., Logunov A. A.

The scientific article considers a variant of describing the profile of the electron concentration of the atmosphere, up to its physical boundary, using approximation functions of various types. It is shown that for engineering calculations when designing space radio links, some atmospheric parameters obtained using the CHARM-IONS hybrid model can be used. This model, created by the authors by combining two well-known models CHARM-DE and IRI, allows for an arbitrary radio path within the physical boundary of the atmosphere to estimate the integral attenuation of an electromagnetic wave in a wide range of radio frequencies using well-known formulas. Examples are given of the use of standard methods for approximating experimental data to obtain polynomial characteristics and describe atmospheric electron density profiles at altitudes up to 1000 km.

KEYWORDS: ATMOSPHERE, IONOSPHERE, GLOBAL DISTRIBUTIONS, ELECTRON DENSITY, RADIO WAVE PROPAGATION, NEAR-EARTH SPACE, APPROXIMATION, APPROXIMATION FUNCTION