

УДК 551.510

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ АЭРОНОМИИ ОБЛАСТИ D ИОНОСФЕРЫ.

I. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДА И БАЗОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

© 2022 г. С. И. Козлов¹*, С. З. Беккер¹, А. Н. Ляхов¹, С. Ш. Николайшвили²

¹Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета, г. Москва, Россия

*e-mail: s_kozlov@inbox.ru

Поступила в редакцию 11.02.2022 г.

После доработки 24.03.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

Предложен полуэмпирический метод исследования фотохимии области D . Он основан на известном пятикомпонентном приближении (два сорта положительных ионов, два сорта отрицательных ионов и электроны) в стационарном случае. Главным достоинством метода является возможность определять скорость ионизации ионосферы, используя в качестве экспериментальных данных по ионосфере единственный параметр – высотное распределение концентрации электронов $N_e(h)$. В этом методе предусмотрена процедура калибровки результатов на основе решения прямых и обратных задач ионосферы, поскольку далеко не все компоненты химических реакций известны с достаточной точностью. Отмечено, что метод может быть использован на различных широтах в спокойных и возмущенных условиях.

DOI: 10.31857/S0016794022050078

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, опубликованных за последние 50–60 лет в отечественной и зарубежной печати и посвященных различным вопросам физики и химии области D ионосферы, до сих пор считается, что эта область изучена недостаточно полно. Данное утверждение относится не только к каким-либо частным, но и весьма принципиальным, зачастую взаимосвязанным, проблемам. Например, непонятно, когда заканчивается цепочка преобразования первичных положительных (N_2^+ , O_2^+ , NO^+) и отрицательных (O_2^- , O_3^-) ионов в сложные кластерные ионы-связки; плохо известны высотные распределения малых нейтральных и возбужденных составляющих, играющих важную роль в химической кинетике как заряженных, так и нейтральных компонент; неизвестны константы скоростей реакций диссоциативной рекомбинации положительных ионов-связок с электронами, ион-ионной рекомбинации положительных и отрицательных ионов, коэффициенты фотоотлипания электронов от большинства отрицательных ионов; непонятны дополнительные (к ионизирующему действию космических лучей) источники ионизации D -об-

ласти в ночных условиях и т.п. Поэтому любые попытки разработки нового подхода к исследованию D -области с целью получения новых знаний или, по крайней мере, уточнения существующих представляют несомненный интерес.

В настоящей статье описывается относительно простой, но физически хорошо обоснованный, полуэмпирический приближенный метод исследования некоторых вопросов аэрoномии области D ионосферы в квазиравновесных условиях.

2. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ И БАЗОВЫЕ УРАВНЕНИЯ

Термин “полуэмпирический” подразумевает, что для решения той или иной задачи (проблемы) одновременно применяются как экспериментальные данные, так и теоретические оценки. Предполагается, что разрабатываемый здесь полуэмпирический метод должен использоваться в различных гелиогеофизических условиях, на разных широтах, в спокойных и, возможно, в возмущенных условиях естественного и искусственного происхождения (см., напр., [Козлов, 2021; Bekker et al., 2021]). Это приводит к очевидному выводу – экспериментальные данные по D -области должны быть достаточно большого объема.

К сожалению, удовлетворить данное требование в полной мере ни по одному из параметров, более или менее характеризующих аэрономию ионосферы в области высот $h \approx 50\text{--}90$ км, не удастся, так как, по-прежнему, существуют значительные трудности в их получении. Наиболее подходят для этой цели, хотя и с оговорками (отсутствие необходимой информации в некоторых условиях), высотные распределения концентраций электронов $Ne(h)$, полученные в разные годы различными методами и способами измерений. В настоящее время мы имеем два банка данных $Ne(h)$. В первом из них [Нестерова и Гинзбург, 1985] собраны практически все экспериментальные данные, полученные в мире до 1986 г. Второй банк [Gomonov et al., 2020] является относительно новым, находится в открытом доступе в Полярном геофизическом институте Кольского научного центра РАН, постоянно пополняется и предназначен для исследования прежде всего высокоширотной ионосферы.

Анализ теоретических исследований мы ограничили рассмотрением только моделей D -области, которые, по нашему мнению, являются завершающим этапом более общих исследований. По количеству включенных заряженных компонент, модели называются трехкомпонентными (X^+ , X^- , Ne), четырехкомпонентными (X_1^+ , X_2^+ , X^- , Ne или X^+ , X_1^- , X_2^- , Ne), пятикомпонентными (X_1^+ , X_2^+ , X_1^- , X_2^- , Ne), многокомпонентными, когда отрицательные и положительные ионы описываются более детально. Индекс “1” относится к первичным ионам, “2” — к ионам-связкам (см. выше).

Для достижения сформулированной в статье цели, даже считая, что распределения $Ne(h)$ известны, базироваться на многокомпонентных моделях представляется бессмысленным из-за, во-первых, большой их сложности и, во-вторых, значительных неопределенностей, которые они содержат (некоторые из них перечислены во введении). Вместе с тем, отметим, что такие модели, если в них еще включены уравнения для расчета малых нейтральных и возбужденных компонент, дают вполне разумные результаты при исследовании D -области в условиях сильных возмущений естественного (явления поглощения в полярной шапке и аврорального поглощения, солнечные вспышки [Swider and Keneshea, 1973; Ruseh et al., 1975; Thorne, 1977; Read, 1977; Митра, 1977; Смирнова и др., 1990; Bekker et al., 2021]) и искусственного происхождения [Козлов, 2021]. Учитывая сказанное, из более простых моделей мы остановили свой выбор на пятикомпонентной, предложенной нами в работе [Егошин и др., 2012], как достаточно простой, но при этом хорошо обоснованной с физико-химической точки зрения.

В таблице 1 представлены реакции (1)–(16), на которых построена использованная схема, и константы их скоростей. Эта схема разработана на основании детального анализа двух многокомпонентных моделей [Козлов и др., 1982, 1988] и результатов расчетов по ним [Власков и др., 1983; Смирнова и др., 1984, 1990; Козлов, 2021].

Сделаем необходимые краткие пояснения к выбранной схеме реакций (более подробно смотри вышеупомянутые ссылки, а также Егошин и др. [2012]). Считается, что основным положительным первичным ионом X_1^+ является NO^+ , а ионом-связкой $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_n$. Реакции (9)–(16) описывают преобразования положительных ионов. Эффективная скорость B_{NO^+} преобразования NO^+ в $\text{NO}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ рассчитывается по формуле:

$$B_{\text{NO}^+} = \alpha_9 [\text{H}_2\text{O}][\text{N}_2] + \frac{\alpha_{10} [\text{N}_2]^2 \alpha_{12} [\text{H}_2\text{O}]}{C} + \frac{\alpha_{12} [\text{H}_2\text{O}]}{\alpha_{16} [\text{N}_2] + \alpha_{13} [\text{H}_2\text{O}]} \times \left(\alpha_{14} [\text{CO}_2][\text{N}_2] + \frac{\alpha_{14} [\text{N}_2]^2 \alpha_{11} [\text{CO}_2]}{F} \right), \quad (17)$$

где $F = \alpha_{15} [\text{N}_2] + \alpha_{12} ([\text{CO}_2] + [\text{H}_2\text{O}])$. Уравнение (17) было получено и опубликовано много лет тому назад [Смирнова и Власков, 1980]. Было замечено, что в верхней части D -области в некоторых геофизических ситуациях она дает сомнительные результаты. Например, на $h \geq 75\text{--}80$ км зачастую получаем $[X_2^+] > [X_1^+]$ даже при росте скорости ионизации атмосферы q , хотя должно быть наоборот, $[X_2^+] < [X_1^+]$ [Власков и др., 1983; Козлов, 2021]. Поэтому предусматривается дополнительно и другой вариант задания B_{NO^+} , основанный на учете только реакции (9):

$$B_{\text{NO}^+} = \alpha_9 [\text{H}_2\text{O}][\text{N}_2]. \quad (18)$$

В качестве первичного отрицательного иона естественно принять O_2^- ; все остальные отрицательные ионы-связки обозначаются X_2^- . Скорость преобразования X_1^- в X_2^- определяется процессами (7), (8), наиболее вероятными при переходе O_2^- в другие ионы и для которых известны константы скоростей реакций.

Система уравнений кинетики имеет вид

$$\frac{d[X_1^+]}{dt} = q - [X_1^+] \times (B_{\text{NO}^+} + \alpha_{d1} N_e + \alpha_i ([X_1^-] + [X_2^-])), \quad (19)$$

Таблица 1. Фотохимические реакции и соответствующие константы скоростей

№	Реакция	Константа скорости
1	$\text{NO}^+ + e \rightarrow \text{N} + \text{O}$	$\alpha_{d_1} = 4 \times 10^{-7} \left(\frac{300}{T} \right)^{1.5}$
2	$\text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O}) + e \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$	α_{d_2}
3	$e + \text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^- + \text{O}_2$	$\beta = 1.4 \times 10^{-29} \left(\frac{300}{T} \right) \exp \left(-\frac{600}{T} \right)$
4	$X^- + Y^+ \rightarrow \text{нейтралы}$	α_i
5	$\text{O}_2^- + h\nu \rightarrow e + \text{O}_2$	I_1
6	$XY^- + h\nu \rightarrow e + XY$	I_2
7	$\text{O}_2^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{O}_3^- + \text{O}_2$	$\alpha_7 = 6 \times 10^{-10}$
8	$\text{O}_2^- + \text{O}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_4^- + \text{O}_2$	$\alpha_8 = 4 \times 10^{-31}$
9	$\text{NO}^+ + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O}) + \text{N}_2$	$\alpha_9 = 1.8 \times 10^{-28} \left(\frac{308}{T} \right)^{4.7}$
10	$\text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n + \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n \text{N}_2 + \text{N}_2$	$\alpha_{10} = 2 \times 10^{-31} \left(\frac{300}{T} \right)^{4.4}, \quad n = 0-2$
11	$\text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n \text{N}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n \text{CO}_2 + \text{N}_2$	$\alpha_{11} = 10^{-9}, \quad n = 0-2$
12	$\text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_{n+1} + \text{N}_2$	$\alpha_{12} = 10^{-9}, \quad n = 0-2$
13	$\text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_{n+1} + \text{CO}_2$	$\alpha_{13} = 10^{-9}, \quad n = 0-2$
14	$\text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n + \text{CO}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ (\text{H}_2\text{O})_n \text{CO}_2 + \text{N}_2$	$\alpha_{14} = 7 \times 10^{-30} \left(\frac{300}{T} \right)^3, \quad n = 0-2$
15	$\text{NO}^+ \text{N}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}_2 + \text{N}_2$	$\alpha_{15} = 1.5 \times 10^6 T^{-5.4} \exp \left(\frac{-2450}{T} \right)$
16	$\text{NO}^+ \text{CO}_2 + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{CO}_2 + \text{N}_2$	$\alpha_{16} = 3.1 \times 10^4 T^{-4} \exp \left(\frac{-4590}{T} \right)$

$$\frac{d[X_2^+]}{dt} = B_{\text{NO}^+} [X_1^+] - [X_2^+] \times (\alpha_{d_2} N_e + \alpha_i ([X_1^-] + [X_2^-])), \quad (20)$$

$$\frac{d[X_1^-]}{dt} = \beta [\text{O}_2]^2 N_e - [X_1^-] \times (I_1 + \alpha_7 [\text{O}_3] + \alpha_8 [\text{O}_2]^2 + \alpha_i ([X_1^+] + [X_2^+])), \quad (21)$$

$$\frac{d[X_2^-]}{dt} = (\alpha_7 [\text{O}_3] + \alpha_8 [\text{O}_2]^2) [X_1^-] - [X_2^-] (I_2 + \alpha_i ([X_1^+] + [X_2^+])), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_e}{dt} = & \frac{d[X_1^+]}{dt} + \frac{d[X_2^+]}{dt} - \frac{d[X_1^-]}{dt} - \frac{d[X_2^-]}{dt} = \\ = & q - \alpha_{d_1} N_e [X_1^+] - \alpha_{d_2} N_e [X_2^+] - \beta [\text{O}_2]^2 N_e + \\ & + I_1 [X_1^-] + I_2 [X_2^-]. \end{aligned} \quad (23)$$

Известно, что при исследовании *D*-области как в спокойных (практически всегда), так и в возмущенных условиях (во многих случаях [Whitten et al., 1965; Козлов, 1971, 2021]) используется допущение об установлении стационарных или квазистационарных условий. Это допущение будем использовать и в данной работе. Тогда, при-

равнивая левые части уравнений (19)–(23) нулю, получаем:

$$[X_1^+] = \frac{q}{B_{\text{NO}^+} + \alpha_{d_1} N_e + \alpha_i ([X_1^-] + [X_2^-])}, \quad (24)$$

$$[X_2^+] = \frac{B_{\text{NO}^+} [X_1^+]}{\alpha_{d_2} N_e + \alpha_i ([X_1^-] + [X_2^-])}, \quad (25)$$

$$[X_1^-] = \frac{\beta [\text{O}_2]^2 N_e}{I_1 + B_{\text{O}_2^-} + \alpha_i ([X_1^+] + [X_2^+])}, \quad (26)$$

$$[X_2^-] = \frac{B_{\text{O}_2^-} [X_1^-]}{I_2 + \alpha_i ([X_1^+] + [X_2^+])}, \quad (27)$$

$$Ne = \frac{q + I_1 [X_1^-] + I_2 [X_2^-]}{\alpha_{d_1} [X_1^+] + \alpha_{d_2} [X_2^+] + \beta [\text{O}_2]^2}, \quad (28)$$

где $B_{\text{O}_2^-} = \alpha_7 [\text{O}_3] + \alpha_8 [\text{O}_2]^2$ согласно табл. 1.

Решение системы (24)–(28) возможно при единственном предположении, что $\alpha_i \approx \alpha_{d_1} \approx \alpha_{d_2}$, что неоднократно использовалось в исследованиях D -области из-за плохого знания константы α_i . Однако в отличие от всех ранее выполненных работ здесь, как видно, вводятся два значения α_i [Козлов, 2021]. В конечном счете это позволяет приближенно оценить $\alpha_i(h)$ по уравнению:

$$\alpha_i(h) = \frac{\alpha_{d_1} [X_1^+] + \alpha_{d_2} [X_2^+]}{2([X_1^+] + [X_2^+])}. \quad (29)$$

Решение системы (24)–(28) имеет вид:

$$[X_1^+] = \frac{q}{B_{\text{NO}^+} + \alpha_{d_1} A}, \quad (30)$$

$$[X_2^+] = \frac{B_{\text{NO}^+} [X_1^+]}{\alpha_{d_2} A}, \quad (31)$$

$$A = [X_1^-] + [X_2^-] + Ne = [X_1^+] + [X_2^+]. \quad (32)$$

Подстановка (30) в (31) дает:

$$[X_2^+] = \frac{q B_{\text{NO}^+}}{(B_{\text{NO}^+} + \alpha_{d_1} A) \alpha_{d_2} A}, \quad (33)$$

а после сложения (30) и (33) получаем с учетом (32) алгебраическое уравнение третьей степени:

$$\alpha_{d_1} \alpha_{d_2} A^3 + \alpha_{d_2} B_{\text{NO}^+} A^2 - \alpha_{d_2} q A - q B_{\text{NO}^+} = 0. \quad (34)$$

При известных α_{d_1} , α_{d_2} , B_{NO^+} и q можно найти значение A , решив кубическое уравнение (34).

Далее, обозначив через K суммарную концентрацию отрицательных ионов, складываем уравнения (26) и (27):

$$K = [X_1^-] + [X_2^-] = \frac{\beta [\text{O}_2]^2 Ne (D + B_{\text{O}_2^-})}{CD}. \quad (35)$$

Здесь $C = B_{\text{O}_2^-} + I_1 + \alpha_{d_1} A$, $D = I_2 + \alpha_{d_2} A$. Учитывая, что

$$Ne = A - K, \quad (36)$$

и подставив (35) в (36), найдем окончательно

$$Ne = \frac{ACD}{CD + \beta [\text{O}_2]^2 (D + B_{\text{O}_2^-})}. \quad (37)$$

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты расчетов по (34) и (37), взятые из монографии [Козлов, 2021], где приведены также все исходные данные для проведения этих расчетов. Как и следовало ожидать, в нижней части D -области $Ne \ll A$, $A \approx K$, в верхней — $Ne \approx A$, $A \gg K$.

Использование $Ne(h)$ из вышеупомянутых банков данных дает возможность с помощью уравнений (34)–(36) определить один из важнейших параметров области D — скорость ионизации q :

$$q = \frac{\alpha_{d_1} \alpha_{d_2} (K + Ne)^3 + \alpha_{d_2} (K + Ne)^2 B_{\text{NO}^+}}{\alpha_{d_2} (K + Ne) + B_{\text{NO}^+}}, \quad (38)$$

в котором величины K рассчитываются по (35).

Подставим в (35) выражения для C , D , $A = K + Ne$,

$$K = \frac{\beta [\text{O}_2]^2 Ne [I_2 + \alpha_{d_2} (K + Ne) + B_{\text{O}_2^-}]}{[B_{\text{O}_2^-} + I_1 + \alpha_{d_1} (K + Ne)] [I_2 + \alpha_{d_2} (K + Ne)]}. \quad (39)$$

Раскрывая (39) относительно K , получаем, как и в случае A , алгебраическое уравнение третьей степени.

Таковы базовые уравнения полуэмпирического метода. Они позволяют находить такие известные, весьма информативные и широко используемые соотношения, как $\lambda(h) = ([X_1^-] + [X_2^-])/Ne$, $f^+(h) = [X_2^+]/[X_1^+]$, $f^-(h) = [X_2^-]/[X_1^-]$, эффективный коэффициент рекомбинации $\alpha_{\text{eff}} = q/[Ne^2(1 + \lambda)]$. Особо подчеркнем возможность оценки значений q по экспериментальным распределениям $Ne(h)$ без привязки к какому-либо источнику ионизации, не занимаясь пересчетом потоков ионизирующих излучений, измеряемых, например, спутниками на больших h , на высоты D -области (в данном случае необходимо знать непрерывно изменяющуюся плотность атмосферы $\rho(h)$, а для заряженных частиц — кроме того, геометрию и характеристики магнитного поля Земли).

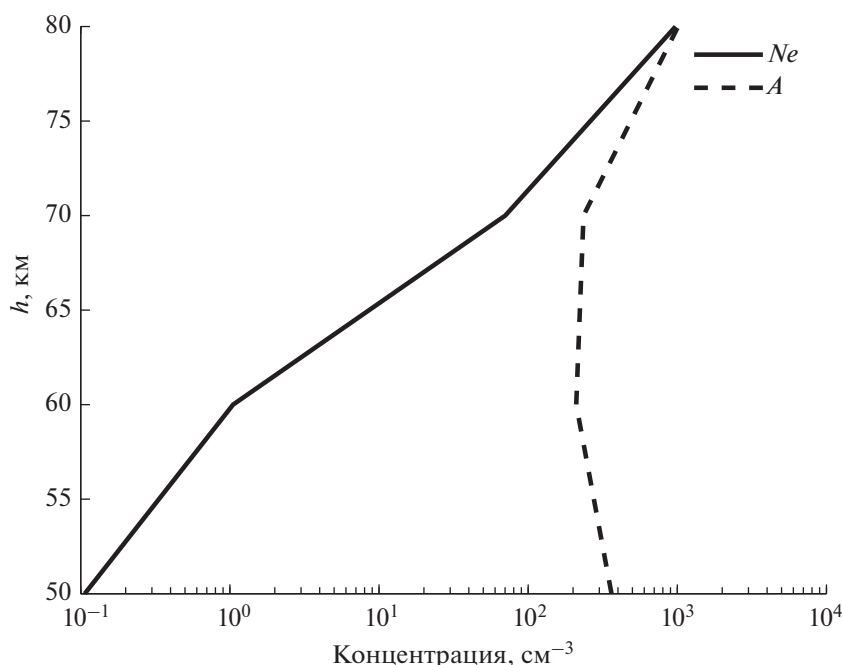


Рис. 1. Оценка высотных профилей концентрации электронов Ne и положительных ионов A в D -области.

3. ЗАМЕЧАНИЯ О СОПОСТАВЛЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Любая модель, независимо от того является она эмпирической, теоретической или полуэмпирической, нуждается в оценке точности расчетов по ней, а также при необходимости, в определении методов и способов улучшения модели. Оба вопроса решаются на основании сопоставления модельных расчетов с экспериментальными данными. Даже если модель относится к эмпирической, то всегда найдутся данные экспериментов, которые по разным причинам не учитывались при разработке модели или были получены позднее (см. [Ляхов и др., 2019]).

Сначала, базируясь на общепринятых известных позициях, по отечественным и зарубежным литературным источникам попытаемся оценить наш уровень знаний о параметрах, входящих в уравнения (19)–(23) и табл. 1. Эти оценки показаны в табл. 2. Они, конечно, не претендуют на “истину в последней инстанции”, но весьма близки к реальности, и позволяют сделать вполне логический вывод: для улучшения согласия модельных расчетов с какими-либо экспериментальными данными или, говоря другими словами, для калибровки и уточнения модели в первую очередь необходимо использовать неизвестные и плохо изученные параметры. В нижней части D -области, где велика роль X_1^- , X_2^- и $\lambda \gg 1$, наименее известными параметрами являются I_1 , I_2 , α_i , q , $[O_3]$; в верхней части, в которой в принципе должны

преобладать X_1^+ , X_2^+ и $\lambda \ll 1$, $-I_1$, I_2 , α_{d_2} , q , $[H_2O]$, $[CO_2]$. На $h \leq 65$ – 70 км важную роль может сыграть учет концентрации непрерывно изменяющегося молекулярного кислорода, так как скорость прилипания Ne к O_2 в тройных соударениях прямо пропорциональна $[O_2]^2$, и, например, увеличение $[O_2]$ всего на 10% приводит к росту этой скорости уже на 21%.

Аналогично [Ляхов и др., 2019], считается, что согласие расчетов с экспериментом вполне удовлетворительное, если результаты модельных расчетов укладываются в инструментальную точность измерения того или иного аэрономического параметра. В противном случае делается попытка улучшить расчеты, варьируя, как отмечалось выше, неизвестные и плохо изученные параметры.

Методология сопоставления расчетов с экспериментами при использовании $Ne(h)$ из банков данных заключается в следующем. Сначала по уравнениям (38) и (39) определяются величины $q(h)$ с использованием экспериментальных значений $Ne(h)$. Затем найденные $q(h)$ используются в (37) для расчета $Ne(h)$, которое далее сопоставляется с уже использованным $Ne(h)$ из банков данных. Исходя из простых логических соображений, в рамках инструментальной точности измерений $Ne(h)$ в D -области расчеты по (37) должны совпасть с экспериментальными данными. Если этого не происходит даже при варьировании неизвестных параметров, делается вывод о необходимости совершенствования модели.

Таблица 2. Примерные оценки уровня знаний о параметрах, входящих в уравнения (19)–(23)

№	Параметр	Характеристика параметра
1	$[N_2], \text{см}^{-3}$	Известна достаточно хорошо. Является непрерывно изменяющейся величиной [Зуев, Комаров, 1986; Козлов и др., 2014; Беккер, 2018]. Среднее квадратическое отклонение $\sigma(N_2)$ зависит от h , широты, времени суток, солнечной активности (СА). С ростом h $\sigma(N_2)$ увеличивается
2	$[O_2], \text{см}^{-3}$	Характеризуется примерно так же, как и $[N_2]$. При этом $\sigma(O_2) > \sigma(N_2)$ [Беккер, 2018]
3	$[H_2O], \text{см}^{-3}$	Известна плохо. Зависит от h , подстилающей поверхности (суша–вода) и погоды над ней. В многокомпонентных моделях рассчитывается по специальному уравнению
4	$[CO_2], \text{см}^{-3}$	Известна плохо. Зависит от высоты. Часто принимается $[CO_2] \approx 3 \times 10^{-4}([N_2] + [O_2])$
5	$[O_3], \text{см}^{-3}$	Разброс значений большой. Зависит от СА, широты. Уменьшается с ростом h
6	$T, \text{К}$	Зависит от h , широты, сезона, СА. Однако разброс относительно известных средних величин не столь уж и большой [Зуев, Комаров, 1986]
7	$[X_1^+], \text{см}^{-3}$	Механизмы возникновения первичных ионов N_2^+, O_2^+, NO^+ хорошо известны. Количественные оценки зависят от многих других аэрономических параметров
8	$[X_2^+], \text{см}^{-3}$	Не известен конечный сложный ион в процессе преобразования положительных ионов
9	$[X_1^-], \text{см}^{-3}$	Первичным отрицательным ионом является O_2^- , возникающий по реакции (3)
10	$[X_2^-], \text{см}^{-3}$	Не известен конечный сложный ион в процессе преобразования отрицательных ионов
11	$\alpha_{d1}, \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	Известна с некоторым разбросом для всех ионов X_1^+ из лабораторных экспериментов
12	$\alpha_{d2}, \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	Неизвестна. Предполагается, что $\alpha_{d2} \approx (5-10) \alpha_{d1}$
13	$Ne, \text{см}^{-3}$	Созданы, как отмечалось ранее, банки данных $Ne(h)$. Экспериментально измеряются разными методами и способами. Лучшие точности имеют импедансный зонд и фазовые измерения на двух парах когерентных частот ($\sim 10-15\%$ [Смирнова и др., 1990; Ляхов и др., 2019])
14	$q, \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	Точность оценок используемых теоретических или так называемых экспериментальных значений q по различным источникам разная и может достигать $\sim 25-50\%$ [Смирнова и др., 1990]. Эта точность значительно хуже по сравнению с точностью измерений $Ne(h)$
15	$\beta, \alpha_7-\alpha_{16}, \text{см}^{-6} \text{с}^{-1}, \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	Известны хорошо из лабораторных экспериментов
16	$\alpha_i, \text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$	Неизвестна особенно с учетом разного состава положительных и отрицательных ионов. Обычно используют $\alpha_i \approx 10^{-6}-10^{-8}$ (см., например, [Хастед, 1965; Козлов, 1971])
17	$I_1, \text{с}^{-1}$	$I_1 \approx 0.35-0.38$, что примерно соответствует полуденным условиям на средних широтах. Не учитывается очевидный факт, что I_1 зависит от зенитного угла Солнца
18	$I_2, \text{с}^{-1}$	Неизвестна, не говоря уже о зависимости I_2 от зенитного угла Солнца

Еще раз подчеркнем, что на $h \geq 65-70$ км $Ne \approx [X_1^+] + [X_2^+]$ и основным процессом исчезновения электронов являются реакции (1) и (2). Тогда для стационарных условий можно записать:

$$q \approx \alpha_d Ne^2, \quad \alpha_d \approx q/Ne^2, \quad (40)$$

и по величинам α_d судить о роли X_1^+ и X_2^+ . На более низких высотах $h \leq 65$ км простое уравнение типа (40) получается только для ночных условий, когда процессы (5) и (6) не происходят:

$$q \approx \beta[O_2]^2 Ne. \quad (40)$$

Полученные выражения необходимо также использовать для оценок качества модельных расчетов. Кроме того, для этого целесообразно учитывать профили $Ne(h)$, которые соответствуют типичным средним условиям [Danilov et al., 1995; Friedrich, Torkar, 2001; Friedrich et al., 2018].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный полуэмпирический метод позволяет рассматривать многие вопросы аэрoномии спокойной и возмущенной D-области, используя всего единственный эмпирический параметр — высотный профиль $Ne(h)$ в различных гелиогеофизических условиях на разных широтах. Особо обращает на себя внимание возможность приближенной оценки $q(h)$, которая непосредственно не измеряется на этих высотах.

Конечность набора свободных параметров позволяет выполнять калибровку метода в разных геофизических условиях.

Детальные результаты численного моделирования для разных гелиогеофизических условий будут представлены во второй части статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 1021052706265-3-1.5.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беккер С.З. Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. М.: ИДГ РАН, 26 с. 2018.
- Власков В.А., Смирнова Н.В., Козлов С.И. Ионная кинетика, малые нейтральные и возбужденные составляющие в области D с повышенным уровнем ионизации. II. Вариации ионного состава и электронной концентрации // Космич. исслед. Т. 21. № 6. С. 892–896. 1983.
- Егошин А.А., Ермак В.М., Зецер Ю.И. и др. Влияние метеорологических и волновых процессов на нижнюю ионосферу в условиях минимума солнечной активности по экспериментальным данным о распространении

СДВ-ДВ в средних широтах // Физика Земли. № 3. С. 101–112. 2012.

— Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеoиздат, 254 с. 1986.

— Козлов С.И. Аэрoномия искусственно возмущенных атмосферы и ионосферы Земли. М.: изд-во ТОРУС-ПРЕСС, 268 с. 2021.

— Козлов С.И. Кинетика ионов в ночной области D ионосферы // Космич. исслед. Т. 9. № 1. С. 81–90. 1971.

— Козлов С.И., Власков В.А., Смирнова Н.В. Ионная кинетика, малые нейтральные и возбужденные составляющие в области D с повышенным уровнем ионизации. I. Постановка задачи и общая схема процессов // Космич. исслед. Т. 20. № 6. С. 881–891. 1982.

— Козлов С.И., Власков В.А., Смирнова Н.В. Специализированная аэрoномическая модель для исследований искусственной модификации средней атмосферы и нижней ионосферы. I. Требования к модели и основные принципы ее построения // Космич. исслед. Т. 26. № 5. С. 738–745. 1988.

— Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З. Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 54. № 6. С. 767–779. 2014.

— Ляхов А.Н., Козлов С.И., Беккер С.З. Оценка точности расчетов по международной справочной модели ионосферы IRI-2016. I. Концентрация электронов // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 59. № 1. С. 50–58. 2019.

— Митра А.П. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 370 с. 1977.

— Нестерова И.И., Гинзбург Э.И. Каталог профилей электронной концентрации области D ионосферы. Новосибирск: изд-во ИГиГ, 210 с. 1985.

— Смирнова Н.В., Власков В.А. Моделирование высокоширотной D-области ионосферы / Динамические процессы и структура полярной ионосферы. Апатиты: КФ АН СССР. С. 42. 1980.

— Смирнова Н.В., Козлов С.И., Власков В.А. Специализированная аэрoномическая модель для исследований искусственной модификации средней атмосферы и нижней ионосферы. II. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными // Космич. исслед. Т. 28. № 1. С. 77–84. 1990.

— Смирнова Н.В., Козлов С.И., Власков В.А., Овчинников Н.А. Ионная кинетика, малые нейтральные и возбужденные составляющие в области D с повышенным уровнем ионизации. III. Вариации малых нейтральных и возбужденных составляющих // Космич. исслед. Т. 22. № 4. С. 565–571. 1984.

— Хасмед Дж. Физика атомных столкновений. М.: Мир, 710 с. 1965.

— Bekker S.Z., Ryakhovsky I.A., Korsunskaya J.A. Modeling of the lower ionosphere during solar X-ray flares of different classes // J. Geophys. Res. — Space. V. 126. № 2. e2020-JA028767. 2021.

<https://doi.org/10.1029/2020JA028767>

— Danilov A.D., Rodevich A.Yu., Smirnova N.V. Problems with incorporating a new D-region model into the IRI // Adv. Space Res. V. 15. № 2. P. 165–167. 1995.

- *Friedrich M., Torkar K.M.* FIRI: A semiempirical model of the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 106. № A10. P. 21409–21418. 2001.
- *Friedrich M., Pock C., Torkar K.* FIRI-2018, an updated empirical model of the lower ionosphere // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 123. P. 6737–6751. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025437>
- *Gomonov A., Yurik R., Zolotov O.* Earth's ionosphere D-region vertical electron density profile data during March 1–31, 2017 according to high-latitude Tumann observatory partial reflection radar measurements and Polar Geophysical Institute's model // *Data in Brief*. V. 31. 105848. 2020.
- *Read G.C.* Influence of ionization on the neutral and ionized atmosphere / *Dynamical and Chemical Coupling Between the Neutral and ionized atmosphere*. Boston: D. Reidel Pub Co. P. 101. 1977.
- *Ruseh D.W., Stewart A.J., Hays P.B. et al.* The N1 (5200 Å) dayglow // *J. Geophys. Res.* V. 80. № 16. P. 2300. 1975.
- *Swider W., Keneshea T.F.* Decrease of ozone and atomic oxygen in the lower mesosphere during PCA event // *Planet. Space Sci.* V. 21. P. 1969. 1973.
- *Thorne R.M.* Influence of relativistic electron precipitation on the lower ionosphere and stratosphere / *Dynamical and Chemical Coupling Between the Neutral and ionized atmosphere*. Boston: D. Reidel Pub Co. P. 161. 1977.
- *Whitten R.C., Poppoff I.G., Edmonds R.S., Berning W.W.* Effective recombination coefficients in the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 70. № 7. P. 1737–1742. 1965.