ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 2019, том 38, № 7, с. 23–29

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 537.565; 537.562; 551.594

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

© 2019 г. Г. В. Голубков[1, 2]*, В. Л. Бычков[3, 4], Н. В. Арделян[3], К. В. Космачевский[3], М. Г. Голубков[1]

[1]*Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

[2]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия*

[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

[4]*Московский радиотехнический институт Российской академии наук, Москва, Россия*

******E-mail: golubkov@chph.ras.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2019;
после доработки 15.02.2019;
принята в печать 20.03.2019

Рассмотрено влияние импульсного (длительностью порядка 1 мс) и постоянного внешнего электрических полей на плазмохимические процессы в нижней ионосфере на высотах 70–100 км над поверхностью Земли. Интерес к этим стимулированным внешним воздействием физическим ситуациям связан как с традиционными радиофизическими исследованиями, так и с проблемами радиохимической физики атмосферы, которая активно развивается в последние годы вследствие ее разнообразных научно-технических приложений. Новую страницу в этой области науки (в отличие от использования ложных радиосигналов) открывает возможность целенаправленного полевого воздействия на GPS-приемник с целью улучшения работы и дальнейшего развития спутниковых навигационных систем, что, несомненно, актуально и ранее в литературе не обсуждалось. В данной работе на основе численного моделирования определены концентрации основных заряженных частиц и температуры электронов при наличии сильного внешнего электрического поля на высоте 100 км.

Ключевые слова: нижняя ионосфера, полевое воздействие, ионизация воздуха, концентрация электронов, спутниковые системы навигации.

DOI: 10.1134/S0207401X19070045

1. ВВЕДЕНИЕ

Информация о характеристиках атмосферной плазмы на различных высотах и возможных условиях ее формирования имеет большое значение для подготовки летных испытаний с применением газоразрядных устройств и улучшения работы устройств спутникового позиционирования. Исследования областей, возбужденных различными источниками энергии (сильные электрические поля, газовые разряды, электронные пучки, мощное лазерное излучение, локальный источник гамма-излучения и т.д.), весьма актуальны с теоретической и практической точек зрения, поскольку позволяют выяснить механизмы процессов в нижней ионосфере, а также создавать новые технологии переноса энергии в атмосфере Земли [1–3]. Это диктует необходимость выбора параметров устройств, при которых возникает плазма, которая будет заметно отличаться по своим свойствам от существующей фоновой низкотемпературной плазмы в нижней ионосфере. Более того, разработка таких устройств важна для новой авиационной и космической техники на высотах тропосферы и нижней мезосферы. Другими словами, важно знать характеристики такой плазмы на высотах в диапазоне 90–100 км. Интерес к процессам ионизации на больших высотах вызван возможностью их протекания в воздухе вблизи поверхности летательных аппаратов за счет электризации, включая появление атмосферных разрядов, таких как спрайты, струи и т.д.

В настоящей работе проанализированы параметры существующих источников электрических полей на высотах в диапазоне 70–100 км, представляющие практический интерес [4]. Впервые определены параметры фоновой плазмы на высоте 100 км, а также рассчитаны параметры образующейся при электрическом воздействии плазмы, заметно отличающиеся от фоновых значений. В работах [5, 6] были проанализированы возможные свойства ионосферной плазмы на высотах в диапазоне 120–130 км при высоких фоновых температурах и внешних электрических полях, характеризующихся величиной газоразрядного отношения

Таблица 1. **Параметры известных СВЧ-устройств [4]**

Устройство	Мощность, кВт	Время действия, мкс	Частота, МГц
Вариант 1	750	25, 700	5.75
Вариант 2	750	25, 700	4.785
Вариант 3	100	50	–
Вариант 4	75	50	–

$E/N > 1.0 \cdot 10^{-17}$ В · см^2, где E – напряженность электрического поля, N – концентрация нейтральных молекул среды. Однако в диапазоне высот 90–100 км свойства такой плазмы ранее не были исследованы.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В работах [7, 8] было рассмотрено воздействие электрических полей на плазму в высотном диапазоне 80–90 км с целью выяснения возможности образования плазменных областей с аномальными параметрами. В работе [9] показано, что мощные поля грозовых облаков могут генерировать создание плазменные области на высотах в диапазоне 70–100 км, способные влиять на работу спутниковых систем связи. В данной работе выясняется возможность создания такой плазмы с помощью существующих устройств генерации СВЧ-полей [4].

Поскольку, как показывают расчеты и ракетные эксперименты [10–12], электрическое поле на высотах в диапазоне 80–90 км в результате воздействия быстрых частиц спадает практически до нуля, представляет интерес выяснить возможность создания плазмы существующими СВЧ-устройствами на этих высотах. Для этого следует оценить температуру электронов, которая может быть реализована в созданной плазме. В табл. 1 представлены параметры известных устройств для воздействия на ионосферу [4]. В табл. 2 приведены значения электрического поля и основного газоразрядного параметра E/N, по которому определяется возможность ионизации воздуха.

Согласно [13], при оценке мощности СВЧ-излучения предполагалось, что излучающая станция расположена на Земле, а электрическое поле E на высоте h вычислялось по простой формуле: $E = 300\sqrt{W_0}/\left(\sqrt{2}h\right)$, где W_0 – мощность излучения эквивалентного диполя в кВт, h – расстояние в км; электрическое поле E выражено в мВ/м. При этом на типичных временах работы СВЧ-генераторов можно не рассматривать колебания электрического поля, а учитывать только его эффективное значение [14].

В табл. 3 представлены параметры фоновой плазмы, взятые из работы [13], которые были получены с использованием данных экспериментов и глобальных атмосферных моделей. Здесь величина Q – эффективная скорость ионизации быстрыми частицами [15], N_e – концентрация электронов, NO^+ и O_2^+ – концентрации ионов. Температура электронов T_e определена из литературных источников [12, 13], а также по следующей формуле [14]:

$$T_e = T + eE\lambda = T + eE\frac{1}{N\bar{\sigma}} = T + e\frac{E}{N}\frac{1}{\bar{\sigma}}, \qquad (1)$$

где e – заряд электрона, E – значение напряженности электрического поля, λ – длина свободного пробега электрона на заданной высоте, N – концентрация нейтральных частиц, $\bar{\sigma}$ – среднее значение сечения рассеяния электронов на молекулах, T – температура газа. Оценки среднего значения сечения рассеяния электронов дают величину $\bar{\sigma} = 1.7 \cdot 10^{-16}$ см^2, которая реализуется при $E/N = 3.0 \cdot 10^{-17}$ В · см^2 [16, 17] и средней энергии электронов ≈0.3 эВ.

Температура электронов для указанных в табл. 2 значений параметра E/N изменяется в диапазоне от $1.5 \cdot 10^{-3}$ до 0.3 эВ, что хорошо согласуется с известными экспериментальными данными, приведенными в [18–21]. Из расчетов, приведенных в работах [7, 16], следует, что при таких значениях параметра E/N роста степени ионизации не проис-

Таблица 2. **Значения напряженности электрических полей E, параметра E/N и температуры электронов T_e с учетом действия СВЧ-поля на высоте h = 80, 90, 95, 100 км над Землей**

Устройство	E, 10^{-5} В/см				E/N, 10^{-17} В · см^2				T_e, эВ			
	80	90	95	100	80	90	95	100	80	90	95	100
Вариант 1	72	64	61	58	0.18	0.92	1.1	3.0	0.0275	0.09	0.19 [10]	0.29 [10]
Вариант 2	72	64	61	58	0.18	0.92	1.1	3.0	0.0275	0.09		
Вариант 3	27	23	23	21	0.067	0.33	0.78	1.1	0.021	0.036	0.06	0.14 [10]
Вариант 4	23	21	19	18	0.059	0.30	0.64	0.95	0.021	0.035	0.05	0.09 [10]

ходит, т.е. при таких значениях приложенных полей их влияние на фоновую плазму оказывается несущественным. В следующем разделе установлено значение параметра E/N на высоте 100 км, при котором внешнее поле создает плазму с концентрацией заряженных частиц заметно выше фоновой.

3. МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ИОНИЗОВАННОЙ ОБЛАСТИ

Для исследования химической кинетики плазмы в воздухе на высотах в диапазоне 90–100 км в качестве исходной системы при анализе плазмохимических процессов для сухого воздуха за основу, согласно работам [7–9], была принята система химических реакций, аналогичная приведенной в [8–10]. Эта модель включает в себя 26 компонент (нейтральные частицы, положительные и отрицательные ионы, электроны и возбужденные частицы) и более 180 плазмохимических реакций с их участием. При этом для распределения электронов по энергиям использовалась функция, соответствующая тлеющему разряду в воздухе, а константы скорости электронно-молекулярных реакций рассчитывались на основе уравнения Больцмана.

Наряду с уравнениями баланса для атомных частиц решалось уравнение для температуры электронов, учитывающее нагрев электронов внешним электрическим полем, появление электронов за счет торможения быстрых частиц в ионосфере, потери энергии электронов на вращательное, упругое и неупругое возбуждение молекул, рекомбинацию электронов и ионов. В общую схему расчета были включены процессы ионизации молекул во внешнем электрическом поле, трехчастичный захват электрона молекулой кислорода и нагрев электронов при инжекции быстрых электронов в область ниже порога колебательного возбуждения. Мы также строго учли нагрев в процессах электрон-ионной рекомбинации, нагрев электронов в процессах их отрыва от отрицательных ионов, охлаждение электронов в процессе прилипания электронов к молекуле O_2 и нагрев в упругих и неупругих столкновениях с молекулами O_2 и N_2.

В уравнение для газовой температуры T были включены слагаемые, соответствующие нагреву в результате релаксации колебательных и электронных степеней свободы молекул, нагреву и охлаждению газа в химических и плазмохимических реакциях (нагрев электронами при столкновениях — джоулев нагрев). При моделировании были также учтены реакции с участием положительных ионов O^+, O_2^+, O_4^+, O_6^+, O_8^+, N^+, NO^+, N_2^+; отрицательных ионов O^-, O_2^-, O_3^-; атомов N, O; молекул O_2, O_3 , N_2, N_2O, NO; возбужденных колебательных состояний азота $N_2(v)$; возбужденных электронных состояний азота $N_2(b)$ и $N_2(z)$; возбужденных колебательных состояний кислорода $O_2(v)$; возбужденных электронных состояний кислорода $O_2\left(^1\Delta_g\right)$. Кроме того, в общую схему были включены реакции ион-ионной рекомбинации участвующих положительных и отрицательных ионов. При этом предполагалось, что релаксация колебательных и вращательных состояний происходит главным образом в результате столкновений с молекулами. В использованной модели были учтены также процессы перезарядки ионов. Мощность, передаваемая газу быстрыми частицами, W, обычно определяется в единицах эВ/см^3 · с. Причем скорость возбуждения молекул Q связана с ней соотношением $Q = W/U_i$, где U_i – цена ионизации; в частности, в воздухе $U_i = 31.6$ эВ [12]. Расчеты были проведены в приближении постоянной плотности, когда используемая модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Подробные данные о выборе констант скоростей и цен процессов приведены в работах [7–9].

Таблица 3. **Значения параметров дневной атмосферы на высоте h [10, 14]**

h, км	N, см$^{-3}$	T, K	Q, эВ/см^3 · с	N_e, см$^{-3}$	$[NO^+]$, см$^{-3}$	$\left[O_2^+\right]$, см$^{-3}$
80	$4.03 \cdot 10^{14}$	198	72	10^3	700	300
90	$6.98 \cdot 10^{13}$	187	$3 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^3$	5200	2800
95	$2.93 \cdot 10^{13}$	188	10^2	$2 \cdot 10^4$	13000	7600
100	$1.93 \cdot 10^{13}$	195	$5 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^4$	49600	28000

При анализе предварительно были вычислены фоновые значения при полном наборе компонент для заданных значений цен возбуждения и ионизации в зависимости от высоты и температуры, которые были взяты из работ [7, 16] как начальные значения при расчете кинетических зависимостей заряженных, нейтральных и возбужденных частиц в плазме. Это соответствует модельному установлению плазмохимического равновесия на каждой высоте при заданных давлении и температуре.

В расчетах, проведенных в настоящей работе, плазма была представлена в виде идеального газа с показателем адиабаты, равным 1.4. Следует указать, что это обстоятельство ограничивает область применимости модели в случае слабоионизованного газа, когда концентрации заряженных частиц значительно меньше концентрации двухатомных молекул среды.

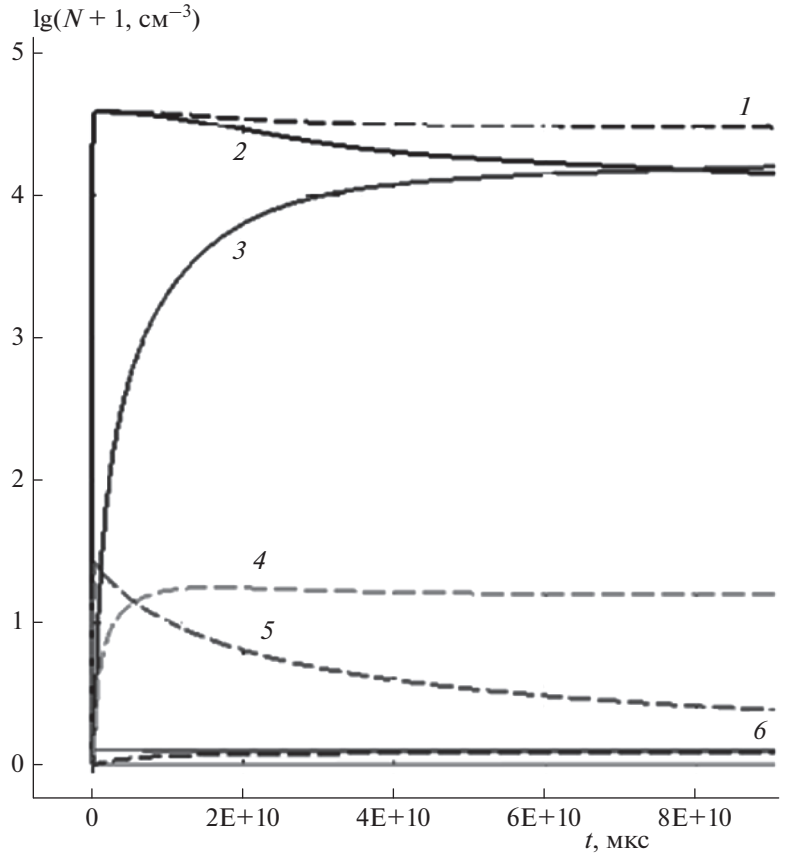

Рис. 1. Зависимости концентраций компонентов плазмы от времени на высоте 100 км при постоянном значении напряженности электрического поля $E = 58 \cdot 10^{-5}$ В/см: *1* – электроны, *2* – O_2^+, *3* – NO^+, *4* – O^-, *5* – O_2^-, *6* – сумма концентраций O_8^+, O_6^+, O_4^+ и O_3^-.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определенности перечислим основные параметры аппаратуры, использованной для воздействия на нижнюю ионосферу Земли [4]. Нагрев ионосферной плазмы осуществлялся с помощью передатчика, рабочая частота которого составляет 5.75 МГц, частота следования импульсов – 3–6 Гц и мощность в импульсе ~750 кВт. Контроль *D*-слоя ионосферы выполнялся с помощью метода частичных отражений со следующими параметрами: рабочая частота ~2.95 МГц, длительность импульса – 50 мкс, частота следования импульсов – 3–12 Гц и мощность передатчика в импульсе ~100 кВт. Нагрев нижней ионосферы осуществлялся передающим комплексом “Сура” с рабочей частотой 785 МГц. Излучение мощностью ~750 кВт может реализоваться в импульсном и непрерывном режимах. Для диагностики нижней ионосферы использован экспедиционный вариант аппаратуры частичных отражений “Поиск” со следующими параметрами: рабочая частота ~2.95 МГц, длительность импульса – 50 мкс, частота следования импульсов – 2–5 Гц, мощность ~75 кВт.

Далее обсудим результаты расчетов, выполненных для напряженности внешнего электрического поля $E = 5.8 \cdot 10^{-4}$ В/см и большего на два порядка значения $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см на высоте в 100 км, приведенные на рис. 1–3. На рис. 1 изображена временна́я зависимость концентраций компонентов плазмы на высоте в 100 км для величины напряженности $E = 5.8 \cdot 10^{-4}$ В/см. На рис. 2 представлена зависимость от времени концентраций компонентов плазмы на высоте 100 км для напряженности $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см и длительности импульса напряжения в 700 мкс. На рис. 3 приведен временно́й ход зависимости концентраций компонентов плазмы на высоте 100 км для случая постоянного напряжения, равного $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см.

Из рис. 1 следует, что при слабом поле $E = 5.8 \cdot 10^{-4}$ В/с концентрация электронов достигает значения $4.0 \cdot 10^4$ см$^{-3}$, концентрация ионов O_2^+ – значения $1.4 \cdot 10^4$ см$^{-3}$, а концентрация ионов NO^+ выходит на значение $1.8 \cdot 10^4$ см$^{-3}$. Эти значения в 2–2.5 раза меньше данных из работы [10], что, очевидно, вызвано меньшим значением пол-

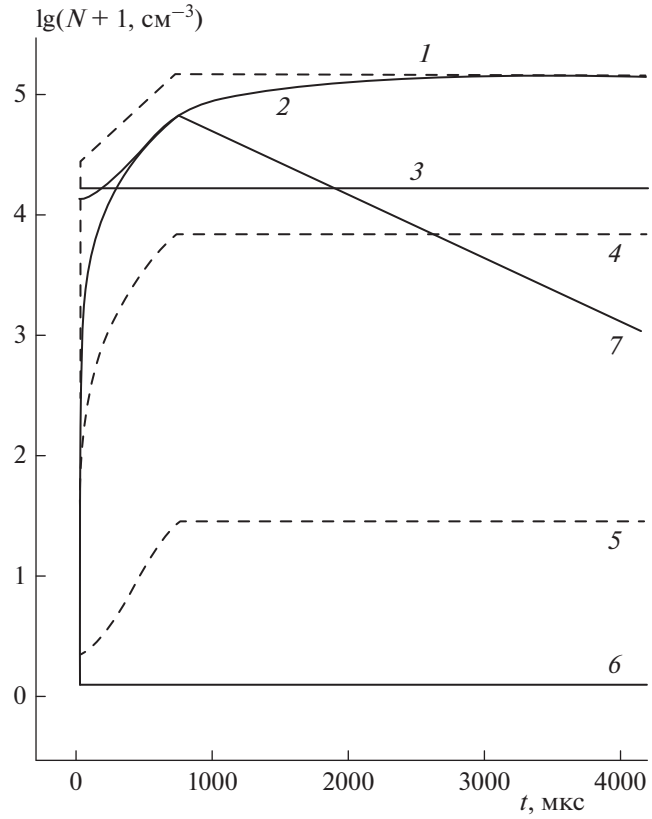

Рис. 2. Зависимости концентраций компонентов плазмы от времени на высоте 100 км при значении напряженности электрического поля $E = 58 \cdot 10^{-3}$ В/см и импульсе поля длительностью 700 мкс: *1* – электроны, *2* – O_2^+, *3* – NO^+, *4* – O^-, *5* – O_2^-, *6* – O_3^-, *7* – N_2^+.

ной скорости ионизации Q приведенным в работе [14], которое мы использовали в вычислениях, по сравнению с [10]. Очевидно, что скорость ионизации зависит не только от высоты, но и от геофизических условий, которые в работе [10] не указаны, поэтому полученный нами результат можно считать удовлетворительным.

На рис. 2 показано, что существенный рост концентрации плазмы происходит за характерное время (700 мкс) импульса электрического поля $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см. За это время концентрация электронов возрастает до значения $1.6 \cdot 10^5$ см$^{-3}$, которого со временем достигает концентрация ионов O_2^+. Концентрация ионов N_2^+ вначале растет, а затем падает при выключении внешнего поля в результате перезарядки на молекулах кислорода. При этом увеличение концентрации ионов NO^+ не происходит. При этом концентрации остальных ионов, представленных на рис. 2, не изменяются.

На рис. 3 показано, что при электрическом поле напряженностью $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см существенный рост концентрации плазмы до концентрации электронов, равной $2 \cdot 10^{11}$ см$^{-3}$, происходит за время $6 \cdot 10^3$ мкс действия постоянного электрического поля – $6 \cdot 10^3$ мкс. За это же время баланс заряженных частиц осуществляется ионами O_2^+ и N_2^+. При больших временах устанавливается состояние, когда концентрации электронов уменьшаются в результате ион-ионной рекомбинации с ионами O_2^+ и N_2^+. При этом концентрация ионов O^- вначале растет, а затем падает, оставаясь меньшей концентрации электронов. При этом поведение концентрации ионов NO^+ является достаточно сложным, поскольку процессы их формирования зависят от газовой температуры, которая в ходе этих процессов возрастает. Роль отрицательных ионов O_2^-, как показано на рис. 3, оказывается несущественной.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе плазмохимической модели был проанализирован состав воздушной плазмы на высоте 100 км при возбуждении воздуха электрическим по-

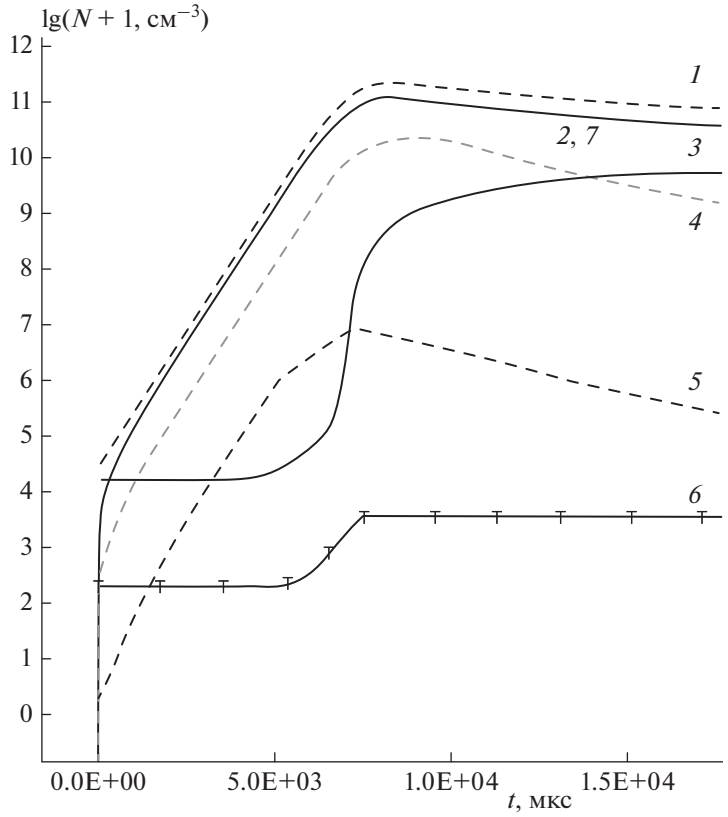

Рис. 3. Зависимости концентраций компонентов плазмы и температуры электронов T_e (в K) от времени на высоте 100 км при постоянном значении напряженности электрического поля $E = 58 \cdot 10^{-5}$ В/см: *1* – электроны, *2* – $O_2^+ + N_2^+$, *3* – NO^+, *4* – O^-, *5* – O_2^-, *6* – T_e, *7* – N_2^+.

лем напряженностью $E = 5.8 \cdot 10^{-4}$ В/см, типичной для существующих мощных СВЧ-генераторов, и напряженностью $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см, которую можно создать на этой высоте. Показано также, что в импульсных условиях при полях с $E = 5.8 \cdot 10^{-4}$ В/см воздействие плазмы на среду будет слабым, т.е. практически незаметным.

В импульсных условиях, типичных для существующих мощных СВЧ-генераторов, при полях напряженностью $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см будет происходить ионизация с концентрацией образующихся электронов порядка 10^5 см$^{-3}$ и выше, которая на два порядка больше естественной. Плазма с полученными параметрами может влиять на функционирование электронных приборов на высотах мезосферы за время типичного импульса существующих в настоящее время устройств. Этот эффект будет проявляться значительно слабее, чем при полях, реализующихся при прохождении грозовых фронтов над землей, когда отдельное воздействие облаков будет происходить на фоне суммарного действия фронта.

При значении напряженности электрического поля $E = 5.8 \cdot 10^{-2}$ В/см и стационарных условиях концентрация плазмы может достигать 10^6 см$^{-3}$, т.е. концентрации ионосферы на временах $2 \cdot 10^3$ мкс, и величины 10^{11} см$^{-3}$ на временах $6 \cdot 10^3$ мкс. При этом составы компонентов в первом и втором случаях будут заметно различаться. Во втором случае плазма с полученными параметрами может влиять на функционирование электронных приборов на высотах мезосферы сильнее, чем в первом случае. Такие значения электрического поля в 100 раз больше, чем используемые в настоящее время.

Переходя к дальнейшему изучению роли внешнего импульсного воздействия на нижнюю ионосферу, укажем на следующие возможные приложения. В первую очередь, это касается улучшения работы спутниковых навигационных систем GNSS с помощью мощных ИК-лазеров, позволяющих целенаправленно изменять параметры плазмы на высотах в диапазоне 80–110 км [18–21]. Конкретно имеются в виду особенности поведения реакций диссоциативной рекомбинации и ассоциативной ионизации во внешнем электромагнитном поле с участием основных компонент неравновесной двухтемпературной плазмы [22–26]. Следующим типом возмущения нижней ионо-

сферы могут служить процессы, протекающие под действием гамма-излучения. Заметим, что эти вопросы ранее в литературе не обсуждались.

Авторы выражают благодарность Н.В. Бахметьевой за предоставленную информацию.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема 0082-2019-0017, регистрационный номер № АААА-А19-119010990034-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балашов Е.М., Голубков Г.В., Иванов Г.К.* // ЖЭТФ. 1984. Т. 86. Вып. 6. С. 2044.
2. *Иванов Г.К., Голубков Г.В.* // Там же. 1991. Т. 99. Вып. 5. С. 1404.
3. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Карпов И.В.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 61.
4. *Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1995. Т. 35. № 1. С. 107.
5. *Дятко Н.А., Кочетов И.В., Мишин Е.В. и др.* // Там же. 1989. Т. 29. № 2. С. 275.
6. *Мишин Е.В., Ружин Ю.А., Телегин В.А.* Взаимодействие электронных потоков с ионосферной плазмой. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989.
7. *Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Kochetov I.V. et al.* // The Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Monitoring and Ball Lightning / Eds. Bychkov V.L., Golubkov G.V., Nikitin A.I. New-York: Springer, 2014. P. 69.
8. *Арделян Н.В., Бычков В.Л., Волков С.А. и др.* // Хим. физика. 2015. Т. 34. № 10. С. 63.
9. *Арделян Н.В., Бычков В.Л., Голубков Г.В. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 7. С. 59.
10. *Струминский В.И., Фролов В.М., Непеин О.Н.* Атмосферное электричество. Тр. II Всесоюз. симпоз. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 34.
11. *Zadorozhnyi A.M., Tyutin A.A.* // Ann. Geophys. 1998. V. 16. P. 1544.
12. *Wahlin L.* // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № D5. P. 10767.
13. *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. Москва: Наука, 1973.
14. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
15. *Brasseur G.B., Solomon S.* Chemistry and physics of the Stratosphere and Mesosphere. Dordrecht: Reidal publishing company, 1984.
16. *Ardelyan N.V., Bychkov V.L., Bychkov D.V. et al.* // Plasma assisted combustion, gasification and pollution control. V. 1 / Ed. Matveev I.B. Denver, Colorado: Outskirts press, 2013. P. 183.
17. *Masek R.* // Chech. J. Phys. 1984. V. 34. № 7. P. 655.
18. *Голубков Г.В., Манжелий М.И., Карпов И.В.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 55.
19. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелий М.И.* // Хим. физика. 2012. Т. 31. № 2. С. 31.
20. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелий М.И.* // ДАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 510.
21. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелий М.И.* // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 64.
22. *Голубков Г.В., Иванов Г.К.* // ЖЭТФ. 1993. Т. 104. Вып. 4. С. 3334.
23. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Романов А.Н.* // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. Вып. 3. С. 573.
24. *Golubkov G.V., Golubkov M.G., Romanov A.N. et al.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2003. V. 5. P. 3174.
25. *Адамсон С.О., Бюнкер Р.Дж., Голубков Г.В. и др.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 4. С. 26.
26. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Бюнкер Р.Дж.* // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. Вып. 2. С. 221.