

УДК 523.75

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-36-53

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД В ИОНОСФЕРЕ ОТРИЦАТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННОЙ ЗЕМЛИ

Высикайло Ф.И., Некрасов Г.Ю., Пронин Н.А.

Московский государственный областной университет

141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Московская область, Российская Федерация

Аннотация. Предложена математическая модель учёта бесконтактного нагрева электронов дальнедействующим электрическим полем в области заряженных структур, в частности в верхних слоях атмосферы отрицательно заряженной Земли. По соотношению Эйнштейна–Смолуховского (вернее Нернста–Таунсенда) впервые на базе экспериментальных значений плотности числа частиц воздуха – N аналитически рассчитан возможный профиль температуры – T_e электронов в мезосфере и ионосфере, в зависимости от заряда Земли и расстояния до её поверхности. Установлено, что на высотах порядка 36 км над поверхностью отрицательно заряженной до 500 000 Кл Земли параметр E/N достигает пробойных значений (100 Тд), и, следовательно, на этих высотах загорается самостоятельный разряд. На этих высотах может развиваться компенсационный слой положительного объёмного заряда (стоячая ударная волна электрического поля). Там же в процессах рождения плазмы важны процессы прямой ионизации частиц воздуха электронами в электрическом поле отрицательно заряженной Земли. Расчёты параметров электронов в атмосфере и ионосфере сравниваются с имеющимися экспериментальными наблюдениями. На базе математической модели впервые аналитически получен для мезосферы и ионосферы отрицательно заряженной Земли профиль (от высоты над уровнем моря) концентрации электронов n_e . Сравнение этих результатов с экспериментальными наблюдениями показывает, что переходные профили концентрации электронов в мезосфере и ионосфере Земли определяются процессами амбиполярного дрейфа, обусловленного различными зависимостями дрейфовых скоростей электронов и ионов от напряжённости электрического поля. Полученные результаты представляют практический интерес для разработчиков таких систем как ГЛОНАСС и GPS.

Ключевые слова: нарушение нейтральности, ионосфера Земли, заряд Земли, амбиполярный дрейф плазмы, амбиполярные диффузии.

GAS DISCHARGE IN THE IONOSPHERE OF THE NEGATIVELY CHARGED EARTH

P. Vysikaylo, G. Nekrasov, N. Pronin

Moscow Region State University

ul. Very Voloshinoy 24, 141014 Mytishchi, Moscow region, Russian Federation

Abstract. A mathematical model is proposed for taking into account contactless heating of electrons by a long-range electric field in the region of charged structures, in particular, in

the upper layers of the atmosphere of the negatively charged earth. Based on the Einstein–Smoluchowski (or rather Nernst–Townsend) relation, $T_e = e \cdot D_e / \mu_e \alpha (E/N)^{0.86}$, we used the experimental values of the particle number density of air, N , to calculate for the first time a possible temperature profile of electrons, T_e , in the mesosphere and ionosphere as a function of the charge of the Earth and the distance to its surface. It is found that at altitudes of about 36 km above the Earth surface negatively charged up to 500 000 C, the E/N parameter reaches breakdown values (100 Td), and, therefore, a self-sustained discharge is initiated up at these altitudes. At these altitudes, a compensation layer of a positive space charge can develop (standing electric field shock wave). The processes of direct ionization of air particles by electrons in an electric field of the negatively charged earth are also important in plasma production processes. Calculations of the parameters of electrons in the atmosphere and the ionosphere are compared with the available experimental data. On the basis of a mathematical model, the profile (from height above sea level) of the electron concentration n_e is obtained analytically for the first time for the mesosphere and ionosphere of the negatively charged earth. Comparison of these results with experimental observations shows that the transition profiles of the electron concentration in the mesosphere and the Earth's ionosphere are determined by the processes of ambipolar drift caused by different dependences of the drift velocities of electrons and ions on the electric field intensity. The results are of practical interest for developers of such systems as GLONASS and GPS.

Key words: neutrality violation, Earth's ionosphere, Earth charge, ambipolar plasma drift, ambipolar diffusion.

Введение

В ИКИ РАН проходят ежегодные конференции «Физика плазмы в солнечной системе». Тематика конференций связана с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов в космической плазме, в частности, процессов на Солнце, в солнечном ветре, в ионосфере и магнитосфере Земли и других планет солнечной системы. Круг затрагиваемых вопросов также включает исследования волновых процессов в космической плазме, работы по физике тонких токовых слоёв, численному и лабораторному моделированию различных плазменных процессов. Так в 2018 г. прошла ежегодная, уже тринадцатая, конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (см. архив докладов Тринадцатой конференции «Физика плазмы в солнечной системе» [1]). Несмотря на огромное количество докладов на конференциях, посвящённых проблеме возникновения и описания процессов в солнечной системе, в настоящее время отсутствует чёткое и верифицированное многочисленными экспериментальными наблюдениями понимание причин, ответственных за существование солнечного ветра из заряженных частиц, заполняющего со сверхзвуковой скоростью гелиосферу. Продолжается развитие теории и математических моделей тонких токовых структур, являющееся логическим продолжением идей С.И. Сыроватского и В.Л. Гинзбурга в области исследования космических лучей и пересоединяющихся токовых слоёв в короне Солнца [2]. Нет понимания ряда процессов, происходящих и в ионосфере Земли [3]. Пока только создаются и верифицируются математические модели формирования плазменно-пылевых облаков при ударе метеороида о поверхность Луны [4]. Ни в одной из перечисленных работ не учитывается заряд астрообъектов.

В [5] предложен совершенно новый подход к исследованию астрофизических объектов. В этом подходе предлагается учитывать и на базе экспериментальных данных рассчитывать как сам заряд астрофизических объектов, так и его роль в процессах амбиполярного дрейфового и диффузионного переносов плазмы в гелиосфере. В [5] предложен новый механизм формирования солнечного ветра, обусловленный положительным зарядом Солнца в 1500 Кл. Заряд Солнца в [5] рассчитан по сорту положительных ионов, наблюдаемых в потоках солнечного ветра.

В этой работе мы рассмотрим ряд проблем, обусловленных дальнедействующими электрическими полями в плазменном слое ионосферы отрицательно заряженной Земли. Давно известно, что заряд Земли порядка 500 000 Кл, и на её поверхности на метр от Земли происходит падение потенциала 100 – 150 В. До сих пор считается [6], что ионосфера – это плазменный слой в верхней атмосфере, на высотах от 60 до 1000 км, созданный ультрафиолетовым излучением Солнца.

А вот какова роль дальнедействующих кулоновских сил, обусловленных зарядом Земли, в явлении и формировании ионосферы Земли до сих пор никто не проверил. Постановкой и частичным решением этой задачи мы займёмся в данной работе, применив весь многолетний опыт экспериментального исследования и аналитического моделирования явлений в лабораторной газоразрядной плазме в воздухе (по мнению Арцимовича «грязной» плазме), накопленный в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» и МГУ [7–10].

Параметр E/N в газоразрядной плазме

При исследовании причин возникновения ионосферы мы учтём заряд Земли в 500 000 Кл (наличие заряда у других планет может приводить к аналогичным явлениям в их атмосферах). Зная профиль плотности газа в атмосфере Земли и её заряд можно построить профиль E/N от высоты. Параметр – E/N (напряжённость электрического поля, приведённая к плотности частиц газа) в лабораторной газоразрядной плазме является не только управляющим или параметром порядка. Этот параметр является фундаментальным или все пронизывающим параметром в газоразрядной плазме. Он определяет температуру электронов, рождение и гибель заряженных частиц, коэффициенты переноса заряженных частиц плазмы, а значит – характерные размеры переходных областей, таких как фарадеевы тёмные пространства и многое другое. В положительном столбе в самостоятельном разряде в любых газах этот параметр имеет свойство слабо изменяться в широких диапазонах изменения тока разряда в лабораторных экспериментах. Это связано с экспоненциальной зависимостью процессов рождения частиц плазмы от численного значения этого параметра. При достижении параметра E/N пробойных значений в разряде устанавливается положительный столб (формируется слой объёмного положительного заряда).

Ещё Таунсенд, читая работу Столетова (1889) [11], «интуитивно» предположил, что константы скорости ионизации газа электронным ударом определяются этим параметром. Эксперименты подтвердили эту догадку. Таунсенд измерил зависимости констант ионизации при столкновении электронов с частицами нейтрального газа для многих сортов газов и затабулировал их, следуя

Столетову, в зависимости от E/N , а не отдельно для E и N . Им было показано, что при предионизации газа, как рентгеновскими лучами, так и за счёт фотоэлектронной эмиссии, получается одна и та же зависимость константы ионизации от E/N . Отсюда следовало, что коэффициент ионизации для электронов, отрывааемых от молекул рентгеновским излучением, такой же, как и для электронов, образующихся в результате фотоэлектрической эмиссии. Этот результат дал прямое доказательство того, что электроны являются составной частью молекул газа. К таким важным результатам может приводить умение грамотно использовать знания о важности и роли основных параметров. Ещё раз отметим, что этот параметр (E/P , где P – давление газа) для газоразрядной плазмы первым ввёл Столетов, а Таунсенд на его работу сослался.

До сих пор важность параметра E/N при описании процессов переноса в ионосфере Земли и гелиосфере не осознана астрофизиками должным образом. Более подробно с важностью этого параметра в газоразрядной плазме можно ознакомиться в монографиях [12; 13].

Соотношение Нернста–Таунсенда (Эйнштейна–Смолуховского)

Ещё в 1899 г. Таунсенд, используя теорию Максвелла – Больцмана, а не метод свободного пробега, вывел формулу, связывающую скорость дрейфа W газовых ионов одного сорта с их коэффициентом диффузии D [12]. В современных обозначениях это соотношение имеет вид:

$$T = e \cdot D/\mu \text{ (формула Нернста–Таунсенда)} \quad (1)$$

Здесь T температура заряженных частиц, D – их коэффициент диффузии, μ – их подвижность.

Следует отметить, что выражение (1) вывел в 1889 г. Нернст для ионов в электролитах, но его теория не была, строго говоря, применима к разрядам в газах. Согласно [12] мы будем соотношение (1) называть формулой Нернста–Таунсенда, а не Эйнштейна–Смолуховского, применявших эту формулу в своих работах.

Среднюю энергию электронов или их температуру, согласно сказанному в п. 2, можно представить в виде хорошо аппроксимирующей формулы [5]:

$$T_e \sim eD_e/\mu_e\alpha(E/N)^\zeta.$$

Здесь D_e – коэффициент диффузии электронов, μ_e – их подвижность. Такая степенная аппроксимация не плохо описывает зависимость скоростей различных процессов переноса и весьма полезна при аналитических расчётах параметров амбиполярного дрейфа, различных амбиполярных и обычных диффузий, электрических или плазменных ветров, переходных профилей, обусловленных процессами амбиполярного переноса и даже ударных волн электрического поля [14; 15]. Этот закон близкий к «2/3» работает в широком диапазоне параметра E/N в газоразрядной плазме, в том числе в плазме водорода и воздуха (см. таблицы 14.6 и 14.18 в [12, с. 627, 648]). Температура электронов, согласно экспериментальным данным, в водородной плазме изменяется как степень $\zeta = 0,5$ ч 0,8 этого параметра в диапазоне E/N от 0,02 до 212 Td [12]. В воздухе $\zeta \approx 0,8$ ч

0,87. Для дрейфовой скорости электронов в воздухе хорошо использовать зависимость $V_e = 2.1 \cdot 10^6 (0.1 \cdot E/N)^{0.6}$. Здесь E/N в Таунсендах. Таким образом, параметр E/N является наиболее важным параметром в газоразрядной плазме. Именно, этот параметр характеризует внешнюю электрическую силу, активизирующую среду и поддерживающую в ней новое ионизационно-возбужденное состояние – газоразрядную плазму и плазменные структуры со слабым нарушением нейтральности, выступающие в виде нового светящегося фазового состояния в активизированной электрическим полем среде.

Как и в обычном газовом разряде Столетова-Таунсенда, характеризовать энергию заряженных частиц плазмы (электронов) при учёте заряда Земли для переходных амбиполярных профилей между атмосферой и ионосферой будем в Таунсендах (Td) параметром E/N . E – напряжённость электрического поля в области поверхности Земли, N – плотность тяжёлых частиц (нуклонов) в этой области. Пробой воздуха происходит при 60–70 Td или 30 кВ/см при атмосферном давлении, температура электронов при этом порядка 1 эВ. Средняя энергия электронов в плазме водорода ~ 1 эВ достигается при $E/N \approx 30$ Td [12]. Далее на базе этих данных мы аналитически и численно установим, на каких высотах от Земли возникают условия формирования самостоятельного разряда из-за достижения пробойных значений E/N , соответственно, со всеми вытекающими из этого явлениями, аналогичными явлениям в плазме лабораторного газового разряда [14; 15].

Математическая модель самостоятельного неоднородного разряда с УФ предиионизацией в воздухе в плазменном слое отрицательно заряженной Земли

Считается, что ионосфера Земли существует как результат УФ ионизации молекул воздуха [6]. Однако, как показывают оценки (см. табл. 1 и рис. 1), уже на высоте 36 км из-за заряда Земли зажигается самостоятельный разряд, так как параметр E/N достигает пробойных значений (74 Td) и даже существенно их превышает, а температура электронов на высоте 80 км, согласно рассматриваемой модели, неограничивающей рост параметра E/N , достигает 200 эВ и выше – больше. Далее мы укажем, какими процессами ограничивается рост параметра E/N .

На конференции [1, с. 9] А.В. Костровым из ИПФ РАН (Нижний Новгород), в докладе «Космическая пыль и глобальная электрическая цепь земли» рассмотрены некоторые вопросы, связанные с образованием глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦЗ). Им предпринята попытка определения условий формирования источника электричества, который достаточно стабильно поддерживает разность потенциалов между ионосферой и Землёй. Согласно его представлениям, основное «сердце атмосферной электрической машины – грозовое облако». Костров считает, что электрические заряды в облаках образуются при столкновениях аэрозолей, находящихся в разных агрегатных состояниях, и разделение зарядов происходит при взаимодействии заряженных частиц с конвективным потоком воздуха. Он полагает, что разноимённые заряженные частицы имеют существенно разные массы, так что скорости падения положительных и отрицательных зарядов в гравитационном поле Земли существенно различаются. В

докладе рассматриваются вопросы образования, зарядки и разрядки облаков, а также влияние космической пыли на погоду Земли. Согласно работе Кострова, космическая плазма, в которой находится наша планета Земля, состоит из ионов, электронов и отрицательно заряженной пыли. Таким образом, им делается попытка получить дипольное строение грозowych облаков [1, с. 9].

При таком подходе совершенно не анализируются роль электрического поля (нарушения нейтральности), являющегося отдельной очень важной компонентой плазмы. Как отмечалось выше, о важной роли параметра E/N в позапрошлом веке в своей работе говорил Столетов [11]. На его труд ссылался Таунсенд, который в многочисленных исследованиях показал, что все процессы рождения и переноса заряженных частиц плазмы определяются не напряжённостью электрического поля, а напряжённостью, приведённой к плотности частиц – E/N [12; 13]. Наличие огромного отрицательного заряда Земли в 500 000 Кл давно известно. А.В. Костров пытается его обосновать в своей работе. Мы в отличие от Кострова исследуем, к каким новым явлениям отрицательный заряд Земли приводит. Такой заряд приводит к напряжённости электрического поля у поверхности Земли $E = 100 \div 130$ В/м. Плотность частиц – N у поверхности Земли равна $2,7 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Здесь E/N порядка 0,41 Тд. Это ничтожные приведённые поля по сравнению с пробойными значениями для воздуха ~ 74 Тд (20 кВ/см при атмосферном давлении). Однако на высоте в 40 км плотность воздуха в $3 \cdot 10^2$ меньше, чем на поверхности Земли, и параметр E/N достигает 125 Тд, что больше пробойных значений воздуха, а температура свободных электронов порядка 2,6 эВ. Это существенно усиливает электрические токи и нагрев плазмы верхних слоёв стратосферы. Уже при таких значениях параметра E/N происходит интенсивное рождение возбуждённых молекул кислорода, разрушающих отрицательные ионы, и воздух становится электроположительным газом. Таким образом, на этих высотах уже формируется сферически симметричный слой плазмы **самостоятельного разряда** в поле отрицательного заряда Земли.

О существенном влиянии напряжённости электрического поля (заряда Земли) на процессы пробоя ионосферы, на процессы термодиффузии электронов из областей с высокими параметрами E/N и соответственно, с высокими температурами электронов – T_e пока не сообщалось в научной литературе, даже в недавно вышедшей монографии [16] и обзорах [2; 6; 17]. Исследователи ионосферы Земли и гелиосферы пока не осознали должным образом важность открытия нашего соотечественника Столетова и его последователя Таунсенда о фундаментальной роли управляющего параметра E/N для описания явлений в этих областях знаний. Проведём элементарные аналитические расчёты профилей приведённой к плотности частиц воздуха (взятой из [18]) напряжённости электрического поля и температуры электронов по соотношению Нернста–Таунсенда [11] и тем покажем, что в верхних слоях стратосферы создаются условия мощного самостоятельного разряда, формирования плазменного слоя и нагрева мезосферы ионными и электронными токами (см. табл. 1).

Особый практический интерес в исследовании заряженных структур представляет исследование поведения электронов в мезосфере и нижней ионосфере Земли.

Это представляется важным для развития таких систем, как ГЛОНАСС, GPS, и устойчивости спутниковых систем, в том числе и для специальных назначений и климатического влияния на атмосферу Земли. Как показали аналитические оценки, профили концентрации электронов в верхней атмосфере и ионосфере существенно зависят не только от УФ ионизации, но и от процессов прямой ионизации в электрическом поле отрицательно заряженной Земли. При этом профили концентрации электронов в переходных слоях (фарадеевых тёмных пространствах) описываются амбиполярными дрейфами, обусловленными нелинейными зависимостями дрейфовых скоростей заряженных частиц от параметра E/N [9; 14] и амбиполярной диффузии Пуассона, обусловленной нарушением нейтральности плазмы [15]. При этом диффузия Эйлера, обусловленная инерционностью ионов и электронов [15], и диффузия Шоттки, обусловленная различием температур ионов и электронов, оказываются малосущественными, если не учитывать формирование положительного объёмного заряда (ударной волны электрического поля), компенсирующего отрицательный заряд Земли в 500 кКл.

Скорость амбиполярного дрейфа в воздухе, согласно [9; 14], в области электрических полей, приведённых к плотности частиц воздуха ниже пробойных, определяется различием в зависимостях дрейфовых скоростей электронов и ионов и для воздуха равна

$$V_{aZ} \approx -2ZV_i/3.$$

Здесь Z – отношение концентрации отрицательных ионов к концентрации электронов, $2/3$ – определяется логарифмическими производными подвижностей электронов и ионов от параметра E/N , V_i – скорость положительных ионов.

$$T_e = 2,13 \cdot (\gamma/100)^{0,87} [\text{эВ}]; V_e = 2,1 \cdot (\gamma/10)^{0,6} [10^6 \text{ см/с}]; \gamma = E/N [\text{Тд}].$$

Характерный размер L профиля концентрации электронов из-за зависимости параметра E/N от высоты можно оценить, как для длины фарадеева тёмного пространства в разряде воздуха, согласно [9; 14], из

$$L = V_{aZ}/(Z(Z+1)\beta_{ii}n_e) \approx -2V_i/(3(Z+1)\beta_{ii}n_e) \sim 10 \text{ км.} \quad (2)$$

Таблица 1.

Зависимость параметров плазмы самостоятельного разряда от высоты над поверхностью отрицательно заряженной Земли ($Q = 500\,000$ Кл)

Высота, км	Плотность числа частиц в см^{-3} , $\times 10^{19}$	Относительная плотность	$\gamma = E/N$, Тд	T_e , эВ	V_e , 10^6 см/с	V_i , 10^3 см/с
0	2,7	1	0,41			
5	1,62	0,60	0,68			
10	0,91	0,337	1,2			
20	0,19	0,0726	5,5			
40	0,0088	0,00327	125,0	2,6	9,6	0,61
50	0,00228	0,00084	476,2	7	$2 \cdot 10^1$	2,3
60	0,000675	0,00025	1640,0	21	$4,2 \cdot 10^1$	8,0
80	0,000054	0,00002	20500,0	200	$1,9 \cdot 10^2$	100,0

Столь грубая оценка удовлетворительно совпадает с профилем концентрации электронов от высоты в ионосфере Земли, приведённым в [6] (см. рис. 2).

Детализация процессов дуальных процессов (кумуляции и диссипации) в гелиосфере

На базе теоремы вириала Клаузиуса и экспериментальных наблюдений за СВ нами детализированы 3D процессы кумуляции и диссипации частиц к Солнцу и от Солнца [5]. В этой работе обосновано наличие положительного заряда у Солнца. При этом расчёт параметра E/N в гелиосфере проводился по плотности частиц из [19]. Согласно [5] процессы кумуляции определяются силами гравитации, действующими на нейтральные атомы, молекулы и их системы, а также кулоновскими силами, действующими на электроны, отрицательно заряженные пылинки и отрицательно заряженные ионы. Согласно вириальной теореме [20] или третьему закону Ньютона [21], только $\frac{1}{2}$ потенциальной энергии гравитации и кулоновского потенциала может перейти в кинетическую энергию кумулирующих к Солнцу частиц. Вторая половина потенциальной энергии обязана рассеяться в окружающем Солнце пространстве, как показано в [21] это следствие теоремы вириала или третьего закона Ньютона. За распыл $\frac{1}{2}$ потенциальной энергии ответственны процессы диссипации (или силы противодействия среды силам кумуляции). На этой базе в [21] открыты би-циклоны или структурная турбулентность (соорганизация циклона и антициклона в единую кумулятивно-диссипативную структуру, обладающую кумулятивными свойствами как кумуляции потоков в структуру, так и распылом диссипативных потоков из структуры). При этом, чем сильнее силы кумуляции, тем сильнее силы диссипации.

Часть диссипирующей от Солнца энергии рассеивается в виде электромагнитного излучения – безмассовый распыл. Вторая часть определяется процессами диссипации массы в виде высокоэнергетичных электронов, теряющих энергию по мере ухода от положительно заряженного Солнца. Эта часть диссипативных потоков определяет постоянный заряд Солнца. В динамике кумуляция слабоэнергетичных электронов положительным зарядом Солнца приводит к их макселизации в области Солнца из-за электрон-электронных столкновений и появлению малой части электронов с огромными энергиями, достаточными для преодоления кулоновского потенциала положительно заряженного Солнца. Так в динамике поддерживается объёмный заряд Солнца. Третья часть энерго-массово-импульсного потока, диссипирующего $\frac{1}{2}$ потенциальной энергии (потока кумулирующего к Солнцу), определяется ускоренным распылом от положительно заряженного Солнца положительно заряженных ионов (протонов, альфа частиц и т.д.) по мере их рождения в любой точке гелиосферы. В этом проявляется явление бесконтактного нагрева электронов и ионов газоразрядной плазмы гелиосферы в электрическом поле положительно заряженного Солнца. Так формируется СВ [5]. Энергия для истечения СВ обусловлена гравитационным сжатием Солнца в собственном гравитационном поле. Сжатие сопровождается термоядерными реакциями нейтронизации атомов водорода в атомы гелия, сбросом малой части электронов из Солнца, как самого подвижного газа, за-

рядкой всего Солнца до 10^3 Кл, формированием кулоновских зеркал, отражающих положительные ионы, установлением огромных (в тысячу раз больше пробойных) приведённых напряжённостей электрического поля ($E/N \approx 26757$ Td и $T_e \sim 2000000^\circ$) на расстояниях 10–30 радиусов Солнца и формированием СВ (потоков положительно заряженных ионов) от Солнца во всей гелиосфере. Величина параметра альфа – $\alpha_{i1} = 7,5 \cdot 10^{-36}$ для Солнца, как и соответствующее значение α_{i1} для других звёзд, определяет свойства их короны и свойства истечения из звёзд «корпускул» положительно заряженных ионов. Этот параметр зависит только от степени среднего нарушения нейтральности звезды – полного отношения числа нуклонов с некомпенсированным зарядом (протонов) заряда-ми электронов к полному числу нуклонов в заряженной структуре.

Проведённый нами анализ указывает на простую интерференцию (взаимодействие) кулоновских и гравитационных сил или потенциалов в астрофизических объектах, приводящую к конвективному корпускуловращению (энерго-массово-импульсному вихревому – структурно-турбулентному обмену плазмы Солнца с плазмой всей гелиосферы, в том числе и отрицательно заряженной Землёй и её ионосферой). Этот круговорот заключается в следующем [5]. Атомы водорода вокруг Солнечной системы под действием сил гравитации фокусируются (кумулируют) к Солнцу. Попадая в область больших параметров E/N , атомы и молекулы водорода ионизируются высокоэнергетичными электронами. Образовавшиеся протоны и ионы с $Z/M \geq 0,107$ ускоряются электрическим полем положительно заряженного Солнца и диссипируют (рассеиваются) уже от Солнца, обратно в космическое пространство, где рекомбинируют с электронами и возвращаются опять к Солнцу в виде атомов и молекул водорода (здесь M – число нуклонов, Z – заряд иона или их системы). Ионы с $Z/M \leq 0,1$ продолжают двигаться к Солнцу под действием сил гравитации, и поэтому не наблюдаются в СВ. Так ион Fe^{+6} наблюдается, а Fe^{+5} уже не наблюдается. Они падают на положительно заряженное Солнце. Нарушение нейтральности и, соответствующая необходимость учёта параметра альфа при описании различных объектов, вызвано потерей высоко энергичных, подвижных, лёгких, отрицательно заряженных частиц – электронов. В плазме Солнца из-за электрон-электронных столкновений возникает постоянный поток энергии в область высокоэнергетичных электронов. Это приводит к потоку высокоэнергичных электронов из Солнца и к положительной зарядке Солнца, как целого, что формирует обратный поток ускоряемых к Солнцу потоков электронов из гелиосферы. Так формируется два квазипостоянных противоположно направленных потока электронов. При этом заряд Солнца остаётся практически постоянным или квазипостоянным, т.е. для ряда практических задач можно считать заряд Солнца постоянным или ещё одним «адиабатическим» параметром [5]. Нами показано, что даже слабое НН в массивных структурах, приводит к возникновению условий сепарации, дискриминации и отделения части массы структуры. В этом особенность всех кумулятивно-диссипативных структур. Для астрообъектов этот процесс происходит из-за различия гравитационных сил, ответственных за стабильность структуры, и кулоновских сил отталкивания, возникающих из-за избыточного заряда. Это

способствует разделению потоков к Солнцу и от Солнца и сепарации в них заряженных частиц, в частности положительных ионов, по параметру Z/M .

Согласно [5], за нагрев основания короны Солнца до температур 1,5–2 млн. градусов и вызывающее её расширение от Солнца ответственны процессы кумуляции, к поверхности положительно заряженного Солнца, электронов, рождённых в гелиосфере. Если они фокусируются без столкновений, то их энергия может достигать 10^3 эВ. На расстояниях от Солнца порядка 10–20 радиусов Солнца фокусирующиеся электроны уже испытывают неупругие столкновения, максвеллизуются в электрон-электронных столкновениях и их энергия может определяться параметром E/N . Как показывают оценки по соотношению Нернста–Таунсенда средняя энергия свободных электронов в этой области порядка 170 эВ (при $E/N \sim 27 \cdot 10^3$ Td). Здесь высокоэнергичные электроны могут менять направление движения и уходить из Солнечной системы, что приводит к остыванию области на 20 радиусах от Солнца. Теперь нам понятны и механизмы, обеспечивающие выход в межпланетное пространство ионов более тяжёлых, чем протоны и альфа-частицы и с энергией порядка 10^3 эВ. За это ответственен заряд Солнца. Вынос из гелиосферы происходит для всех ионов с отношением заряда к массе $Z/M \geq 0,107$ (6/55,84) [5].

Если процессы распыла высоко энергичных электронов определяются процессами максвеллизации функции распределения электронов кумулирующих к положительно заряженному Солнцу, то распыл положительных ионов определяется функционированием кулоновских зеркал. В этой модели мы объединяем по сути в единый класс такие явления, как электрический ветер, плазменный ветер, поток ионов от анода в газоразрядной плазме постоянного тока и СВ. Эти все явления обусловлены нарушением нейтральности и существенным нагревом частиц плазмы в электрическом поле заряженной структуры (заряженной иглы, анода, Солнца и др.).

Согласно Паркеру [22], первое чёткое утверждение, что нечто, кроме света, приходит к Земле от Солнца, было высказано в 1896 г. норвежским физиком Олафом К. Биркеландом. Он пришёл к этому заключению на основе того факта, что полярные сияния очень похожи на электрический разряд в недавно изобретённых тогда трубках, генерирующих потоки заряженных частиц («катодные лучи»). В данной работе доказывается, что явления в гелиосфере, на расстояниях от 8 000 км от Солнца, до Земли и даже далее, аналогичны явлениям (ионному ветру или плазменному ветру), происходящим вокруг острой заряженной иглы (эксперименты с колесом Франклина и др.). Наши исследования явлений в СВ полностью соответствуют не только представлениям Паркера, на что обычно ссылаются все астрофизики, но и Олафа К. Биркеланда и Рудольфа Ю.Э. Клаузиуса, который ввёл понятие вириала в 1870 г. Эта работа, как и [5], развивают их идеи до модели, позволяющей рассчитывать параметры плазмы во всей гелиосфере по минимальному значению параметра Z/M (шесть раз ионизованному иону железа) зафиксированному в СВ.

Как доказано аналитическими расчётами, зная ионный состав СВ из экспериментов, согласно предложенному в работе [5] методу, мы можем рассчитать электрические параметры самого Солнца, его короны и оценить энергетические

параметры СВ в области Земли. Для верификации полученных результатов нужны подробные экспериментальные исследования параметров солнечной короны (профиль плотности частиц), и достоверные данные о ионном составе СВ, возникающего из-за кулоновских зеркал, отражающих эти положительно заряженные ионы от Солнца. Нужны и достоверные знания об неупругих столкновениях между нуклонами, об электрон-электронных столкновениях и т.д.

Оказывается, согласно [5], только знания типов ионов в СВ, установленные в экспериментах, могут в разы изменить расчётные параметры Солнца и СВ в различных условиях. Эти знания позволяют аналитически и численно исследовать: новые физические механизмы формирования СВ, динамику его крупномасштабных возмущений, стратификацию (как обычного разряда низких давлений, наблюдавшуюся ещё Фарадеем), точки, линии и поверхности либрации-кумуляции между положительно заряженными структурами СВ, открытые в газоразрядной плазме Высикайло в [23; 24], а также механизмы, регулирующие сравнительное поведение различных ионных компонент при различных типах течений СВ. Уникальность экспериментальных исследований в естественной лаборатории – гелиосфере определяется огромными значениями параметра E/N , полученные в [5] и гигантскими размерами областей ускорителя заряженных частиц с температурами электронов до 2 000 000 °С. В [5] предложен механизм, ответственный за нагрев основания короны Солнца до температур 1,5–2 млн градусов и вызывающий её расширение от Солнца в виде потока протонов, альфа-частиц и более тяжёлых ионов. Таким механизмом является бесконтактный нагрев электронов и ионов в электрическом поле положительно заряженного Солнца в газоразрядной плазме гелиосферы. Кумулятивные процессы на Солнце обусловлены силами гравитации, а соответствующие диссипативные процессы определяются рассеиванием электромагнитного излучения и «корпускулярными лучами» – СВ (ионы и высокоэнергичные электроны).

Закключение

Считалось, что плазма ионосферы определяется только УФ излучением Солнца [6]. Нами открыт новый источник ионизации воздуха в ионосфере Земли. Метод учёта бесконтактного нагрева электронов дальнедействующим электрическим полем в области заряженных структур, разработанный для гелиосферы в [5], впервые нами применён для расчётов профилей температуры электронов в мезосфере и ионосфере Земли (отрицательный заряд Земли – 500 000 Кл, профиль N взят из [18]). На базе авторской математической модели, разработанной ранее для описания неоднородных самостоятельных разрядов в воздухе [7; 9; 14] впервые аналитически получены для мезосферы и ионосферы отрицательно заряженной Земли профиль (от высоты над уровнем моря) параметра E/N (рис. 1, табл. 1) и соответствующие ему профили температуры T_e и концентрации электронов n_e . Сравнение с экспериментальными наблюдениями показывает, что переходные профили концентрации электронов в мезосфере и ионосфере Земли определяются процессами амбиполярного дрейфа, обусловленного различными зависимостями дрейфовых скоростей электронов и ионов

от напряжённости электрического поля, и в процессах рождения плазмы ионосферы важны процессы прямой ионизации частиц воздуха электронами, греющимися в электрическом поле отрицательно заряженной Земли.

Авторами впервые предлагаются основы новой астрофизики – астрофизики кумулятивно-диссипативных неоднородных заряженных структур. В работе доказывается, что опыт, накопленный в научных лабораториях СССР и в частности в ФИАЭ (Филиале Института атомной энергии им. И.В. Курчатова) при аналитическом и экспериментальном исследовании газоразрядной плазмы («грязной плазмы» по выражению Л.А. Арцимовича), возникающей между положительно заряженным анодом и отрицательно заряженным катодом, оказывается весьма полезным для описания явлений в ионосфере отрицательно заряженной Земли и в гелиосфере положительно заряженного Солнца [5].

На базе этого опыта, экспериментальных исследований аппаратом ACE (2011 г.) ионного состава солнечного ветра (СВ) [5] и аналитических расчётов, выполненных авторами в [4–10; 17; 18] нами впервые детализируется конкретный 3D механизм нагрева плазмы СВ в короне Солнца в его постоянном кулоновском поле, как положительно заряженной кумулятивно-диссипативной структуры. **Наличие положительного заряда у Солнца, отрицательного заряда у Земли и движение положительных ионов от Солнца указывают на существование неоднородного по профилю плотности тяжёлых частиц разряда огромной длины в гелиосфере между Солнцем и Землёй.** Эту цепь можно назвать глобальной электрической цепью гелиосферы (ГЭЦГ). В ГЭЦГ как заряженные элементы могут входить и другие планеты и даже астероиды и кометы. При этом Солнце, его корона и даже гелиосфера играют роль огромного анода (положительно заряженного плазмоида огромных размеров), а отрицательно заряженные планеты и тела – роль вращающихся катодов. Таким образом, глобальная электрическая цепь Земли не определяется только процессами переноса заряженных частиц в облаках в атмосфере Земли. Процессы в облаках являются встроенными в более глобальную электрическую цепь гелиосферы. В результате аналитических исследований впервые на базе гипотезы о ГЭЦГ определены в [5] и данной работе, рассчитаны и верифицированы экспериментальными наблюдениями:

1) заряд Солнца – $1,4 \cdot 10^3$ Кл, способный отражать протоны, альфа-частицы и даже несколько раз ионизованные ионы тяжёлых атомов, рождающиеся в короне Солнца и ускоряемые до 400 км/с и более в его электрическом поле без столкновений [5];

2) коэффициент некомпенсированности заряда Солнца – $\alpha_{cl} = 7,5 \cdot 10^{-36}$, т.е. на 10^{36} компенсированных нуклонов приходится всего 7,5 электронов, покинувших Солнце далеко за пределы размеров задачи (например, Солнечной системы) [5];

3) профиль параметра E/N , определяющий условия пробоя и температуру электронов в гелиосфере [5] и ионосфере Земли (рис. 1);

4) профиль температуры электронов в гелиосфере от Солнца и до Земли [5], и в нижней ионосфере Земли. Расчёт проводился по соотношению Нернста–Таунсенда по профилю E/N . Профиль $E(r)$ рассчитан по закону Кулона, а профиль плотности нуклонов в гелиосфере взят из [19], а для атмосферы Земли из [18].

Проведённые в данной работе аналитические расчёты и сравнение с наблюдаемыми в экспериментах профилями концентрации электронов от высоты над поверхностью отрицательно заряженной Земли показали, что при формировании нижней ионосферы существенна роль не только процессов УФ-ионизации, но и процессов амбиполярного дрейфа, амбиполярной диффузии Пуассона и самое главное процессов прямой ионизации молекул и атомов воздуха в верхних слоях атмосферы в электрическом поле отрицательно заряженной Земли. При этом профили концентрации электронов формируются аналогично профилям в фарадеевом тёмном пространстве в разряде в электроотрицательном газе, как это выполнено в [9; 14]. Амбиполярный дрейф в ионосфере направлен от поверхности Земли, где параметр E/N мал, в сторону больших значений этого параметра. Это приводит к амбиполярному выносу концентрации электронов из нижних слоёв в верхние. В газовом разряде в воздухе в фарадеевом тёмном пространстве амбиполярный дрейф направлен аналогично от катода в сторону анода и эти профили имеют размеры от 1 см до 50 см при давлениях газа порядка 100 тор. В верхней атмосфере Земли эти переходные размеры порядка 10–30 км и более.

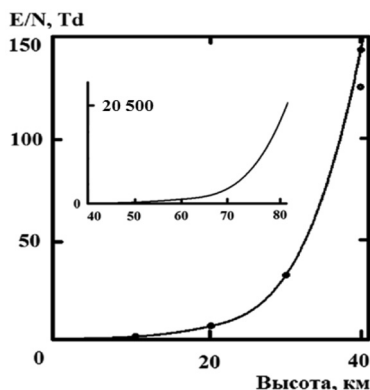


Рис. 1. Профиль параметра E/N при заряде Земли 500 000 Кл и профиле N от высоты из [15].

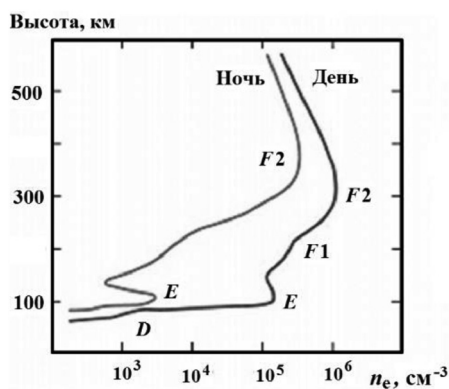


Рис. 2. Распределение концентрации электронов от высоты над поверхностью Земли [3].

Таким образом, мы приходим не только к определённой детализации глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦЗ), но и к открытию более глобальной электрической цепи гелиосферы (ГЭЦГ) с Солнцем как основным энергетическим источником её существования и поддержания явлений бесконтактного нагрева электронов и ионов газоразрядных плазм гелиосферы и ионосферы Земли. Такие явления характерны для всех атмосфер планет, окружающих любые звезды. При этом отрицательный заряд Земли определяется не только пылинками или снежинками, а проникновением и высаживанием в них высокоэнергетичных электронов из Солнца и всей гелиосферы в планеты и их спутники. Чем вся гелиосфера не кулоновский кристалл в зародыше? Здесь центробежный потенциал интерферирует с гравитационным и маленьким, но очень важным для здоровья и самочувствия живых организмов электромагнитными потенциалами заряженных астроструктур.

Детальному исследованию влияния процессов амбиполярного дрейфа плазмы в электрическом поле отрицательно заряженной Земли в неоднородной плазме самостоятельного разряда с мощной УФ предиионизацией посвятим следующую работу.

Проведённое нами аналитическое исследование причин возникновения СВ и заряда Земли показывает, что косвенным признаком кумулятивных процессов в КД структурах типа Солнца и Солнечной системы может являться не только вращение (об этом писал Е.И. Забабахин), но и нарушение нейтральности, генерация магнитного поля и формирование противоположно направленных – бициклонических вращающихся потоков кумулирующей всей массы Солнца к его центру и расфокусирующей массы СВ, покидающего солнечную систему (см. подробнее [25]). Таким образом, при кумуляции массы происходит не только усиление вращения, но и нарушение нейтральности кумулятивно-диссипативной структуры и сепарация потоков в структуру и из структуры. Нарушение нейтральности приводит к возбуждению турбулентных (вихревых) потоков. Следовательно, косвенным признаком кумуляции являются вращение структуры, нарушение её нейтральности и как следствие первых двух явлений – генерация магнитного поля и турбулентных (вихревых) потоков плазмы вокруг плазменной КД-структуры. Из-за сложного, но аналогичного характера явлений, которые могут происходить в кумулятивно-диссипативных структурах любого размера в микро- и макромире при НН, решаемые в этой работе задачи представляют интерес в широком диапазоне физических задач, в том числе и для газоразрядной плазмы.

Статья поступила в редакцию 01.10.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник тезисов докладов Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (12–16 февраля 2018, ИКИ РАН, г. Москва) [Электронный ресурс]. URL: <https://plasma2018.cosmos.ru/docs/abstract-book-plasma2018.pdf> (дата обращения: 10.11.2018).
2. Тонкие токовые слои: от работ Гинзбурга – Сыроватского до наших дней / Зелёный Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю. // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. Выпуск 11. С. 1153–1188.

3. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированной воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения / Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., А.В. Шиндин // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. Выпуск 11. С. 1189–1228.
4. Формирование плазменно-пылевых облаков при ударе метеороида о поверхность Луны / Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Бережной А.А., Зубко Е.С., Итен М., Лена Р., Спозетти С., Великодский Ю.И., Терещенко А.А., Атаманюк Б. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2018. Т. 108. Выпуск 6. С. 379–387.
5. Vysikaylo Ph.I., Korotkova M.A. Determination of the Sun's charge by the parameters of heavy ions in the solar wind [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1009 : [сайт]. URL: <http://china.iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1009/1/012020/pdf> (дата обращения: 10.11.2018).
6. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. Выпуск 11. С. 1145–1179.
7. Высикайло Ф.И. Кумуляция электрического поля в диссипативных структурах в газоразрядной плазме. // Журнал экспериментальной и технической физики. 2004. Т. 125. № 5. С. 1071–1081.
8. Высикайло Ф.И. Скачки параметров неоднородной столкновительной плазмы с током, обусловленные нарушением квазинейтральности // Физика плазмы. 1985. Т. 11. № 10. С. 1256–1261.
9. Высикайло Ф.И., Напартович А.П., Стационарная одномерная модель разряда в электроотрицательном газе [Электронный ресурс] // Теплофизика высоких температур : [сайт]. 1981. Т. 19. Выпуск 2. С. 421–424. URL: <http://www.mathnet.ru/links/21054ac583852318f473ea0a9ddfa156/tvt8261.pdf> (дата обращения: 10.11.2018).
10. Особенности переноса тока в разряде в поперечном сверхзвуковом потоке газа при формировании цилиндрических, кумулятивных структур (плазмоидов) / Высикайло Ф.И., Ершов А.П., Кузьмин М.И., Тивков А.С., Чекалин Б.В. [Электронный ресурс] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике: [сайт]. 2007. Т. 5. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2007-5/articles/44/> (дата обращения: 10.11.2018).
11. Столетов А.Г. Актино-электрические исследования // Журнал Русского физико-химического общества. Часть физическая. 1889. Т. 21. Вып. 7–8. С. 159–206.
12. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир, 1977, С. 626–627.
13. Мак-Даниель И., Мэзон Э. Подвижность и диффузия ионов в газах. М.: Мир, 1976. 422 с.
14. Высикайло Ф.И. Процессы амбиполярного переноса в формировании неоднородных профилей в структурах в газоразрядной плазме: дис. ... докт. ф.-м. наук. Троицк, Московская область, 2003, 268 с.
15. Высикайло Ф.И., Кузьмин М.И., Чекалин Б.В. Решение уравнений Громека–Ламба по теории возмущений [Электронный ресурс] // Математическое моделирование: [сайт]. 2006. Т. 18. № 12. С. 52–66. http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=132&option_lang=rus#forwardlinks (дата обращения: 10.11.2018).
16. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата. Долгопрудный: Интеллект, 2017. 256 с.
17. Квазиadiaбатическое описание динамики заряженных частиц в космической плазме / Зеленый Л.М., Нейштадт А.И., Артемьев А.В., Вайнштейн Д.Л., Малова Х.В. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183. Выпуск 4. С. 365–415.

18. АТМОСФЕРЫ СПРАВОЧНЫЕ. Параметры. ГОСТ 24631-81 [Электронный ресурс]. URL: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/48147.3/atmosfery_spravochnye_parametry.pdf (дата обращения: 10.11.2018).
19. Мартынов Д.Я. Курс общей астрофизики. М.: Наука, 1971. 616 с.
20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 1. Механика. 5-е изд. М.: Физматлит, 2013. 224 с.
21. Высикайло Ф.И. «Квазипероидальные» бициклоны. Турбулентные структуры с вращением и кумулятивными струями // Инженерная физика. 2013. № 7. С. 3–36.
22. Паркер Э. Солнечный ветер // Успехи физических наук. 1964. Т. 84. Выпуск 9. С. 169–182.
23. Высикайло Ф.И. Точки, линии и поверхности либрации (кумуляции) Высикайло-Эйлера в неоднородных структурах в плазме с током // XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 8–12 февраля 2010 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVII/T.html#Seksija%20T> (дата обращения: 10.11.2018).
24. Vysikaylo P.I. Cumulative Point-L1 Between Two Positively Charged Plasma Structures (3-D Strata) // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42. Iss. 12. PP. 3931–3935.
25. Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 352 p.

REFERENCES

1. *Sbornik tezisev dokladov Trinadtsatoi ezhegodnoi konferentsii «Fizika plazmy v solnechnoi sisteme» (12–16 fevralya 2018, IKI RAN, g. Moskva)* [Abstracts of the Thirteenth annual conference on Plasma Physics in Solar System (12–16 February 2018, Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow)]. Available at: <https://plasma2018.cosmos.ru/docs/abstract-book-plasma2018.pdf> (accessed: 10.11.2018).
2. Zelenyi L.M., Malova H.V., Grigorenko E.E., Popov V.Yu. [Thin current sheets: from the work of Ginzburg and Syrovatskii to the present day]. In: *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* [Advances in Physical Sciences], 2016, vol. 186, iss. 11, pp. 1153–1188.
3. Grach S.M., Sergeev E.N., Mishin E.V., Shindin A.V. [Dynamic properties of ionospheric plasma turbulence driven by high-power high-frequency radiowaves]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2016, vol. 186, iss. 11, pp. 1189–1228.
4. Popel' S.I., Golub' A.P., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Berezhnoi A.A., Zubko E.S., Iten M., Lena R., Spozetti S., Velikodskii Yu.I., Tereshchenko A.A., Atamanyuk B. [The formation of plasma-dust clouds when a meteoroid strikes the surface of the moon]. In: *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters], 2018, vol. 108, iss. 6, pp. 379–387.
5. Vysikaylo Ph.I., Korotkova M.A. Determination of the Sun's charge by the parameters of heavy ions in the solar wind. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1009. Available at: <http://china.iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1009/1/012020/pdf> (accessed: 10.11.2018).
6. Gurevich A.V. [Nonlinear effects in the ionosphere]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2007, vol. 177, iss. 11, pp. 1145–1179.
7. Vysikaylo Ph.I. [Electric field cumulation in dissipative structures of gas-discharge plasmas.]. In: *Zhurnal eksperimental'noi i tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2004, vol. 125, no. 5, pp. 1071–1081.
8. Vysikaylo Ph.I. [Jumps of parameters of a non-uniform collisional plasma with current due to violation of quasi-neutrality]. In: *Fizika plazmy* [Plasma Physics Reports], 1985, vol. 11, no. 10, pp. 1256–1261.

9. Vysikaylo Ph.I., Napartovich A.P. [Stationary one-dimensional model of the discharge in electronegative gas]. In: *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 1981, vol. 19, iss. 2, pp. 421–424. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/21054ac583852318f473ea0a9ddfa156/tvt8261.pdf> (accessed: 10.11.2018).
10. Vysikaylo Ph.I., Ershov A.P., Kuz'min M.I., Tivkov A.S., Chekalin B.V. [Peculiarity of current transfer in discharge blown off with transversal supersonic gas flow and forming of cumulative plasma structures]. In: *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike* [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2007, vol. 5. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2007-5/articles/44/> (accessed: 10.11.2018).
11. Stoletov A.G. [Actino-electrical research]. In: *Zhurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva. Chast' fizicheskaya* [Journal of the Russian Physico-Chemical Society. Physical part], 1889, vol. 21, no. 7–8, pp. 159–206.
12. Huxley L., Crompton R. *Diffusion and Drift of Electrons in Gases*. New York, Wiley, 1974.
13. McDaniel E., Mason E. *The Mobility and Diffusion of Ions in Gases*. New York, Wiley, 1973.
14. Vysikaylo Ph.I. *Protsessy ambipolyarnogo perenosa v formirovanii neodnorodnykh profilei v strukturakh v gazorazryadnoi plazme: dis. ... dokt. f.-m. nauk* [Ambipolar transfer processes in the formation of inhomogeneous profiles in structures in a gas-discharge plasma: D. thesis in Physical and Mathematical Sciences]. Troitsk, Moscow Region, 2003, 268 p.
15. Vysikaylo Ph.I., Kuz'min M.I., Chekalin B.V. [Solving Gromeka–Lamba equations by means of perturbation theory]. In: *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Models and Computer Simulations], 2006, vol. 18, no. 12, pp. 52–66. Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=132&option_lang=rus#forwardlinks (accessed: 10.11.2018).
16. Smirnov B.M. *Fizika global'noi atmosfery. Parnikovy efekt, atmosfernoe elektrichestvo, evolyutsiya klimata* [Physics of the global atmosphere. Greenhouse effect, atmospheric electricity, evolution of climate]. Dolgoprudny, Intellect Publ., 2017. 256 p.
17. Zelenyi L.M., Neishtadt A.I., Artem'ev A.V., Vainshtein D.L., Malova Kh.V. [Quasi-adiabatic dynamics of charged particles in a space plasma]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2013, vol. 183, iss. 4, pp. 365–415.
18. *ATMOSPHERE SPRAVOCHNIYE. Parametry. GOST 24631-81* [ATMOSPHERE REFERENCE. Parameters. GOST 24631-81]. Available at: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/48147.3/atmosfera_spravochnye_parametry.pdf (accessed: 10.11.2018).
19. Martynov D.Ya. *Kurs obshchei astrofiziki* [The course of General astrophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 616 p.
20. Landau L.D., Lifshits E.M. *Mechanics (Volume 1 of A Course of Theoretical Physics)*. Oxford, Pergamon Press, 1969.
21. Vysikaylo Ph.I. [“Quasi-Cooper” bi-cyclones. 3D turbulence structure with rotation and the cumulative jet]. In: *Inzhenernaya fizika* [Engineering Physics], 2013, no. 7, pp. 3–36.
22. Parker E. [Solar wind]. In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 1964, vol. 84, iss. 9, pp. 169–182.
23. Vysikaylo Ph.I. [Points, lines and surfaces of Vysikaylo-Euler libration (cumulation) in inhomogeneous structures in a plasma with current]. In: *XXXVII Mezhdunarodnaya (Zvenigorodskaya) konferentsiya po fizike plazmy i UTS. 8–12 fevralya 2010 g.* [XXXVII International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Thermonuclear Fusion. 8–12 February 2010]. Available at: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVII/T.html#Sekcija%20T> (accessed: 10.11.2018).
24. Vysikaylo P.I. Cumulative Point–L1 Between Two Positively Charged Plasma Structures (3-D Strata). In: *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, vol. 42, iss. 12, pp. 3931–3935.

25. Vysikailo Ph.I. *Arkhitektura kumulyatsii v dissipativnykh strukturakh* [The architecture of cumulation in dissipative structures]. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing, 2013. 352 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Высикайло Филипп Иванович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета; e-mail: filvys@yandex.ru;

Некрасов Григорий Юрьевич – студент третьего курса Московского государственного областного университета; e-mail: grygory.nkr@mail.ru;

Пронин Никита Алексеевич – аспирант кафедры теоретической физики Московского государственного областного университета; e-mail: s4astliv4i_k@mail.ru;

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Philip I. Vysikaylo – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University; e-mail: filvys@yandex.ru;

Grigory Yu. Nekrasov –third-year student, Moscow Region State University; e-mail: grygory.nkr@mail.ru;

Nikita A. Pronin – post-graduate student at the Department of Theoretical Physics, Moscow Region State University; e-mail: s4astliv4i_k@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Высикайло Ф.И., Некрасов Г.Ю., Пронин Н.А. Самостоятельный разряд в ионосфере отрицательно заряженной земли // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2018. № 4. С. 36–53.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-36-53

FOR CITATION

Vysikaylo P., Nekrasov G.Yu., Pronin N.A. Gas discharge in the ionosphere of the negatively charged earth. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 4, pp. 36–53.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-36-53