

УДК 537.565, 537.562, 551.594

## Ионизация воздуха в предгрозовых атмосферных условиях

Н. В. Арделян, В. Л. Бычков, К. В. Космачевский, Д. С. Максимов

*Рассмотрены плазмохимические процессы в больших областях воздуха (на больших временах) в экстремальных грозовых и атмосферных условиях. Проведено математическое моделирование, на основе которого оценены эффективные величины приведенных напряжённостей электрических полей при лавинном развитии процессов нагрева газа. Оценены величины температуры локального разогрева. Дана оценка роли острий в объеме газа в исследуемых процессах развития нагрева. Развитие разрядов на этих объектах может породить появление очагов свечения и воспламенения углеводородных материалов, которые будут проявляться в виде огней Хессдалена и лесных светящихся шаров.*

PACS: 51.50.+v, 02.60.Cb, 92.60.Ls

*Ключевые слова:* ионизация в атмосфере, ионизация в воздухе, ионизация в воздухе смеси, нагрев воздуха, огни Хессдалена.

### Введение

Исследования возможности воспламенения материалов в периоды грозовой и тектонической активности представляют интерес для решения задач безопасности жизнедеятельности [1—3]. Особенно это касается, воспламенения углеводородных компонентов (древесины, горючих материалов и горючих газов) вызванных появлением локальных источников тепла, приводящих к пожарам лесов [3], жилищ, хранилищ горючих материалов и др. легко воспламеняющихся объектов. В периоды грозовой активности локальные значения электрического подоблачного поля на поверхности Земли поднимаются до значений  $10^3$ — $10^4$  В/м и выше [4] при величине, так называемого, пробойного поля 2,8—3 МВ/м при атмосферном давлении 760 мм рт столба и температуре окружающего воздуха 291 К. В частности, под грозовым облаком, имеющем грозовую ячейку, несущую электрический заряд порядка 4—5 Кл, находящемся на

высоте 1 км над поверхностью Земли, создается электрическое поле порядка  $(3—5) \cdot 10^4$  В/м, а в аномальных условиях по заряду в грозовой ячейке, это значение может быть в несколько раз большим, характеризующимся даже свечением травы [5]. При развитии газовых разрядов в условиях таких электрических полей возможно воспламенение природных органических материалов: паров тяжелых эфиров, компонентов разложения органических углеводородов, метана, пропано-воздушных смесей вблизи хранилищ и др.

Электрические поля, достаточные для воспламенения, могут реализоваться в результате геотектонических процессов, в приземном слое, причем с соответствующими процессами ионизации и заряжения различных объектов, в т. ч. деревьев и их листвы. Разряды с заострений, различных выступов и тонких предметов, на которых реализуются высокие электрические поля, могут приводить к воспламенению поднимающихся вверх паров и струй органических компонентов. Величина средней концентрации заряженных частиц (ионов) в условиях нормальной атмосферы порядка  $10^3$  см<sup>-3</sup> при скорости ионизации электронами атмосферного фона  $Q = 4—10$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup> [5]. Скорость ионизации атмосферного фона в условиях геотектонической активности растет аномально, в [6] на основе экспериментов показано, что в условиях влажных гор она достигает значений 0,6 Кл м<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup> (или  $Q = 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>). К сожалению, природа такого скачка в настоящее время остается невыясненной.

Наличие высокочастотных полей, усиливающих процессы наработки фоновых заряженных частиц, также наблюдалось в природе в условиях геотектонической активности [6—8]. К эффектам

---

Арделян Николай Васильевич, ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>.  
Бычков Владимир Львович, ведущий научный сотрудник<sup>2</sup>.  
Космачевский Константин Викторович, старший научный сотрудник<sup>1</sup>.

Максимов Дмитрий Сергеевич, аспирант<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Факультет вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 52.

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

E-mail: bychvl@orc.ru

<sup>3</sup>Московский радиотехнический институт РАН.

Россия, 117519, Москва, Варшавское ш., 132.

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2015 г.

© Арделян Н. В., Бычков В. Л., Космачевский К. В., Максимов Д. С., 2015

такого типа могут относиться светящиеся зимой объекты вблизи старых (разрушающихся гор), опоясывающие долину Хесдаллен в Норвегии [7], и светящиеся шары, появляющиеся во влажных лесах в отсутствие грозовой активности [3].

Целью данной работы является плазмохимический анализ процессов в воздухе при низких значениях приведенной напряженности электрического поля  $E/N \ll 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup> (где  $E$  — напряженность электрического поля,  $N$  — концентрация молекул газа), которые могут реализоваться в локальных условиях на заостренных предметах, и выяснение возможности реализации огней Хесдаллена и лесных светящихся шаров в экстремальных условиях.

### Исходные данные

Поставленная цель для своего достижения требует рассмотрения известных процессов при специфических параметрах электрических полей и развития возможных разрядов. Следует отметить, что как электрические поля грозовой, так и геотектонической активности реализуются на относительно большом временном (часы) и пространственном (метры) масштабах [7, 8]. Это означает, что в течение этого времени в локальной области повышенного уровня электрического поля, реализованного грозowymi и геотектоническими условиями, и/или уровня фоновой ионизации, реализованного геотектоническими условиями, будет происходить локальная наработка заряженных частиц без существенного выноса в процессах переноса за время релаксации возбужденных состояний молекул. При этом будет происходить локальное возбуждение электронами вращательных, колебательных и электронных состояний (включая диссоциацию) молекул газа. Данные состояния быстро релаксируют при атмосферном давлении, в результате чего будет происходить локальный разогрев воздуха. Нарботанные электроны во внешнем электрическом поле будут производить дополнительный нагрев области, вследствие чего может происходить аномально быстрый рост температуры газа, который и приводит к воспламенению углеводородных компонентов. Усиленная ионизация, нагрев и воспламенение могут произойти также, если происходит локальное усиление электрического поля у заостренных предметов [9], при этом возрастает скорость ионизации, и локальный разогрев происходит быстрее. По своему характеру задача является аналогичной задачам нагрева газа в несамостоятельном газовом разряде в воздухе [10].

В данной статье в этой связи проведено численное исследование механизма локального на-

грева сухого и влажного воздуха при атмосферном давлении и начальной комнатной температуре во внешнем электрическом поле при наличии источника фоновых электронов. В последующих разделах мы на основании численных расчетов выявим характерные минимальные значения эффективных электрических полей, реализуемых на временном интервале до  $10^3$  с.

### Модель плазмы воздуха

Для исследования химической кинетики плазмы в воздухе мы использовали вычислительный плазма-химический код, разработанный нами в работах [11—13]. Он содержит плазмохимию воздуха и электронно-молекулярные реакции во внешнем электрическом поле из работ [14—16], а для воды из [11—12]. Прделанный анализ доступной литературы и методов моделирования реакций показал, что на данном этапе моделирования плазмы приходится рассматривать смесь без участия больших аэрозольных частиц, поскольку детальная информация о реакциях с их участием реакций отсутствует. При моделировании мы использовали реакции с участием 27 ионов и 23 нейтралов, включая положительные ионы  $O^+$ ,  $O_2^+$ ,  $O_4^+$ ,  $O_6^+$ ,  $O_8^+$ ,  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $OH^+$ ,  $HO_2^+$ ,  $H_2O^+$ ,  $O_2^+(H_2O)$ ,  $H_3O^+$ ,  $H_3O^+(H_2O)$ ,  $H_3O^+(OH)$ ,  $H_3O^+(H_2O)_2$ ,  $H^+(H_2O)_2$ ,  $H^+(H_2O)_3$ ,  $H^+(H_2O)_4$ , отрицательные ионы  $O^-$ ,  $O_2^-$ ,  $O_3^-$ ,  $O_2^-(H_2O)$ ,  $O_2^-(H_2O)_2$ ,  $H^-$ ,  $OH^-$ , атомы  $O$  и  $H$ , молекулы  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_3$ , радикалы  $OH$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $O_2(^1\Delta_g)$ ,  $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ ,  $O(^1D_1)$ ,  $O(^1S_0)$ , электроны и молекулярные компоненты, в т. ч. азотные из системы реакций для сухого воздуха [14]. Число реакций для сухого воздуха 200 и 250 для влажного воздуха, включающего компоненты с водородом. Мы также учли реакции ион-ионной рекомбинации каждого положительного иона с каждым отрицательным, при этом были использованы оценочные значения для констант скоростей [14], поскольку большинство таких реакций в настоящее время не исследовано. Модель включает трёх-тельное прилипание электронов к молекулам кислорода в присутствии  $O_2$  и  $H_2O$  в качестве третьих тел и диссоциативное прилипание электронов к молекулам кислорода в основном и нижних электронно-возбужденных состояниях. Также учтены процессы перезарядки ионов [11].

Мы учли охлаждение электронов плазмы при возбуждении молекул воды, кислорода и азота, в т.ч. возбуждение вращательных, колебательных и электронных степеней свободы этих молекул. Учтены процессы девозбуждения этих состояний в основном при столкновениях с молекулами. Соответствующие члены нагрева и охлаждения в уравнении энергии для электронов были интерполиро-

ваны в зависимости от электронной температуры  $T_e$ . Мы также учли нагрев и охлаждение газа в экзотермических и эндотермических плазмохимических реакциях и джоулев нагрев. Плазма рассматривается как идеальный газ с показателем адиабаты 1,4. Такое рассмотрение ограничивает применимость модели случаем слабоионизованного газа, когда концентрации заряженных частиц значительно меньше, чем концентрации двухатомных компонент воздуха.

Используемая плазмохимическая модель описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений и допускает два предельных случая с точки зрения газовой динамики: в приближении постоянной плотности газодинамическое расширение не рассматривается и давление растет с температурой; в приближении постоянного давления газодинамическое расширение происходит за типичное время процессов и плотность падает с ростом температуры. Результаты данной работы были получены в условиях постоянной плотности. В случае влажного воздуха процентное содержание воды составляло 1 %.

Энерговклад быстрых частиц фона  $W$  (скорость ионизации воздуха быстрыми электронами) мы приводим в эВ/(см<sup>3</sup> с), а скорость возбуждения молекул этими электронами  $Q$  связана с  $W$  соотношением из [11], а именно,  $Q = W/(U_i)$ , где  $U_i$  — цена ионизации, которая для воздуха имеет значение  $U_i = 31,6$  эВ. Цены ионизации и возбуждения молекул быстрыми электронами взяты из [15, 16].

### Результаты расчетов

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов для нагрева сухого и влажного воздуха.

На рис. 1, а, б приведены временные зависимости роста концентрации электронов и температуры сухого воздуха для экстремальных условий возбуждения быстрыми частицами атмосферного фона,  $Q = 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>, при различных значениях начального электрического поля  $E \sim (1-5) \cdot 10^5$  В/м, которым соответствуют начальные значения параметра  $E/N = 3,7 \cdot 10^{-17} - 1,85 \cdot 10^{-16}$  В·см<sup>2</sup> (где  $E$  — напряженность внешнего электрического поля,  $N$  — концентрация нейтрального газа). Видно, что рост электронной концентрации (на временах  $t < 10^3$  с) сопровождается ростом температуры газа (до 2500 К) при относительно малых значениях параметра  $E/N$ .

На рис. 1, а показано, что ионизация на больших временах имеет несколько мод: «предионизация», промежуточная и мода быстрой ионизации. Реализация моды «предионизации» обеспечивается процессами ионизации быстрыми электронами фона при низких значениях электрических полей. При этом процессы трехчастичного и диссоциативного прилипания электронов к молекулам приводят к снижению концентрации электронов. На больших временах происходит нагрев газа (см. рис. 1, б), при этом прилипание электронов к молекулам замедляется, и концентрация электронов растет во времени быстрее. Плазма электроотрицательна с преобладанием ионов  $O_3^-$ ,  $O_2^-$ ,  $NO^+$ . Следом за этим реализуется мода быстрой ионизации, при которой реализуются высокие температуры, сильно замедляются процессы прилипания, плазма становится электронной. После этого устанавливается режим квазиравновесия. Исследование данного состояния требует применения сложной газодинамической модели, что выходит за рамки проведенного изучения.

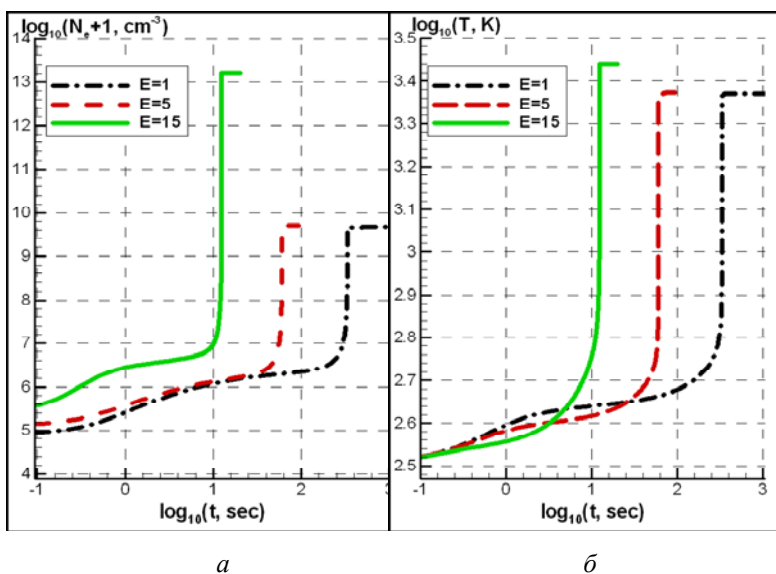


Рис. 1. Зависимости физических параметров от времени в сухом воздухе при скорости возбуждения  $W = 144 \cdot 10^{12}$  эВ/(см<sup>3</sup> с): а) концентрации электронов  $N_e$  и б) температуры газа  $T$ .  $E$ , кВ/см;  $T$ , К; время  $t$ , с. Начальная температура воздуха  $T_0 = 288$  К, фоновая ионизация  $Q = 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>

Ситуация серьёзно меняется при рассмотрении влажного воздуха. Результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 2, а, б для скорости возбуждения  $W = 1,44 \cdot 10^{14}$  эВ/(см<sup>3</sup> с) (или  $Q = 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup>).

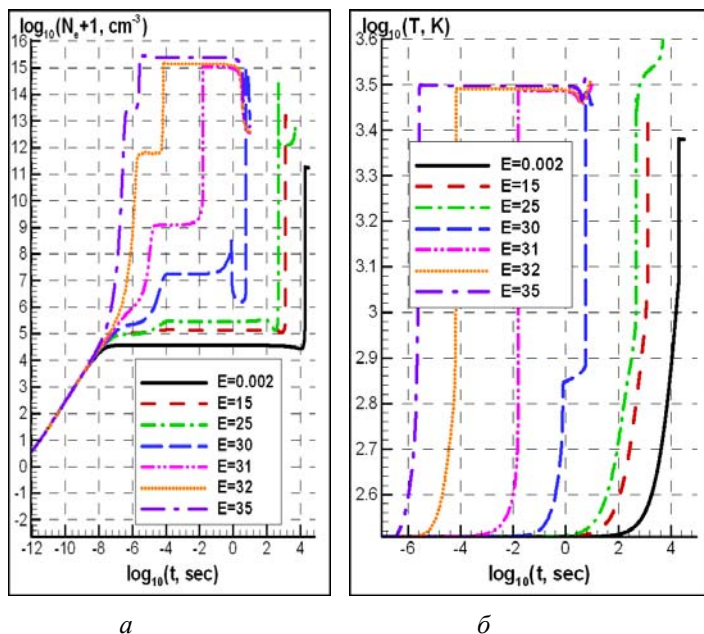


Рис. 2. Зависимости от времени физических параметров: а) концентрации электронов  $N_e$  и б) температуры газа  $T$  во влажном воздухе при скорости возбуждения  $W = 144 \cdot 10^{12}$  эВ/(см<sup>3</sup> с).  $E$ , кВ/см;  $T$ , К; время  $t$ , с. Водяной пар 1 % (объемный). Начальная температура воздуха  $T_0 = 288$  К, при локальном  $E = 30, 31, 32, 33, 36$  кВ/см, фоновая ионизация  $Q = 4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup>

Мы, как и в предыдущем случае, видим несколько мод ионизации, сопровождающихся процессами прилипания электронов к молекулам. Эти процессы имеют место на фоне электронно-ионной и ионно-ионной рекомбинации с участием комплексных ионов. Мы видим нагрев газа до  $T > 2500$  К при различных значениях внешнего электрического поля  $E$  в диапазоне от 200 В/м до величин больших 30 МВ/м ( $E/N$  в диапазоне  $7,4 \cdot 10^{-20} - 1,11 \cdot 10^{-15}$  В·см<sup>2</sup>).

Последний результат показывает, что даже при очень небольших значениях локальных электрических полей около разрушающихся (старых) гор могут реализовываться большие области ионизации и условия для локального разогрева газа до температур воспламенения углеводородных материалов.

Именно этот эффект мог послужить причиной появления горных огней, подобных наблюдавшимся в местечке Хессдаллен в Норвегии [7] и лесных светящихся шаров [3] в условиях геотектонической активности.

Этот результат позволяет объяснить появление светящихся шаров [3] в жаркую погоду в лесах в период геотектонической активности. В этом случае они представляют собой воспламенение и горение тяжелых эфирных компонент под действием разрядов, реализующихся на острых предметах (ветви, хвоя и т. д.).

## Роль острий

Оценим параметры острий, при наличии которых в области сильного поля будет усиливаться ионизация в газе. В качестве модели острия примем длинный и узкий металлический сфероид.

Согласно [9], у проводящих сфероидов происходит усиление поля в соответствии со следующей формулой

$$E_{surf} = E_{ext} / k \quad (1)$$

где  $E_{surf}$  — напряженность электрического поля на конце сфероида,  $E_{ext}$  — напряженность внешнего электрического поля. При этом коэффициент  $k$  зависит от отношения поперечного и продольного размеров сфероида ( $b/a$ ) (причем  $(b/a) \ll 1$ ) следующим образом:

$$k \approx (b/a)^2 \cdot \left( \ln \left( 4 / (b/a)^2 \right) / 2 - 1 \right), \quad (2)$$

где  $b$  — поперечный размер сфероида,  $a$  — его продольный размер.

Используя формулу (2), легко рассчитать, что локальное электрическое поле в воздухе  $E = 15$  кВ/см, будет достигаться уже при окружающем электрическом поле  $E = 4,5 \cdot 10^4$  В/м характерного для грозовой активности при  $a/b \approx 8$ .

## Заключение

В работе проведены расчеты эффективных электрических полей, которые могут приводить к локальному разогреву воздуха в экстремальных физических условиях.

Температура нагрева воздуха вполне может достигать значения  $T = 2500$  К. При такой температуре возможно воспламенение углеводородных материалов: древесины, деревянных построек, исходящего из Земли метана и др.

Результаты наших расчетов находятся в разумном согласии (до 30 %) с данными расчетов [17] для сухого воздуха при давлении 13 кПа,  $E/N = 3 \cdot 10^{-16}$  В·см<sup>2</sup> и скорости ионизации пучком электронов  $Q = 3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup> на временах порядка 0,1 с. При больших временах наши результаты растут, а в [17] падают. Это, видимо, связано с тем, что в [17] не проводилось одновременного расчета температуры газа. С ростом температуры газа увеличиваются скорости отлипания электронов от молекул кислорода и уменьшаются коэффициенты рекомбинации электронов и ионов [18], причем эффективные значения концентрации электронов тоже растут.

Следует учитывать роль проводящих острий. В частности, при отношении продольных и поперечных размеров тонких предметов ( $a/b$ )  $\approx 8-10$ , будет происходить усиление поля у острия, и, следовательно, реализовываться локальный разогрев или воспламенение углеводородов. Именно развитие таких разрядов может породить появление очагов свечения, которые будут проявляться в виде различного рода огней (типа огней Хессдаллена и лесных светящихся шаров).

*Авторы выражают благодарность И. В. Кочетову за консультации и расчет констант возбуждения и ионизации компонент плазмы воздуха.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур И. И., Иванов О. П. Опасные природные процессы. — М.: Экономика, 2004.
2. Драйсден Д. Введение в динамику пожаров. — М.: Стройиздат, 1990.
3. Taylor A. R. Forest Fire. In Yearbook of Science and Technology — McGraw-Hill, 1974.
4. Хргиан А. Х. Физическая метеорология. В разделе «Метеорология и климатология». Т. 3. Итоги науки и техники. — М.: ВИНТИ, 1976.
5. Reiter R. Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity. — Amsterdam-London-New-York: Elsevier, 1992.
6. Enomoto Y., Hashimoto T. // Nature. 1990. V. 346. P. 641.
7. Zou Y.-S. // Physica Scripta. 1995. V. 52. P. 726.
8. Икея М. Землетрясения и животные. — М.: Научный Мир, 2008.
9. Ландау Л. Д., Lifshits E. M. Электродинамика сплошных сред. — М.: Наука, 1982.
10. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1992.
11. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Bychkov D. V., et al. / In Plasma Assisted Combustion, Gasification and Pollution Control. Chapter 3. Electron-Beam and Non-Self-Maintained Driven Plasmas for PAC. (Denver: Outskirts press, 2013).
12. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V., et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. V. 41. P. 3240.
13. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V., et al. / AIAA-2009-0693. 47<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. 5–8 January 2009. Electron-beams for Plasma Impact on Gas Flammable Mixtures (Orlando World Center Marriott. Orlando. Florida).
14. Kostinsky A. Y., Matveev A. A., Silakov V. P., et al. // Plasma Sources. Sci. Tech. 1992. V. 1. P. 207.
15. Konovalov V. P. // Journal of Technical Physics. 1993. V. 63. P. 23.
16. Коновалов В. П., Сон Е. Е. // Химия плазмы. 1987. Т. 14. С. 194.
17. Александров Н. Л., Высикайло Ф. И., Исламов Р. Ш. и др. // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. С. 485.
18. Мнацаканян А. Х., Найдис Г. В. // Химия плазмы. 1987. Т. 14. С. 227.

## Air ionization under extreme physical conditions

*N. V. Ardelyan<sup>1</sup>, V. L. Bychkov<sup>2</sup>, K. V. Kosmachevskii<sup>1</sup>, and D. S. Maximov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Department of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University  
Bld. 52, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

<sup>2</sup> Physical Department of Lomonosov Moscow State University  
Bld. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: bychvl@orc.ru

<sup>3</sup> Moscow Radio Engineering Institute  
132 Varshavskoe shosse, Moscow, 117519, Russia.

*Received December 7, 2015*

***Plasmochemical processes in big areas have been considered. Mathematical modeling to estimate effective value of effective ionization electric field in dry and humid air has been conducted. Values of***

**local heating temperature have been estimated. Effect of spikes in the considered processes has been estimated. Appearance of discharges near these objects can lead to local heating to temperatures typical for ignition of hydrocarbons. These events can be realized in the form of Hessdallen lights and forest fireballs.**

PACS: 51.50.+v, 02.60.Cb, 92.60.Ls

**Keywords:** atmosphere ionization, air ionization, long term discharges, Hessdallen lights.

#### REFERENCES

1. I. I. Mazur and O. P. Ivanov, *Danger Nature Processes* (Ekonomika, Moscow, 2004) [in Russian].
2. D. Draisdien, *Introduction in Dynamics of Fires* (Stroiizdat, Moscow, 1990) [in Russian].
3. A. R. Taylor, *Forest Fire. In Yearbook of Science and Technology* (McGraw-Hill, 1974).
4. A. Kh. Khrgian, *Physical Meteorology, in Book: Itogi Nauki Tekhniki Vol. 3* (VINITI, Moscow, 1976).
5. R. Reiter *Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity*. — Amsterdam-London-New-York: Elsevier, 1992.
6. Y. Enomoto and T. Hashimoto, *Nature* **346**, 641 (1990).
7. Y.-S. Zou, *Physica Scripta* **52**, 726 (1995).
8. M. Ikeya, *Macroseisms and Animals*. (nauch. Mir, Moscow, 2008) [in Russian].
9. L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Electrodynamics of Continua* (Nauka, Moscow, 1982) [in Russian].
10. Yu. P. Raizer, *Physics of Gas Discharge* (Nauka, Moscow, 1992) [in Russian].
11. N. V. Ardelyan, V. L. Bychkov, D. V. Bychkov, et al., in *Proc. Plasma Assisted Combustion, Gasification and Pollution Control. Chapter 3. Electron-Beam and Non-Self-Maintained Driven Plasmas for PAC*. (Denver: Outskirts press, 2013).
12. N. V. Ardelyan, V. L. Bychkov, K. V. Kosmachevskii, et al., *IEEE Transactions on Plasma Science* **41**, 3240 (2013).
13. N. V. Ardelyan, V. L. Bychkov, K. V. Kosmachevskii, et al., in *Proc. AIAA-2009-0693. 47<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting. 5–8 January 2009. Electron-beams for Plasma Impact on Gas Flammable Mixtures* (Orlando World Center Marriott. Orlando. Florida).
14. A. Y. Kostinsky, A. A. Matveev, V. P. Silakov, et al., *Plasma Sources. Sci. Tech.* **1**, 207 (1992).
15. V. P. Konovalov, *Tech. Phys.* **63**, 23 (1993).
16. V. P. Konovalov and E. E. Son, *Chemistry of Plasma* **14**, 194 (1987).
17. N. L. Aleksandrov, F. I. Vysikailo, R. Sh. Islamov, et al., *High Temp.* **19**, 485 (1981).
18. A. Kh. Mnatsakanyan and G. V. Naidis, *Chemistry of Plasma* **14**, 227 (1987).

\* \* \*