



ВЫПИСКА

из протокола совместного заседания семинара Отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН от 09.06.23 о принятии заключения по диссертационной работе заместителя заведующего отдела 260 ИПФ РАН Евтушенко Андрея Александровича «Исследование условий инициации, особенностей развития и глобального распределения высотных разрядов в атмосфере», представляемой на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

Участники семинара Отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики: руководитель семинара, д.ф.-м.н., академик РАН Е.А. Мареев; секретарь семинара, к.ф.-м.н., н.с. М.В. Шаталина; д.ф.-м.н., зав.отд. А.М. Фейгин; д.ф.-м.н., в.н.с. И.Б. Коновалов; д.ф.-м.н., г.н.с. Е.Н. Пелиновский; д.ф.-м.н. зав.лаб. М.Ю. Куликов; д.ф.-м.н., зав. лаб. А.В. Костров; д.ф.-м.н., зав. сектором А.В. Слюняев; д.ф.-м.н., в.н.с. Иудин Д.И., к.ф.-м.н., зам.зав.отд. Е.М. Лоскутов; к.ф.-м.н., зав.лаб. А.С. Гаврилов; к.ф.-м.н., зав.отд. А.И. Малеханов; к.ф.-м.н., зав.лаб. А.С. Сергеев; к.ф.-м.н., зав.лаб. Д.А. Сергеев; к.ф.-м.н., с.н.с. А.В. Кочетов; к.ф.-м.н., зам.зав.отд. Н.В. Ильин; к.ф.-м.н., зав.лаб. Ю.В. Шлюгаев; к.ф.-м.н., зав.лаб. Гущин М.Е.; к.ф.-м.н., н.с. Стриковский А.В.; к.ф.-м.н., зав.лаб. Зудин И.Ю.; к.ф.-м.н., н.с. Галка А.Г.; к.ф.-м.н., с.н.с. Слюняев Н.Н. и др.

СЛУШАЛИ:

Доклад А.А. Евтушенко о содержании и основных результатах диссертации, выполненной в отделе 260 ИПФ РАН. По докладу выступил д.ф.-м.н. И.Б. Коновалов. Вопросы по докладу задавали: д.ф.-м.н., зав.отд. А.М. Фейгин; д.ф.-м.н. И.Б. Коновалов, к.ф.-м.н., зав.лаб. А.С. Сергеев; д.ф.-м.н., зав. лаб. А.В. Костров; к.ф.-м.н., с.н.с. А.В. Кочетов. Заслушав доклад А.А. Евтушенко и его ответы по существу подготовленной им диссертационной работы, участники семинара приняли следующее Заключение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность темы

После открытия высотных разрядов (спрайтов, джетов, гало и эльфов) встал вопрос об их влиянии на химический состав, проводимость атмосферы и о глобальном распределении. Возмущение электрического поля во время высотного разряда инициирует плазмохимические реакции, приводящие к ионизации и возбуждению атомов и молекул. Наиболее интересны для исследования спрайты, так как они занимают объем в несколько тысяч кубических километров, характеризуются высокой частотой инициации, а над особо мощными мезомасштабными конвективными системами (ММКС) могут зажигаться целыми группами. Джеты интересны тем, что проходят через озоновый слой.

Постановка задачи численного моделирования о влиянии разрядов на химический баланс атмосферы всегда начинается с определения химических компонент, задания начальных условий для них во всем диапазоне исследуемых высот, выбора основных реакций, являющихся стоками и источниками. Модельные и экспериментальные данные о концентрации основных нейтральных компонент, электронов и некоторых ионов доступны только для определенного диапазона высот. Процессы, происходящие в азотно-кислородной смеси под воздействием импульсного электрического поля, хорошо описаны в [1]. Сложность нахождения данных о скоростях химических реакций и начальных концентраций является основным доводом к использованию ограниченного набора компонент, несмотря на наличие достаточных вычислительных мощностей.

Химические возмущения атмосферы во время джета были впервые исследованы в 1997 году [2]. Для азотно-кислородной смеси, содержащей 15 химических компонент, использовалось 40 реакций. Показано, что при развитии одиночного джета на высоте 30 км происходит локальное изменение концентрации NO на 10% и O₃ на 0,5%. Подчеркивается, что возмущение концентраций пропорционально квадрату давления и в нижней части озонового слоя может дополнительно возрасти из-за наличия голубых стартеров. Улучшенная модель для 33 химических компонент и более полным учетом влияния электронов на развитие голубого джета проведена в работе [3]. По сравнению с [2], относительное возмущение концентрации NO должно быть выше, а для O₃ – ниже. Обе работы основывались на достаточно старой физической модели джета [4], в которой электрические поля и соответствующие процессы в головке стримера были недооценены, по сравнению с улучшенной моделью [5]. Самое полное исследование с учетом последних данных о физических процессах, происходящих во время джета, проведено в работе [6]. Химический блок расширен до 1000 реакций и 88 химических компонент. Расчеты проведены для высот 18, 27 и 38 км для ночных и дневных условий. Концентрации O₃, NO, N₂O возрастают на порядки, при развитии голубого джета, и увеличиваются с уменьшением высоты исследования.

В 2004 году проведено моделирование диффузной области спрайта, с акцентом на исследование возмущения концентрации O(¹D) и O(³P) в дневных и ночных условиях при импульсном дипольном моменте (ИДМ) 1000 Кл·км [7]. Детальная модель для стримеров спрайта (80 компонент и более 800 реакций) была предложена в 2008 г. [8]. Основное внимание обращено на накопление молекулярных и атомарных азота и кислорода в возбужденном состоянии, сделана оценка по накоплению NO для стримера спрайта $5 \cdot 10^9$ см⁻³. В [9] исследовано развитие стримеров спрайта на высотах 63, 68 и 78 км, изучена динамика химической системы из 75 компонент и более чем 500 реакций, проанализированы возмущения концентраций возбужденных состояний азота, кислорода и связанными с ними эмиссиями в оптическом, ультрафиолетовом, инфракрасном диапазонах. Развитие модели представлено в статье [10], где указано, что в нижней части стримеров спрайта инфракрасное излучение от CO₂ может достигать высокой интенсивности. В [11] рассчитано распределение электронов по энергии и уделено особое внимание динамике колебательно-возбужденных состояний азота. Глобальные и локальные оценки по наработке оксидов азота и озона во время развития спрайта сделаны на основе данных

со спутника FORMOSAT-2. Локальное возмущение оксидов азота на высоте 70 км может достигать 5 раз, но в глобальном масштабе спрайты не являются значимым источником NO_x [12]. В работе [13] исследовано влияние гало на состав мезосферы и проанализированы излучения в оптическом диапазоне. Подробно исследована роль отлипания электронов от O^- при развитии разряда и релаксации возмущения ионов. В статье [14] исследуется чувствительность модели WACCM к возмущениям химического состава, а особенно оксидов азота, вызываемых спрайтами. Показано, что спрайты могут быть важным источником NO_x в тропиках на высоте 70 км и локально возмущать концентрацию оксидов азота до 20 % над областями высокой молниевой активности, но глобального эффекта на содержание NO_x не оказывают.

Надежной статистики и параметров глобального распределения спрайтов на основе данных непосредственных наблюдений не существует. Проводятся локальные наблюдательные кампании [15], дополняемые отдельными фактами регистрации высотных разрядов, и спутниковые наблюдения [16–18]. По данным, собранным за 4 года на спутнике FORMOSAT-2, было зарегистрировано 633 спрайта, 5 434 эльфов, 657 гало и 13 гигантских джетов [17], что составляет лишь малую часть от общего количества высотных разрядов. Полученные данные позволяют оценить относительную частоту появления высотных разрядов. Построение глобального распределения высотных разрядов требует существенных допущений и аппроксимации данных. Поверхность Земли была разбита на ячейки $2,5 \times 2,5^\circ$, при этом рассматривались только события, происходящие в ячейках, где спутник находился не менее 30,7 минут за 3 года. Некоторые зоны (Великие равнины в США, Восточно-Китайское море, часть Бразилии и Аргентины), известные своей высокой спрайтовой активностью, не были исследованы по техническим причинам. В результате получено, что глобальная частота инициации спрайтов составляет 1 событие в минуту. В статье [19] сделано исследование интенсивности инициации спрайтов на основе исследования магнитного поля в низкочастотном диапазоне 1-100 Гц. Выделялись события, при которых на несколько среднеквадратичных отклонений превышались фоновые значения. Фактически, фиксировались экстремально мощные разряды облако-земля, и использовалось предположение об их тесной связи со спрайтами [20]. В результате, для спрайтов получена оценка 720 событий/день, с указанием, что этот результат следует рассматривать как нижнюю границу. Средние значения дипольного момента для зафиксированных вспышек более 600 Кл·км, что превышает общепринятые на сегодня значения и указывает на занижение полученной оценки [21].

В натуральных экспериментах нельзя организовать систематизированные измерения, позволяющие исследовать явление в аналогичных условиях. Заранее предсказать место появления высотного разряда и предположить его параметры на сегодняшний момент невозможно, поэтому значительный интерес представляет лабораторное моделирование, осуществляемое на относительно небольших по размерам установках. В силу сложной и принципиально нелинейной динамики высотных разрядов, критерии подобия при их масштабировании не определены, но в лабораторных условиях можно воспроизвести структурные особенности разрядов в атмосфере и общие закономерности в развитии разряда, с сохранением некоторых количественных параметров [22].

В 2001 году появилась первая работа по лабораторному моделированию спрайтов и эльфов [23]. В плексигласовой трубе (длина 1,8 м, диаметр 0,61 м) с пониженным давлением был инициирован разряд в постоянном поле. Рядом с положительным электродом основное излучение приходится на первую положительную систему молекулярного азота (1PN_2), а рядом с отрицательным электродом наблюдается синее свечение, возникающего из-за излучения в первой отрицательной полосе N_2^+ . Развитие работы в части увеличения мощности и токов разряда было сделано в [24], с последующим сравнением с данными наблюдений. Изучение условий инициации и распространения стримера в синтетическом газе (80:20 для $\text{N}_2:\text{O}_2$) при давлении 0,1-2000 Торр (размер вакуумной камеры 220 мм и межэлектродное расстояние 30 мм), с использованием камеры с наносекундным разрешением, а также численное моделирование проведено в [25]. Показано, что диаметр стримеров обратно пропорционален давлению, а

ветвление наблюдается при давлениях выше 470 Торр. В статье [26] проведены оценки наработки оксидов азота в спрайтах и джетах. В прозрачной пластиковой камере с межэлектродным расстоянием 5 см создавалось давление, соответствующее тропосфере (100-500 Торр), стратосфере (1-100 Торр), мезосфере (1 Торр и менее), и исследовалась эффективность наработки оксидов азота на джоуль подведенной к разряду энергии. Рассчитано количество NO_x от единичного спрайта и джета, с учетом частоты инициации высотных разрядов, сделана оценка для высотных разрядов как источника оксидов азота в глобальном масштабе. Подходы и полученные результаты не были приняты в научном сообществе, вызвали появление критических статей [27,28] и последующих комментариев [29]. Исследование законов подобия и границ их применимости для азота и воздуха проведено в работе [30], где экспериментально показано сохранение приведенного диаметра стримеров (произведение диаметра стримера на давление, деленное на температуру газа) в диапазоне от 10^{-5} -1 Бар, хотя теоретические оценки предсказывают границу в 0,04 Бар. На этой же установке были исследованы спектры и параметры спрайтов, которые возможно иницируются в атмосфере Венеры (смесь $\text{CO}_2\text{-N}_2$) и Юпитера (смесь $\text{H}_2\text{-He}$). Показано, что для воздуха, чистого азота и смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2$ приведенный диаметр практически одинаковый, а для смеси $\text{H}_2\text{-He}$ в 2 раза больше [31]. Исследование плазмы в диапазоне давлений 0,1-2 мБар, с разрешением до 0,01 нм, с целью выяснения вращательной температуры газа в высотных разрядах, проведено в [32]. В работе [33] сделана попытка объяснить некоторые свойства джетов и спрайтов с помощью нового типа разряда, названного «апокампом» [34]. Исследование распространения стримеров в потоке газа проведено в [35], где изначально нагретая до 500 °С струя воздуха при распространении смешивалась с воздухом комнатной температуры, что приводит к изменению плотности потока, проходящего между электродами. Показано, что с повышением давления понижается диаметр стримеров, исследовано их ветвление. Моделирование отдельных свойств спрайтов проведено в [36]. Предварительно заряженная диэлектрическая пластина помещалась в вакуумную камеру объемом 2 м³, где производилась откачка. При давлении 10-100 Торр происходит инициация стримеров с заряженной пластины. В диапазоне 2-16 Торр иницируется сферический разряд, не соприкасающийся с диэлектрической пластиной, названный «реопу». Данный тип разряда имеет спектральный состав излучения, аналогичный верхней части спрайтов.

Данная диссертация посвящена комплексному изучению физико-химических процессов во время высотных разрядов. Предложена самосогласованная аксиально-симметричная плазмохимическая модель и применена для расчета возмущения химического баланса мезосферы во время спрайта и гало. Предложена новая параметризация для изучения глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN. Впервые реализовано моделирование спрайтов на лабораторной установке в градиенте давления.

1. Косый И.А., Костинский А.Ю., Матвеев А.А. Плазмохимические процессы в неравновесной азотно-кислородной смеси // Труды ИОФАН. — 1994. — Т. 47. — Р. 37-57.
2. Mishin E. Ozone layer perturbation by a single blue jet // *Geophys. Res. Lett.* — 1997. — V. 24, № 15. — Р. 1919–1922.
3. Smirnova N.V., Lyakhov A.N., Kozlov S.I. Lower stratosphere response to electric field pulse // *Int. Journ. Geomagn. Aeron.* — 2003. — V. 3, № 3. — Р. 281–287.
4. On blue jet dynamics / Sukhorukov A.I., Mishin E.V., Stubbe P., Rycroft M. J. // *Geophys. Res. Lett.* — 1996. — V. 23, № 13. — Р. 1625–1628.
5. Mishin E.V, Milikh G.M. Blue Jets: Upward Lightning // *Sp. Sci. Rev.* — 2008. — V. 137, № 1–4. — Р. 473–488.
6. Winkler H., Notholt J. A model study of the plasma chemistry of stratospheric Blue Jets // *Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* — 2015. — V. 122. — Р. 75-85.
7. Generation of metastable oxygen atom O(1D) in sprite halos / Hiraki Y., Tong L., Fukunishi H., Nanbu K., Kasai Y., Ichimura A. // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — V. 31. — P. L14105.

8. Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G. Plasma chemistry of sprite streamers // *Geophys. Res.* — 2008. — V. 113. — P. D11112.
9. Gordillo-Vázquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites // *Phys. D. Appl. Phys.* — 2008. — V. 41, № 23. — P. 234016.
10. Parra-Rojas F.C., Luque A., Gordillo-Vázquez F.J. Chemical and thermal impacts of sprite streamers in the Earth's mesosphere // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2015. — V. 120, № 10. — P. 8899–8933.
11. Gordillo-Vázquez F.J. Vibrational kinetics of air plasmas induced by sprites // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2010. — Vol. 115, № 5. — P. A00E25.
12. Parameterisation of the chemical effect of sprites in the middle atmosphere / Enell C.-F., Arnone E., Adachi T., Chanrion O., Verronen P.T., Seppälä A., Neubert T., Ulich T., Turunen E., Takahashi Y., Hsu R.-R. // *Ann. Geophys.* — 2008. — V. 26, № 1. — P. 13–27.
13. Liu N. Multiple ion species fluid modeling of sprite halos and the role of electron detachment of O⁻ in their dynamics // *Geophys. Res.* — 2012. — V. 117, № A3. — P. A03308.
14. WACCM climate chemistry sensitivity to sprite perturbations / Arnone E., Smith A.K., Enell C.-F., Kero A., Dinelli B.M. // *Geophys. Res. Atmos.* — 2014. — V. 119, № 11. — P. 6958–6970.
15. Sprite climatology in the Eastern Mediterranean Region / Yair Y., Price C., Katzenelson D., Rosenthal N., Rubanenko L., Ben-Ami Y., Arnone E. // *Atmos. Res.* — 2015. — V. 157. — P. 108–118.
16. The ASIM Mission on the International Space Station / Neubert T., Østgaard N., Reglero V., Blanc E., Chanrion O., Oxborrow C.A., Orr A., Tacconi M., Hartnack O., Bhandari D.V. // *Space Sci. Rev.* — 2019. — V. 215, № 2. — P. 1–17.
17. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events / Chen A.B., Kuo C.-L., Lee Y.-J., Su H.-T., Hsu R.-R., Chern J.-L., Frey H.U., Mende S.B., Takahashi Y., Fukunishi H., Chang Y.-S., Liu T.-Y., Lee L.-C. // *Geophys. Res.* — 2008. — V. 113. — P. A08306.
18. New observations of sprites from the space shuttle / Yair Y., Israelevich P., Devir A.D., Moalem M., Price C., Joseph J.H., Levin Z., Ziv B., Sternlieb A., Teller A. // *Geophys. Res.* — 2004. — V. 109, № D15. — P. D15201.
19. Sato M., Fukunishi H. Global sprite occurrence locations and rates derived from triangulation of transient Schumann resonance events // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — Vol. 30, № 16. — P. 1859–1863.
20. Sprites, ELF Transients, and Positive Ground Strokes / Boccippio D.J., Williams E.R., Heckman S.J., Lyons W.A., Baker I.T., Boldi R. // *Science.* — 1995. — V. 269, № 5227. — P. 1088–1091.
21. Qin J., Celestin S., Pasko V.P. Minimum charge moment change in positive and negative cloud to ground lightning discharges producing sprites // *Geophys. Res. Lett.* — 2012. — V. 39, № 22. — P. L22801.
22. Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика. Основные принципы. Москва: Мир, 1967. 260 с.
23. Williams E.R. Sprites, elves, and flow discharge tubes // *Phys. Today.* — 2001. — V. 54., № 11. — P. 41–47.
24. Williams E.R. Calibrated radiance measurements with an air-filled glow discharge tube: Application to sprites in the mesosphere // *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, *Nato Sci. Ser. II*, vol. 225 / ed. Füllekrug M., Marev E.A., Rycroft M.J. Dordrecht, Netherlands.: Springer — 2006. — P. 237–251.
25. Pancheshnyi S., Nudnova M., Starikovskii A. Development of a cathode-directed streamer discharge in air at different pressures: Experiment and comparison with direct numerical simulation // *Phys. Rev. E.* — 2005. — V. 71, № 1. — P. 016407.
26. NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites / Peterson H., Bailey M., Hallett J., Beasley W. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2009. — Vol. 114., № A12 — P. A00E07.
27. Nijdam S., van Veldhuizen E.M., Ebert U. Comment on “NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites” by H. Peterson et al. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2010. — V. 115, № A12. — P. A12305.
28. de Urquijo J., Gordillo-Vázquez F.J. Comment on “NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites” by Harold Peterson et al. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2010. — V. 115, № A12. — P. A12319.

29. Reply to comment by J. de Urquijo and F. J. Gordillo-Vázquez on “NO_x production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites” / Peterson H., Bailey M., Hallett J., Beasley W. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2010. — Vol. 115, № A12. — P. A12319.
30. Briels T.M.P., Van Veldhuizen E.M., Ebert U. Positive streamers in air and nitrogen of varying density: Experiments on similarity laws // *Phys. D. Appl. Phys.* — 2008. — V. 41, № 23. — P. A234008.
31. Sprite discharges on Venus and Jupiter-like planets: A laboratory investigation / Dubrovin D., Nijdam S., van Veldhuizen E.M., Ebert U., Yair Y., Price C. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2010. — V. 115, № A6. — P. A00E34.
32. Spectroscopic diagnostics of laboratory air plasmas as a benchmark for spectral rotational (gas) temperature determination in TLEs / Parra-Rojas F.C., Passas M., Carrasco E., Luque A., Tanarro I., Simek M., Gordillo-Vázquez F.J. // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2013. — V. 118, № 7. — P. 4649–4661.
33. Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I. Colored Diffuse Mini Jets in Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges // *IEEE Trans. Plasma Sci.* — 2016. — V. 44, № 4. — P. 386–392.
34. Phenomenon of apokamp discharge / Sosnin E.A., Skakun V.S., Panarin V.A., Pechenitsin D.S., Tarasenko V.F., Baksht E.Kh. // *JETP Lett.* — 2016. — V. 103, № 12. — P. 761–764.
35. Study of streamers in gradient density air: Table top modeling of red sprites / Opaits D.F., Shneider M.N., Howard P.J., Miles R.B., Milikh G.M. // *Geophys. Res. Lett.* — 2010. — V. 37, № 14. — P. L14801.
36. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H. Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites // *Geophys. Res. Sp. Phys.* — 2017. — V. 122, № 1. — P. 948–962.

Цели и задачи работы

Цель работы: Исследование физико-химических процессов в атмосфере при инициации высотных разрядов и изучение глобального распределения спрайтов.

В работе решались следующие конкретные задачи:

1. Определение основных химических компонент и их начальных концентраций в интересующем диапазоне высот, необходимых для описания химического состава мезосферы в ночных и дневных условиях, определение списка химических и фотохимических реакций для описания возмущения химического баланса мезосферы, вызываемого высотным разрядом.
2. Создание программно-вычислительного комплекса для моделирования и анализа химико-физических процессов во время и после высотного разряда.
3. Исследование влияния спрайта и гало на химический состав мезосферы в самосогласованной радиально-симметричной плазмохимической модели с учетом изменения проводимости, обусловленного высотным разрядом, в дневных и ночных условиях.
4. Создание параметризации для распределения спрайтов по данным глобальной сети грозопеленгации WWLLN.
5. Изучение сезонного, зонального распределения положительных и отрицательных спрайтов, исследование чувствительности предложенной модели к начальным данным системы WWLLN и вариациям основных параметров.
6. Создание экспериментального стенда «Спрайт», предназначенного для моделирования протяженных разрядов в градиенте давления.
7. Исследование свойств и параметров разряда в перепаде давления, реализуемого в режиме импульсного напуска воздуха на стенде «Спрайт».

Основные результаты работы

1. Разработана аксиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель для спрайта на высотах 60-90 км в ночных условиях. Модельные расчеты показали, что при максимальном токе в молниевом канале 121,7 кА и максимальном ИДМ 720 Кл·км реализуются условия для инициации спрайта, приводящего к возмущению химического состава мезосферы (концентрация электронов возмущается до 198 см^{-3} , O_2^- до 135 см^{-3} , N_2^+ до 105 см^{-3} , O_2^+ до 255 см^{-3}) с радиальным размером до 40 км. Интенсивность излучения в $^1\text{PN}_2$ достигает $6,4 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и в $^2\text{PN}_2$ $1,35 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Время релаксации химического состава мезосферы от 10 с на 75 км до 10^3 с на 80-82 км.

2. Показана возможность инициации гало в дневных условиях на основе проведенного моделирования при ИДМ, равном 2750 Кл·км. Установлено, что характерная высота инициации разрядов определяется проводимостью атмосферы и смещена вниз на 20 км относительно ночных условий. Во время гало характерные поля 80-100 Тд формируются на высоте 56-64 км и радиусом 30 км, что приводит к быстрому прилипанию электронов к кислороду, падению проводимости на 2-4 порядка и излучению в $^1\text{PN}_2$ с интенсивностью до $3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, в $^2\text{PN}_2$ интенсивностью до $0,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

3. Проведено моделирование спрайта в дневных условиях при ИДМ 3750 Кл·км. Показано, что нормированное поле выше 128 Тд достигается на высотах 56-64 км и радиусом 20 км. Установлено, что развитие спрайта до формирования условий для лавинной ионизации в центральной части совпадает с развитием гало. Выяснено, что в пробойных полях концентрация электронов и O_2^- растет синхронно до 1400 см^{-3} и 1500 см^{-3} , что после вытеснения поля приводит к прилипанию электронов и росту концентрации O_2^- до 2800 см^{-3} к 4 мс на 62 км. Показано, что соотношение максимальных интенсивностей излучения в $^1\text{PN}_2/{}^2\text{PN}_2$ порядка 1,6 раза, при этом интенсивность в $^1\text{PN}_2$ достигает $8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

4. Установлено, что самосогласованный учет электрического поля во время развития спрайта, как в ночных, так и в дневных условиях, приводит к лавинообразному росту концентрации электронов, сопровождающимся возмущением проводимости и формированием тороидальной структуры разряда, когда электрическое поле вытесняется из центральной части спрайта, а на удалении от оси разряда свечение продолжается. При этом в отсутствии пробойных полей в периферийных частях спрайта разряд развивается как при гало.

5. Предложена параметризация для глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN за 2016 год. Установлено, что в среднем создаются условия для инициации 870 спрайтов в день (8 из них отрицательные), при этом наблюдается значительная сезонная изменчивость: от 625 в октябре до 1255 в мае.

6. Обнаружено, что количество спрайтов над сушей и океаном за год распределено неравномерно: с января по апрель количество разрядов примерно совпадает, а с мая по декабрь количество разрядов над океаном выше на 20% и более, что приводит к среднему распределению суша/океан 41,4/58,6% за 2016 год.

7. Создан экспериментальный стенд «Спрайт», предназначенный для лабораторного моделирования разряда в протяженном градиенте давления в режиме импульсного напуска рабочего газа. На стенде реализован перепад давления до 100 раз на межэлектродном промежутке около 80 см, при сохранении дозвукового режима распространения фронта давления воздуха.

8. На лабораторной установке получен разряд, который по параметрам подобия для приведенного электрического поля, концентрации электронов, плотности тока, размера филамент соответствует спрайту на высотах от 70 до 90 км. Таким образом, в эксперименте были воспроизведены одновременно переходная, стримерная и диффузная области высотного разряда.

Научная и практическая значимость диссертационной работы

В работе представлены результаты по трем взаимодополняющим направлениям исследований высотных разрядов, которые при использовании вместе могут дать существенно более полную информацию по разрядным процессам в атмосфере, нежели по отдельности. Впервые предложена радиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель высотного разряда, которая позволяет проанализировать особенности развития высотного разряда с учетом особенностей протекания тока в «родительском» тропосферном молниевом разряде и изменения проводимости, химического состава мезосферы во время развития высотного разряда с соответствующим изменением в динамике электрического поля. Предложена модель для расчета глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN, которая позволяет выделить региональные и сезонные особенности развития спрайтовой активности, что упростит планирование наблюдательных компаний за высотными разрядами. Моделирование на экспериментальном стенде «Спрайт» показало возможность инициации в лабораторных условиях разрядов в градиенте давления в импульсном режиме, которые по параметрам подобия в значительной мере повторяют высотные разряды, что в совокупности с разносторонней диагностикой позволит более глубоко разобраться в особенностях инициации и динамики развития спрайтов и других типов разрядов.

Степень обоснованности и достоверности результатов

Для решения задач, поставленных в рамках работы, применялось численное моделирование для проведения расчетов с использованием аксиально-симметричной самосогласованной плазмохимической модели, расчетов по глобальному распределению спрайтов и методы лабораторного исследования физических процессов, происходящих внутри вакуумной камеры при реализации разряда в градиенте давления. Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Достоверность получаемых результатов обеспечивается применением признанных методов и оригинальных подходов, взаимодополняющих друг друга. Результаты по теме диссертации опубликованы в рецензируемых российских и зарубежных научных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях, обсуждались на семинарах ИПФ РАН, ИФА РАН, РГГМУ, ИФЗ РАН.

Полнота изложения материалов диссертации

Основные результаты достаточно полно отражены в следующих публикациях:

- 1*. Mareev E.A., Evtushenko A.A., Yashunin S.A. On the modeling of sprites and sprite producing clouds in the global electric circuit // *Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharges*, NATO Science Series / Editors M. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft. Cluwer: Springer. — 2005. — P. 313-340.
- 2*. Evtushenko A.A., Mareev E.A. On the generation of charge layers in MCS stratiform regions // *Journal of Atmospheric research*. — 2008. — V. 91, № 2-4. — P. 272-280.
- 3*. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. О генерации слоев электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах // *Физика Атмосферы и Океана*. — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 242-252.
- 4*. Евтушенко А.А., Мареев Е.А. Моделирование возмущений состава мезосферы под действием высотных разрядов – спрайтов // *Известия ВУЗов – Радиофизика*. — 2011. — Т. 54, № 2. — С. 123-140.
- 5*. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А., Мареев Е.А. Об особенностях возмущения ионного состава, нейтральных компонент и оптических эмиссий в мезосфере под действием грозовых разрядов // *Физика Атмосферы и Океана*. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 1-11.
- 6*. Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Mareev E.A. A model of sprite influence on the chemical balance of mesosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2013. — V. 102 — P. 298-310.
- 7*. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Одномерная самосогласованная модель влияния спрайта/гало на химию мезосферы // *Изв. ВУЗов – Радиофизика*. — 2013. — Т. 56, № 11-12. — С. 947-967.

- 8*. Евтушенко А.А., Кутерин Ф.А. Самосогласованная модель ночного спрайта // Изв. ВУЗов – Радиофизика. — 2016. — Т. 59, № 12. — С. 1092–1102.
- 9*. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2011-2014 годах / Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. // Физика Атмосферы и Океана. — 2016. — Т. 52, № 2. — С. 175–186.
- 10*. Импульсный высоковольтный разряд в воздухе с градиентом давления / Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. // Физика Плазмы. — 2017. — Т. 43, № 10. — С. 1–8.
- 11*. Исследование нестационарного воздушного потока в большой вакуумной камере с помощью стандартного ионизационного манометра / Коробков С.В., Гуцин М.Е., Стриковский А.В., Лоскутов К.Н., Евтушенко А.А. // Журнал Технической Физики. — 2019. — Т. 89, № 1. — С. 35–41.
- 12*. Параметры плазмы крупномасштабного высоковольтного разряда в воздухе при пониженном давлении / Стриковский А.В., Коробков С.В., Гуцин М.Е., Евтушенко А.А., Зудин И.Ю. // Физика Плазмы. — 2019. — Т. 45, № 6. — С. 487–497.
- 13*. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2015–2018 гг / Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Шаталина М.В., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Свечникова Е.К., Слюняев Н.Н. // Физика Атмосферы и Океана. — 2019. — Т. 55, № 6. — С. 79–93.
- 14*. Моделирование высотных разрядов на большой плазменной установке / Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Стриковский А.В., Мареев Е.А. // Геомагнетизм и аэрномия. — 2020. — Т. 60, № 3. — С. 365–374.
- 15*. Evtushenko A.A., Kuterin F.A., Svechnikova E.K. Study of daytime high-altitude discharges using plasma-chemistry model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2021. — V. 221. — P. 105670.
- 16*. Evtushenko A.A., Ilin N.V., Svechnikova E.K. Parameterization and global distribution of sprites based on the WWLLN data // Atmospheric Research. — 2022. — V. 276. — P. 106272.
- 17*. Евтушенко А.А., Свечникова Е.К., Кудрявцев А.С. Анализ спрайтовой активности над территорией России по данным WWLLN за 2015-2021 годы // XXIX Международный Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы". — 2023. — 26-30 июня, г. Москва. — 4 стр.

Результаты выполненных исследований докладывались на семинарах в ИПФ РАН, РГГМУ, ИФА РАН, на международной конференции “Topical problems of nonlinear wave physics” (Нижегород, 2005, 2008, 2014, 2017, 2021), на ассамблее Международного союза геодезии и геофизики IUGG (Перуджа, 2007, Прага, 2015, Монреаль, 2019, Берлин, 2023), на всероссийской научной школе “Нелинейные волны” (Нижегород, 2006, 2008, 2010, 2012, 2016, 2018, 2020, 2022), на всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы и электрические процессы” (Москва, 2004, Нижегород, 2005, Нижегород, 2007, Шепси, 2015, Борок 2017, Борок 2020), на всероссийской конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы” (Звенигород, 2009, Борок, 2011), на всероссийской конференции “Глобальная электрическая цепь” (Борок, 2019, 2021), на международном симпозиуме “Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” (Москва, 2023), на международной конференции по атмосферному электричеству ICAE (Пекин, 2007, Рио-де-Жанейро, 2011, Оклахома, 2014, Нара, 2018, Тель-Авив, 2022), на ассамблее союза геомагнетизма и аэрномии “IAGA – 2009” (Сопрон, 2009), на международной конференции динамические дни в Европе “Dynamics Days Europe – 2010” (Бристоль, 2010), на летней школе грозные эффекты в атмосферно-ионосферной системе “TEA-IS” (Малага, 2012, Коллиур, 2014, Копенгаген, 2016), на международной конференции по математической геофизике международного союза по геодезии и геофизике (Нижегород, 2019), на четырнадцатой международной конференции “Физика плазмы в солнечной системе” (Москва, 2019), на 7 международной конференции “Frontiers of Nonlinear Physics - 2019”, (Нижегород, 2019), на всероссийской конференции по

атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2012), опубликованы в журналах «Известия РАН. Физика атмосферы и океана» (4 статьи), «Известия Вузов. Радиофизика» (2 статьи), Journal of Atmospheric research (2 статьи), Journal of Atmospheric and Terrestrial physics (2 статьи), «Геомagnetизм и аэрономия» (1 статья), «Физика плазмы» (2 статьи), «Журнал технической физики» (1 статья), в сборнике Sprites, Elves and Intensive Lightning Discharge (1 статья).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Развитая радиально-симметричная самосогласованная плазмохимическая модель спрайта позволяет связать процессы переноса заряда в молниевом разряде облако-земля в тропосфере с разрядными явлениями в мезосфере в дневных и ночных условиях, сопровождающимися возмущением химического баланса и проводимости. Уменьшение проводимости на начальной стадии разряда способствует инициации спрайта, а последующее увеличение приводит к вытеснению электрического поля и формированию торообразной структуры разряда.

2. Развитие спрайта в ночных условиях при ИДМ=720 Кл·км приводит к увеличению концентрации заряженных частиц до 2 порядков и интенсивному излучению в первой и второй положительных полосах молекулярного азота.

3. Время релаксации возмущения концентрации электронов после ночного спрайта изменяется с высотой от нескольких секунд на 75 км до 1000 с на 82 км, а радиус возмущения концентрации электронов растет с 10 км на высоте 75 км до 40 км на 79 км.

4. Инициация спрайта/гало в дневных условиях возможна при ИДМ 3750/2750 Кл·км. Характерная высота инициации разрядов определяется проводимостью атмосферы и смещена вниз на 20 км относительно ночных условий.

5. Развитая модель для расчета глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN позволяет получить региональное и сезонное распределение разрядов с существенно более высоким разрешением, чем с использованием спутниковых и других видов наблюдений.

6. Среднее количество спрайтов, рассчитанных по данным WWLLN, составляет 870 разрядов в день, из них 0,93% отрицательных, при этом наблюдается значительная сезонная изменчивость от 625 в октябре до 1255 в мае.

7. Рассчитанное по предложенной модели количество спрайтов над сушей и океаном в 2016 году распределено неравномерно: с января по апрель примерно совпадает, а с мая по декабрь количество разрядов над океаном выше на 20% и более, что приводит к среднему за год распределению суша/океан 41,4/58,6%.

8. Экспериментальный стенд «Спрайт» в режиме импульсного напуска воздуха позволяет реализовать перепад давления до 100 раз на межэлектродном промежутке 80 см при сохранении дозвукового режима распространения фронта давления.

9. Полученный в результате лабораторного моделирования разряд в градиенте давления по параметрам подобия для приведенного электрического поля, концентрации электронов, плотности тока, размера филамент соответствует спрайту.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. По теме диссертации опубликовано 17 основных публикаций (15 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, см. список работ автора в конце диссертации) из них в 11 автор диссертации является первым автором, что подчеркивает его определяющий вклад в эти работы.

Создание аксиально-симметричной самосогласованной плазмохимической модели для описания влияния высотных разрядов на химический баланс атмосферы проводилось совместно с Ф.А. Кутериным. Идея исследования предложена Е.А. Мареевым. Постановка задачи, выбор системы химических реакций и начальных условий, анализ результатов, сравнение с экспериментальными данными были проведены автором. Непосредственное написание программного кода проведено Ф.А. Кутериным. В анализ результатов и написание статей внесла вклад Е.К. Свечникова

Разработка модели для описания глобального распределения спрайтов по данным сети грозопеленгации WWLLN была проведена совместно с Н.В. Ильиным и Е.К. Свечниковой. Идея параметризации предложена автором. Расчеты проведены Н.В. Ильиным. Анализ результатов моделирования сделан автором. Написание статей проведено совместно с Е.К. Свечниковой.

Экспериментальное исследование высотных разрядов на стенде «Спрайт» было проведено совместно с М.Е. Гуциным, А.В. Стриковским, С.В. Коробковым, И.Ю. Зудиным, К.Н. Лоскутовым, В.И. Гундориным, А.В. Костровым. Идея создания экспериментального стенда предложена Е.А. Мареевым и автором. Автор непосредственно принимал участие в исследовании на всех его стадиях: первоначальном монтаже установки, проведении экспериментов, анализе результатов и написании статей.

Научная характеристика соискателя

Диссертационная работа «Исследование условий инициации, особенностей развития и глобального распределения высотных разрядов в атмосфере» выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук». В период подготовки диссертации соискатель Евтушенко Андрей Александрович работал в ИПФ РАН в Отделе геофизической электродинамики в должности заместителя заведующего отделом. В 2005 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по направлению «Радиофизика». В 2013 году присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по направлению 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы в диссертационном совете Д 002.069.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной физики Российской академии наук. Научная деятельность А.А. Евтушенко посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию физико-химических процессов, протекающих во время высотных разрядов в земной атмосфере. Материалы диссертации А.А. Евтушенко опубликованы в ведущих рецензируемых журналах по направлению исследований, неоднократно представлялись на конференциях и получили признание научной общественности. Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках многочисленных грантов РФФИ, РНФ, Минобрнауки, Федеральных целевых программ РФ, Программ фундаментальных исследований ОФН РАН и Президиума РАН, выполненных, в том числе под руководством автора диссертации.

Рекомендации диссертации к защите

Диссертационная работа А.А. Евтушенко удовлетворяет всем современным требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук.

Исходя из вышеизложенного, совместное заседание семинара Отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики рекомендует диссертацию А.А. Евтушенко «Исследование условий инициации, особенностей развития и глобального распределения высотных разрядов в атмосфере» к защите на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.6.18 – науки об атмосфере и климате и ходатайствует о принятии её к защите в диссертационном совете ДС 24.2.365.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете (РГГМУ).

В качестве официальных оппонентов рекомендуются: доктор географических наук Трошичев Олег Александрович (Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»), доктор физико-математических наук Миронова Ирина Александровна (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»), доктор физико-математических наук Пулинец Сергей Александрович (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт космических исследований Российской академии наук»). Рекомендуемая ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук».

Председатель семинара,
академик РАН, д.ф.-м.н.

Е.А. Мареев

Секретарь семинара, к.ф.-м.н.

М.В. Шаталина

9 июня 2023 г.