

Лабораторное моделирование влияния вулканического вещества на формирование транзитных явлений вблизи границы средней и нижней атмосферы

Э.А. Соснин^{1, 2}, В.С. Кузнецов¹, В.А. Панарин¹,
В.С. Скакун¹, В.Ф. Тарасенко^{1, 2*}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск пр. Академический, 2/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 13.11.2019 г.

Показано, что разогрев вулканического материала, взятого на вулкане Этна (Италия), апокамписким разрядом уменьшает напряжение, при котором от канала разряда стартует положительный стример — апокамп, и увеличивает скорость его распространения. По спектрам люминесценции видно, что эти процессы сопровождаются эмиссией легкоионизируемых К и Na, что согласуется с данными об элементном составе образцов Этны. На основе полученной информации предложена гипотеза о том, что в местах повышенной вулканической активности на высотах 10–18 км (на уровне тропосферы) вероятность появления голубых струй и стартеров повышается.

Ключевые слова: апокампиский разряд, вулканическое вещество, голубая струя, транзитные световые явления; apokampic discharge, volcanic matter, blue stream, transient light phenomena.

Введение

Транзитные световые явления (в англ. научной литературе — *transient luminous events*), или транзиты, — различные крупномасштабные светящиеся структуры, наблюдаемые в условиях повышенной электрической активности, характерной для гроз, штормов и ураганов в средней и верхней атмосфере Земли. К транзитам средней атмосферы относят голубые струи, стартеры и красные спрайты. Голубые струи представляют собой «фонтаны» голубого и/или синего свечения, бьющего вверх с вершины грозового облака. Они возникают на средних высотах 12–18 км, достигают высот 40–45 км, распространяются в вертикальном направлении со скоростью 100–150 км/с и существуют 60–400 мс [1–4].

Транзиты изучают, осуществляя наблюдения с поверхности Земли, с самолетов и из космоса, а также в экспериментах с лабораторными разрядами и с помощью теоретических моделей. Важно, что результаты лабораторных экспериментов можно сравнить с результатами натуральных наблюдений и сформулировать новые гипотезы о развитии транзитов, а их впоследствии учесть в теоретическом моделировании.

* Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Владимир Сергеевич Кузнецов (Robert_smith_93@mail.ru); Виктор Александрович Панарин (Panarin@yandex.ru); Виктор Семенович Скакун (Skakun54@bk.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

В последнее время в лабораторных исследованиях транзитов средней атмосферы используют стримерные разряды [5–7]. Вводя в эксперимент тот или иной физический фактор, присутствующий в реальной атмосфере, можно постепенно уточнять наши представления о механизмах развития транзитов. В настоящей работе мы предложили ввести в стримерный разряд вулканическое вещество и определить его влияние на инициирование и продвижение положительного стримера в условиях, по давлению воздуха близких к условиям инициирования голубых струй и стартеров в природе. При этом для получения стримера был использован апокампиский разряд [8–14]. Он образуется в воздухе в открытом пространстве и имеет форму протяженной светящейся структуры (апокампа), ориентированной перпендикулярно месту изгиба канала высоковольтного импульсно-периодического разряда.

Выбор апокампиского разряда обусловлен тем, что между ним и транзитами средней атмосферы (голубыми струями и стартерами) существует шесть признаков сходства. В частности, и апокамп, и голубые струи обладают сходными по диапазону ($\lambda \approx 280\text{--}800$ нм) и структуре максимумов спектрами люминесценции [12]; формируются только при положительной полярности напряжения; имеют сходную морфологию [13]. Самые длинные апокампы голубого цвета в экспериментах наблюдаются в диапазоне давлений 90–150 торр, примерно соответствующем высотам возникновения

и распространения голубых стартеров и струй (12–18 км). Кроме того, усредненные значения скоростей распространения стримерной части апокампа (180 км/с) по порядку величины совпадают со скоростями распространения голубых струй в атмосфере Земли [8, 9, 11, 13, 15].

Экспериментальная установка и методики исследований

Апокампы формировались в цилиндрической кварцевой колбе 1 внутренним диаметром 5,1 см и длиной 121 см на установке, показанной на рис. 1. В колбе размещали стальные электроды 2 и 3 ($d = 10$ мм), имеющие одинаковую форму: с углом вершины 15° и радиусом кривизны острия 70 мкм. Давление воздуха в колбе 1 в ходе экспериментов можно было регулировать в диапазоне от 760 до 0,1 торр. Электрод 3 имел емкостную развязку ($C_1 = 5$ пФ) с землей. На электрод 2 подавали импульсы напряжения положительной полярности от источника 4, который обеспечивал импульсы с амплитудой $U_p < 15$ кВ, частотой следования $3 < f < 58$ кГц и длительностью $\tau = 1,5$ мкс.

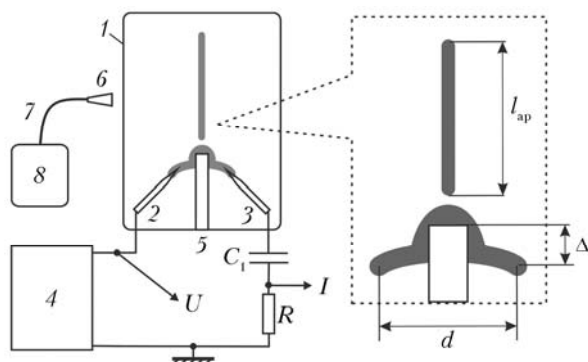


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрическая кварцевая колба; 2 – высоковольтный электрод положительной полярности; 3 – электрод, имеющий емкостную развязку с землей; 4 – генератор импульсов напряжения; 5 – диэлектрическая пластинка; 6 – коллиimator; 7 – оптоволоконный световод; 8 – спектрофотометр

Между электродами была установлена пластинка 5 толщиной 5 мм, выступающая над электродами ($\Delta = 5$ мм), изготовленная из куска лавы, взятой в воронке вулкана Этна (Сицилия, Италия) в 2015 г. Использованные образцы лавы были диэлектриками в нормальных условиях и сохраняли диэлектрические свойства при подогреве. В ряде опытов для сравнения применялась аналогичная по геометрии и расположению пластинка, выполненная из кварца КУ-1.

С помощью делителя напряжения (на рис. 1 не показан) и токового шунта R осуществляли контроль напряжения U и тока I в цепи разряда.

Для регистрации спектра излучения использовали сборку из коллимирующей линзы 6 с фокусным расстоянием 30 мм, оптоволоконна 7 с известным спектром пропускания и спектрометра 8 HR2000+ES

(Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной ПЗС-линейки Sony ILX511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции $\sim 1,33$ нм). Фотографировали апокамп в различных условиях фотоаппаратом Canon PowerShot SX60 HS в режиме покадровой съемки либо в режиме с накоплением импульсов вплоть до 5 с.

Установка работает следующим образом. Импульсы напряжения от генератора 4 подаются на высоковольтный электрод 2. При амплитуде импульсов напряжения несколько кВ и снижении давления воздуха в камере 4 происходит пробой разрядного промежутка между острыми электродами 2 и 3. Разряд огибает пластинку 5, вызывает ее разогрев и высвобождение содержащихся в ней легкоплавких веществ. При этом цвет свечения разряда изменяется. С увеличением напряжения на электроде 2 импульсный разряд переходит в апокампиский. От места изгиба канала разряда в каждом из импульсов стартуют стримеры, которые приводят к формированию апокампа длиной $l_{ар}$. Апокамп, как уже упоминалось, образуется на месте изгиба канала разряда на краю пластинки 5. В эксперименте фиксировались электрофизические параметры, при которых возникает апокамп: спектр излучения, длина и внешний вид разряда.

Результаты и обсуждение

При высоких давлениях воздуха в камере пластинка между электродами препятствует пробое разрядного промежутка даже при напряжении 15 кВ. Снижая давление воздуха (при фиксированном напряжении), можно получить пробой промежутка и зажигание обычного импульсного разряда. Если после этого увеличить напряжение на электроде 2, то разряд становится апокамписким. На рис. 2 показан внешний вид апокампиского разряда, полученный при давлении 480 торр и амплитуде импульсов напряжения $U_p = 8,9$ кВ.

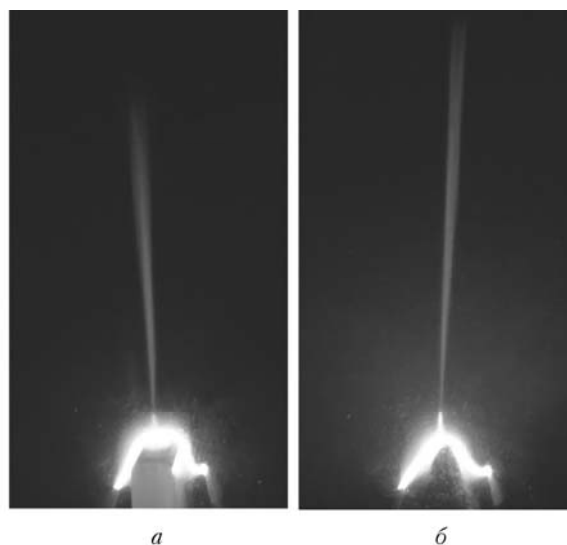


Рис. 2. Внешний вид апокампиского разряда, ограниченного пластинкой: а – из кварца; б – вулканического материала; высота кадра 6,2 см, выдержка $1/8$ с

В случае кварцевой пластинки длина апокампа составляет 3,6 см, а в случае пластинки из лавы — 5 см (выше на 28%). Дисперсия величины $l_{ар}$ в этом опыте составила 5%, т.е. отличия являются значимыми. Кроме того, выяснилось, что для перехода от импульсного разряда к апокампическому в случае кварцевой пластинки необходимы амплитуды напряжения на 0,5–1,5 кВ выше, чем в случае пластинки из лавы (на рис. 3 значения U_p одинаковы, что сделано для сравнения величин $l_{ар}$ в одинаковых условиях). Аналогичные отличия имеют место при зажигании апокампического разряда при меньших давлениях воздуха (вплоть до 130 торр), примерно соответствующих высотам возникновения голубых струй в природе.

На рис. 3 представлен спектр излучения в середине апокампа при давлении воздуха 485 торр. В момент зажигания он содержит только полосы молекулярного азота ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) и его иона ($B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$). Известно, что для получения $N_2^+(B^2\Sigma_u^+)$ необходимы средние энергии электронов в несколько эВ [16]. Этой энергии будет достаточно для ионизации некоторых веществ в области разряда. Такие вещества может поставлять разогретая лавовая пластинка, помещенная в разряд.

Известно, что химический состав лавы и пепла вулкана Этны характеризуется пониженным (по сравнению с порфиоровыми трахибазальтами) содержанием групп CaO, MgO, общим количеством Fe и увеличенной долей SiO₂, K₂O, Na₂O и часто Al₂O₃ [17]. Рентгенофлуоресцентный анализ пепла Этны после последних пепловых извержений, проведенный в 2017 г. [18], выявил достаточно высокую среднюю долю оксидов Na₂O и K₂O в образцах (~3,8 и 1,9% соответственно). Потенциалы ионизации Na (5,14 эВ) и K (4,34 эВ) — самые низкие по сравнению с другими элементами, входящими в состав пепловых оксидов (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO). С учетом этого ожидаемым результатом эксперимента было появление в спектре апокампа и быстрое увеличение интенсивности

линий (за несколько секунд после зажигания апокампического разряда) Na I (588,9 нм), K I (766,4; 769,8 нм). То есть указанная эмиссия обусловлена разогревом лавовой пластинки и выделением легко ионизируемых элементов, входящих в ее состав. Замена лавовой пластинки на кварцевую убирает из спектра обозначенные линии. Кроме того, при установке лавовой пластинки в спектре наблюдаются низкоинтенсивные линии O I (771,1; 777,4; 777,5 нм).

Из проведенных измерений следует, что наличие в зоне разряда вулканического материала и выделение из него легкоионизируемых элементов: 1) уменьшает напряжение, при котором от канала разряда стартует положительный стример — апокамп; 2) увеличивает скорость распространения разряда, поскольку увеличивается длина апокампа.

Обсудим вопрос о возможном влиянии вулканической активности на появление голубых струй в природе. Две трети вулканов находятся в Северном полушарии и ~85% из них расположены севернее 10° ю.ш. До уровня тропосферы и выше выбрасывают пепел только вулканы, имеющие индекс вулканической активности VEI > 3 [19]. Между 20° с.ш. и 10° ю.ш. находится большое скопление вулканов, известных своими плининскими извержениями (VEI = 5), что означает периодический выброс огромного количества газов и пепла в атмосферу вблизи экватора [20]. При этом высота, на которую поднимается пепел, составляет от 11 км до 45 км. В сухих газопепловых облаках над вулканами отмечается самая высокая для атмосферных процессов интенсивность разделения электрических зарядов, связанная прежде всего с тем, что в области пеплового столба вверх поднимаются положительно заряженные сгущенные вулканические газы, а падающие частицы золы заряжены отрицательно. В результате при таких извержениях регистрируются как частые крупные молнии «воздух — земля» (так называемые грязные молнии), так и более частые мелкие разряды, а также коронные разряды;

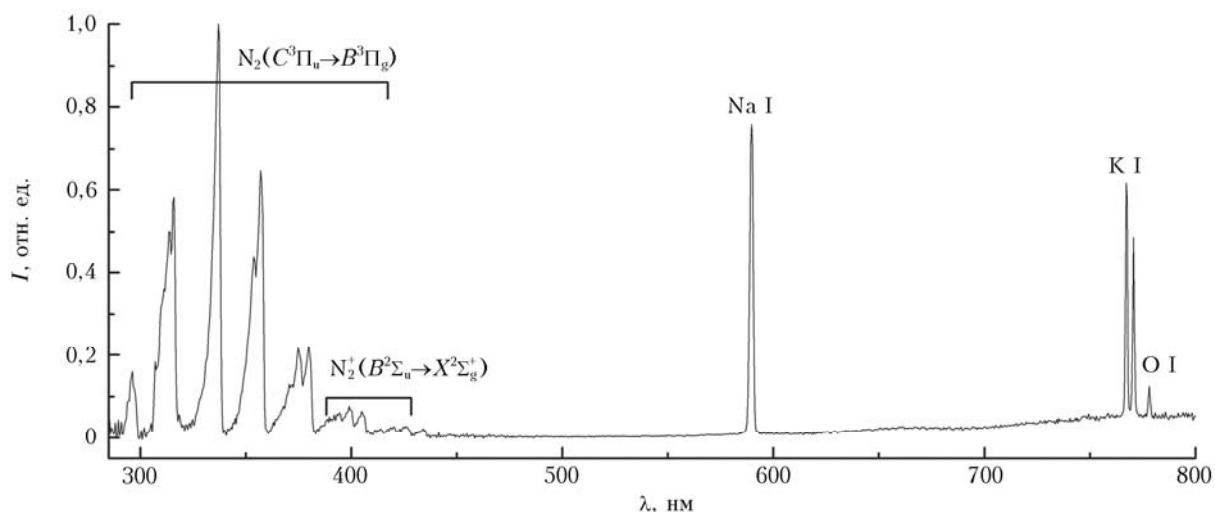


Рис. 3. Спектр излучения апокампа в случае пластинки из лавы; $U_p = 9$ кВ, $p = 485$ торр

верхняя часть пеплового облака на стадии формирования имеет избыточный положительный заряд. В условиях нашего опыта апокампы стартуют от положительно заряженного канала импульсного разряда.

Известно, что голубые струи и стартеры возникают только над очень активными грозовыми облаками с частотой следования молний до нескольких вспышек в секунду. Старт голубых струй в природе происходит от заряженных зон после того, как внутри них или между ними и землей происходят разряды [21]. Поэтому электрические условия в вулканическом столбе можно рассматривать как способствующие развитию голубых струй и стартеров. Кроме того, как показал наш эксперимент, важен и состав пепла в облаке: легкоионизируемые компоненты пепла, попадая на высоты 12–18 км, могут облегчать как старт, так и распространение положительных стримеров. Следует отметить, что соединения, содержащие легкоионизируемые металлы, характеризуют не только выбросы вулкана Этна и встречаются повсеместно [22–24].

Таким образом, на основании проведенных экспериментов и анализа литературы можно сформулировать следующую гипотезу: вероятность появления голубых струй и стартеров увеличивается в местах повышенной вулканической активности на высотах 10–18 км (за границей тропосферы), что связано с наличием легкоионизируемых добавок в составе вулканических выбросов.

В дальнейшем, чтобы подтвердить или опровергнуть этот тезис, необходимо провести масштабные наблюдения голубых струй и стартеров в зонах с индексом вулканической активности $VEI > 3$. Пока этому мешает недостаточная чувствительность применяемой на спутниках спектральной аппаратуры. Например, бортовая система спутника FORMOSAT-2 фиксирует масштабные транзиенты — эльфы, спрайты и гигантские голубые струи, но не фиксирует голубые струи и стартеры. Но даже для указанных транзиентов, принимая во внимание чувствительность инструментального обнаружения и ограниченную область обзора, количество транзиентов оказывается заниженным в 2–10 раз [25].

С другой стороны, можно провести новые исследования, зажигая апокампиский разряд в воздухе в диапазоне давлений, отвечающем диапазону высот появления голубых струй в природе, в присутствии вулканического вещества, и изучить влияние дополнительных факторов, например температуры воздуха. Повышение температуры пепловых частиц до ~1200 К может запустить механизм термоэмиссии электронов с их поверхности. Понять, как это повлияет на формирование апокампа, можно будет непосредственно в лабораторных условиях.

Заключение

Традиционно считается, что выбросы вулканического пепла оказывают существенное влияние на разделение зарядов в атмосфере над вулканом,

иницируя так называемые грязные молнии. В настоящей работе исследовано возможное влияние вулканического материала на формирование таких транзиентов средней атмосферы, как голубые струи и стартеры. Для этого использован лабораторный аналог голубых струй — апокампиский разряд [10, 14]. С его помощью показано, что разогрев апокамписким разрядом вулканического материала уменьшает напряжение, при котором от канала разряда стартует апокамп, и увеличивает скорость его распространения. Этот эффект имеет место только при наличии в зоне разряда пластинки из вулканического материала и связан с выделением легкоионизируемых элементов, входящих в ее состав. Мы предполагаем, что на вершинах пепловых облаков или штормовых облаков, содержащих пепловый материал, формирование голубых стартеров облегчается. Для проверки этой гипотезы необходимо проведение дополнительных лабораторных экспериментов, а также новая серия натурных наблюдений за развитием электрических процессов вблизи границы средней и нижней атмосферы.

Авторы благодарят за помощь в работе Д.С. Печеницина. Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № 13.1.4 и гранта РФФИ № 19-32-90023.

1. *Mishin E.V., Milikh G.M.* Blue jets: Upward lightning // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137, N 4. P. 473–488.
2. *Singh D., Singh R.P., Kumar S., Dharmaraj T., Singh A.K., Patil M.N., Singh Sh.* Lightning and middle atmospheric discharges in the atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015. V. 134, N 11. P. 78–101.
3. *Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Нагорский П.М., Самохвалов И.В.* Электрооптические явления в атмосфере: учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2015. 316 с.
4. *Бекряев В.И.* Молнии, спрайты и джеты. СПб.: Изд-во РГМУ, 2009. 96 с.
5. *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, N 1. P. 016407.
6. *Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В.* Импульсный высоковольтный разряд в воздухе с градиентом давления // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43, № 10. С. 866–873.
7. *Opaitis D.F., Shneider M.N., Howard P.J., Miles R.B., Milikh G.M.* Study of streamers in gradient density air: Table top modeling of red sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37, N 14. L14801.
8. *Sosnin E.A., Naidis G.V., Tarasenko V.S., Skakun V.S., Panarin V.A., Babaeva N.A., Baksht E.Kh., Kuznetsov V.S.* Apokamps produced by repetitive discharges in air // *Phys. Plasm.* 2018. V. 25, N 8. P. 083513.
9. *Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Baksht E.Kh., Tarasenko V.F.* Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets // *Eur. Phys. J. D.* 2017. V. 71, N 2. P. 25.
10. *Соснин Э.А., Найдис Г.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С., Панарин В.А., Бабаева Н.Ю.* О физической природе апокампиского разряда // *ЖЭТФ.* 2017. Т. 152, № 5. С. 1081–1087.
11. *Соснин Э.А., Панарин А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* Моделирование голубых струй и спрайтов с помощью апокампа, формируемого при пониженных

- давлениях воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 10. С. 855–858.
12. *Соснин Э.А., Найдис Г.В., Тарасенко В.Ф., Бабаева Н.Ю., Панарин В.А., Скакун В.С.* Соотношение интенсивностей полос 2Р и 1Р молекулярного азота в условиях апокампического разряда при различных давлениях воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 794–797.
 13. *Соснин Э.А., Бакшт Е.Х., Кузнецов В.С., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* Лабораторное моделирование голубых струй с помощью апокампического разряда в герцовом диапазоне частот // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 585–590; *Sosnin E.A., Baksh E.Kh., Kuznetsov V.S., Panarin V.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F.* Laboratory simulation of blue jets with apokampic discharge in the Hz frequency range // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 6. P. 710–715.
 14. *Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Ситников А.Г., Коковин А.О., Кузнецов В.С.* Апокампический разряд: условия образования и механизмы формирования // *Изв. вузов. Физика.* 2019. Т. 62, № 7. С. 182–189.
 15. *Панарин В.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 3. С. 243–252.
 16. *Kozlov K., Wagner H., Brandenburg R., Michel P.J.* Spatio-temporally resolved spectroscopic diagnostics of the barrier discharge in air at atmospheric pressure // *J. Phys. D.* 2001. V. 34, № 21. P. 3164–3176.
 17. *Tanguy J.C.* Contributions to mineralogy and petrology tholeiitic basalt magmatism of Mount Etna and its relations with the alkaline series // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1978. V. 66, № 1. P. 51–67.
 18. *Horwell C.J., Sargent P., Andronic D., Lo Castro M.D., Tomatis M., Hillman S.E., Michnowicz S.A.K., Fubini B.* The iron-catalysed surface reactivity and health-pertinent physical characteristics of explosive volcanic ash from Mt. Etna, Italy // *J. Appl. Volcanology.* 2017. V. 6, № 1. 16 p.
 19. *Newhall C.A., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of the explosive magnitude for historical volcanism // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87, iss. C2. P. 1231–1238.
 20. *Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ.* Doc. 9691 AN/954. Изд. 2. Международная организация гражданской авиации, 2007. 202 с.
 21. *Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Sten-del M., Singh R., Siingh D.* Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, N 1. P. 496–503.
 22. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism.* Geophysical Monograph / eds. J.J. Mahoney, M.F. Coffin. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1997. 438 p.
 23. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds.* Doc 9691 AN/954. International Civil Aviation Organization, 2007. 162 p.
 24. *Akiko Goto A., Horie T., Ohba T., Fujimaki H.* XRF analysis of major and trace elements for wide compositional ranges from silicate rocks to carbonate rocks using low dilution glass beads // *Japan. Magaz. Mineralog. Petrolog. Sci.* 2008. V. 31, N 3. P. 162–173.
 25. *Chen A.B., Kuo Ch.-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.-Sh., Liu T.-Y., Lee L.-Ch.* Global distributions and occurrence rates of transient luminous events // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N A08. P. A08306.

E.A. Sosnin, V.S. Kuznetsov, V.A. Panarin, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko. **Laboratory modeling of the influence of volcanic matter on the formation of transient phenomena near the boundary between the middle and lower atmosphere.**

It was shown that heating of the volcanic material taken on the Etna volcano (Italy) by apokampic discharge reduces the voltage at which a positive streamer, the apokamp, starts from the discharge channel and increases its propagation speed. The luminescence spectra show that these processes are accompanied by the emission of easily ionizable K and Na, which is consistent with data on the elemental composition of Etna samples. Based on the data obtained, a hypothesis is proposed that in places of increased volcanic activity at altitudes of 10–18 km (at the level of the troposphere), the appearance probability of blue jets and starters increases.