

Мини стартеры и мини голубые струи в воздухе и азоте при импульсно-периодическом разряде в лабораторном эксперименте

Э. А. Соснин^{+*1)}, Е. Х. Бакшт⁺, В. А. Панарин⁺, В. С. Скакун⁺, В. Ф. Тарасенко^{++*}

⁺Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Томск, Россия

^{*}Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634055 Томск, Россия

Поступила в редакцию 17 апреля 2017 г.

В воздухе и азоте при давлении в десятки-сотни Торр сформированы и исследованы миниатюрные аналоги стартеров и голубых струй, наблюдаемых в верхних слоях атмосферы Земли и имеющих размеры в десятки километров. Мини стартеры и мини голубые струи получены в лабораторных экспериментах благодаря применению импульсно-периодического разряда с плазменной струей – апокампом. При различных давлениях измерены скорости распространения апокампов и установлено, что их средние значения по порядку величины совпадают со скоростями распространения стартеров и голубых струй в атмосфере Земли. Показано, что струи (апокампы) с наибольшей длиной наблюдаются в диапазоне давлений, соответствующем высотам возникновения и распространения стартеров и голубых струй.

DOI: 10.7868/S0370274X17100046

1. Любой вид электрического разряда в газах формируется в характерных для него условиях газовой среды (состав, давление газов, наличие примесей и т.д.) и возбуждения (различные параметры импульсов напряжения и тока, материал и геометрия электродов и пр.). Варьируя параметры импульса возбуждения можно перейти от коронного разряда к тлеющему и от тлеющего к искровому соответственно, при этом параметры плазмы разряда изменяются.

Изучению атмосферных разрядов уделялось и уделяется очень большое внимание [1–12]. С 1994 г. физика атмосферы пополнилась новыми объектами для изучения: были обнаружены длинные и сравнительно короткоживущие светящиеся структуры, формирующиеся с верхней границы грозových облаков на высоте 17.7 ± 0.9 км, достигающие высот от 18.1 до 25.7 км и распространяющиеся со скоростью от 27 до 153 км/с [1]. Они были названы голубыми стартерами (от англ. “blue starters”).

Тогда же номенклатура электрооптических явлений в атмосфере пополнилась феноменом голубых струй (от англ. “blue jets”), возникающих на средних стартовых высотах 17.7 км, достигающих высот 37.2 ± 5.3 км и имеющих скорость распространения в вертикальном направлении 112 ± 24 км/с. Наблюдаемое время жизни для голубых струй составляет 200–300 мс, а угол раствора конуса свечения состав-

ляет примерно 14° [2]. Больше данных об этих явлениях можно найти в обзорах [3, 4].

Для объяснения физической природы стартеров и голубых струй были предложены различные теоретические модели [5–12], в которых эти явления развиваются над грозovým облаком и рассматриваются как положительный или отрицательный стример [8, 9], как стримерная корона, аналогичная той, что формируется перед ступенчатым лидером, но гораздо больших размеров в силу низкой плотности газовой среды [10], как “стримерное дерево”, в котором яркий канал порождает множество стримерных ветвей [11]. Однако без непосредственных измерений физических параметров указанных феноменов говорить о достоверности результатов теоретического моделирования сложно. Из-за огромных размеров атмосферных разрядов, которые составляют десятки-сотни километров, их экспериментальное исследование в лабораторных условиях сильно затруднено. Можно отметить лишь ряд работ, в которых природе электрооптических явлений в атмосфере стали изучать, измеряя параметры лабораторных разрядов [12, 15–18], главным образом – импульсного искрового разряда в условиях, близких к условиям в нижних слоях атмосферы.

С другой стороны, наблюдения с международной космической станции позволили получить уникальные фотографии, показывающие развитие голубых струй, стартующих из областей грозовой активности [19]. Сравнение этих фотографий голубых струй, и

¹⁾e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

мини голубых струй – апокампов [20–24], полученных в лабораторных условиях, показывает их удивительное внешнее сходство. Хотя размеры природных голубых струй и наблюдаемых в лаборатории отличались на несколько порядков.

Апокампы были обнаружены нами при исследовании высоковольтного импульсно-периодического разряда, осуществляемого в воздухе при нормальных условиях между острыми электродами, находящимися под плавающим потенциалом относительно земли. В месте изгиба (естественного или принудительного) канала разряда формировались плазменные струи, которые было предложено назвать апокампом (от греческого $\alpha\lambda\acute{o}$ “от” и $\kappa\alpha\mu\pi\eta$ “изгиб”) [22, 23].

Высокоскоростная съемка феномена выявила, что вначале между электродами зажигается искровой разряд, далее он расширяется и переходит в диффузный. Затем в месте усиления электрического поля (место изгиба канала разряда) возникает короткий плазменный отросток. Этот отросток служит источником апокампа – плазменных “пуль”, представляющих собой светящиеся следы распространения волн ионизации, скорость движения которых составляет примерно 200 км/с [22, 24]. Визуально “пули” наблюдаются как узкая светящаяся струя голубого цвета, интенсивность свечения которой в видимой области спектра много меньше интенсивности свечения отростка. В работах [21, 23] данное явление было исследовано при уменьшении давления различных газов и было показано, что в условиях низких давлений:

(i) Апокамп формируется только при положительной полярности напряжения при величинах напряженности электрического поля порядка 1 кВ/см, сопоставимых с электрическими полями в верхних слоях атмосферы Земли.

(ii) Спектры излучения апокампа близки к спектрам голубых струй как наблюдаемым, так и рассчитанным теоретически (см., например, [15]). Наибольшую интенсивность имеют полосы $N_2(C^3\Pi_u - B^3\Pi_g)$, $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$ и $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$. По мере уменьшения давления интенсивность всех вышеперечисленных полос увеличивается: за счет $N_2^+(B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+)$ полосы увеличивается вклад в голубой и синей частях спектра, а за счет $N_2(B^3\Pi_g - A^3\Pi_u)$ – красной и оранжевой, что наблюдается визуально.

В настоящей работе получены доказательства сходства между режимом разряда с апокампом и феноменом голубых струй и стартеров. Для этого было детально изучено влияние давления воздуха и азота на длину апокампа и определена скорость распро-

странения волн ионизации в апокампе при пониженных давлениях.

2. Экспериментальная установка показана рис. 1. Чтобы сформировать плазменную струю 1 исполь-

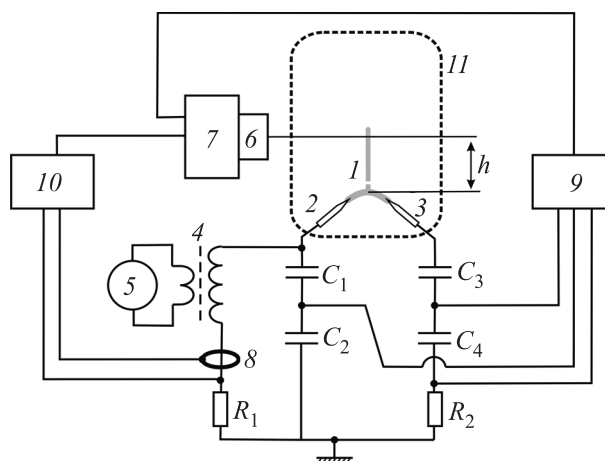


Рис. 1. Блок-схема установки для изучения морфологии импульсного разряда в режиме с апокампом: 1 – плазменная струя; 2, 3 – электроды; 4 – повышающий трансформатор; 5 – импульсный источник напряжения; 6 – коллиматор; 7 – высокоскоростная камера; 8 – пояс Роговского; 9 – осциллограф; 10 – преобразователь; 11 – кварцевая колба. $C_1 = 1.65$ пФ, $C_2 = 1.68$ нФ, $C_3 = 1.65$ пФ, $C_4 = 1.75$ нФ, $R_1 = 3.62$ Ом, $R_2 = 0.98$

зовали импульсно-периодический разряд, между цилиндрическими стальными электродами 2 и 3, имеющими диаметр ~ 1.8 мм и образующими промежуток $d = 9$ мм. Концы электродов были заостренными, а угол между ними составлял 120° . Электрод 2 соединяли с вторичной обмоткой импульсного трансформатора 4 генератора высоковольтных импульсов 5. Генератор формировал импульсы напряжения положительной или отрицательной полярности с частотой следования f до 50 кГц, длительностью импульса на полувысоте $\tau_{1/2} \sim 1.5$ мкс, амплитудой $U_a < 13$ кВ и фронтом импульса ~ 0.8 мкс. В воздухе при нормальных условиях при амплитуде импульса напряжения ~ 7 кВ на электроде 2 зажигался коронный разряд, но промежуток между электродами не пробивался. Оба электрода имели емкостную развязку с землей. С увеличением U_a вначале образуется разрядный канал, а затем появляются отросток и апокамп, длиной l_s и l_a соответственно. Максимальный ток разряда увеличивался с ростом U_a и при $U_a = 11$ кВ и атмосферном давлении воздуха составлял ~ 0.2 мА. Уменьшение давления воздуха и азота до десятков Торр приводило к двукратному увеличению амплитуды тока. Регистрировали динамику рас-

пространения развития апокампа четырехканальной высокоскоростной камеры 7 HSFC-PRO (PCO AG) с минимальной длительностью одного кадра 3 нс. Изображение формировали с помощью коллиматора с фокусным расстоянием 70 мм. Запуск камеры осуществляли в различные моменты времени с момента развития разряда, регулируя задержку преобразователем 10 BNC 565 (Berkeley Nucleonics Corp.) с привязкой к временному ходу тока и напряжения, регистрируемых четырехканальным осциллографом 9 TDS 3034 (Tektronics, Inc.). Камеру располагали так, чтобы центр поля ее регистрации находился на различных высотах h над разрядным каналом.

Для исследования морфологии плазменной струи при различных давлениях газовой среды электроды 2 и 3 помещали в цилиндрическую колбу 11 диаметром 65 мм и высотой 600 мм с возможностью откачки и напуска газа. Колба была изготовлена из плавленого кварца. В ряде опытов вместо воздуха ее заполняли азотом особой чистоты (ОАО «Сибтехгаз»).

Для получения интегральной картины свечения применяли фотокамеру Canon PowerShot SX60 HS в режиме покадровой съемки с экспозицией не менее 0.125 с.

3. Рассмотрим результаты проведенных измерений. На рис. 2 продемонстрировано влияние давления воздуха на форму и размер светящейся струи.

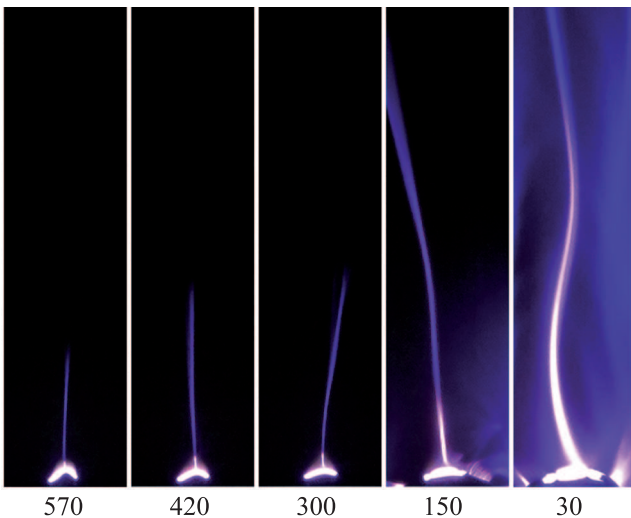


Рис. 2. (Цветной онлайн) Влияние давления воздуха на отросток и апокамп. Цифры показывают значение давления в Торр. Высота кадров – 18 см

Здесь и далее пиковое напряжение выставляли на уровне от 7.5 до 8.8 кВ: в этом интервале напряжений обеспечивалось стабильное горение в широком

диапазоне давлений. Видно, что снижение давления воздуха приводит к удлинению и отростка, и апокампа, а также увеличивает диаметр отростка.

Влияние давления на характерные длины отростка и апокампа детализирует рис. 3а. Для того, чтобы

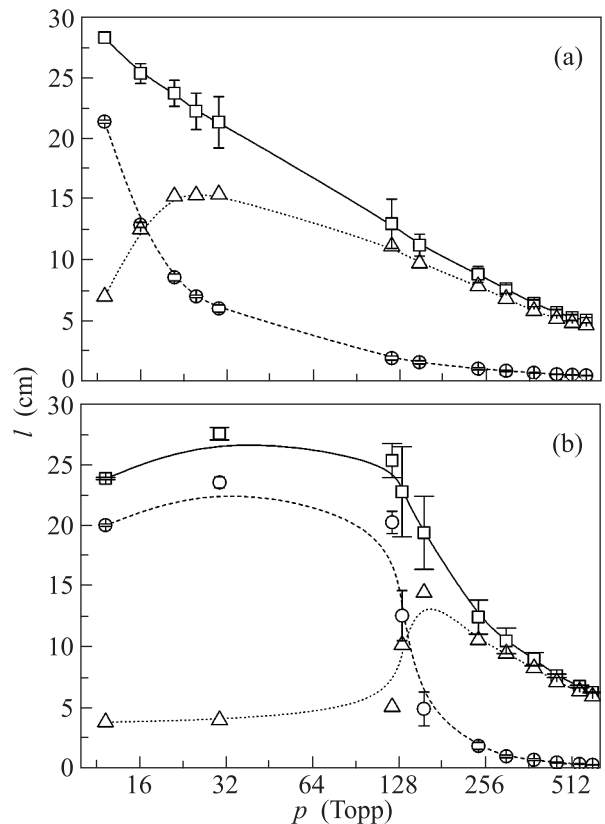


Рис. 3. Зависимость длины отростка l_s (○), апокампа l_a (△) и полной длины струи l (□) от давления в воздухе (а) и азоте (б) при пиковом значении напряжения на высоковольтном электроде $U_a \sim 8.5$ кВ

все экспериментальные точки были различимы, шкала давления выбрана логарифмической.

Обращает на себя внимание следующее: область, в которой формируются протяженные апокампы, лежит в диапазоне давлений $20 < p < 120$ Торр. В атмосфере Земли этому (ориентировочно) соответствуют высоты $17 < h < 25$ км, т.е. следы от прохождения волн ионизации, имеющие голубое свечение, возникают в экспериментальной установке в условиях, близких к условиям появления стартеров (~ 17 – 18 км).

В то же время, если учитывать резкий рост длины отростка при снижении давления вплоть до 11 Торр, можно говорить об условиях, в которых вместо сравнительно короткого стартера развивается голубая струя. В атмосфере голубые струи состоят из яркого канала (иногда ветвящегося на больших вы-

Таблица 1.

Газовая среда, диапазон давлений, Торр	Коэффициенты аппроксимации				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Воздух, 10-760	81.1 ± 4.6	0.41 ± 0.02	63.1 ± 4.5	7.9 ± 0.23	0.08 ± 0.02
Азот, 120-760	1850 ± 232	0.9 ± 0.02	1524.6 ± 116.1	97.6 ± 4.2	1.39 ± 0.16

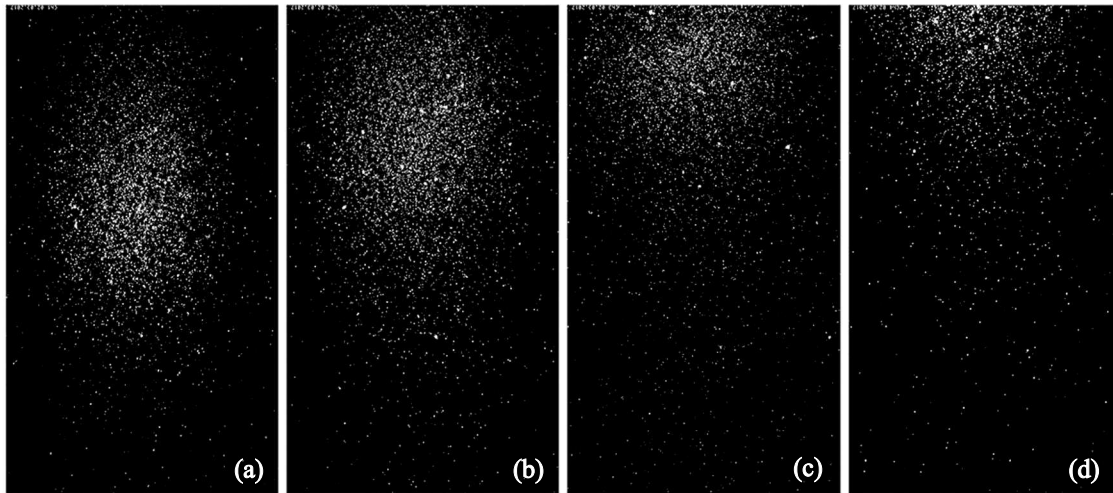


Рис. 4. Динамика свечения фронта волны ионизации (апокампа) в воздухе при давлении 90 Торр, $U_a \sim 8.4$ кВ. Время экспозиции каждого кадра (*a–d*) 3 нс, пауза между ними 7 нс. Размер кадра по вертикали – 13.1 мм. Условия съемки: $h = 40$ мм, $l_s = 15$ мм, $l_a \sim 10^5$ мм

сотах) и сравнительно слабого свечения на его продолжении. Именно такую структуру мы наблюдаем в экспериментах при давлениях $8 < p < 30$ Торр, что примерно соответствует высотам от 20 до 30 км, т.е. таким, до которых поднимаются голубые струи в природе.

Итак, и в природе, и в эксперименте стартеры и их аналоги формируются при сравнительно высоких давлениях и низких высотах, когда длина отростка мала по сравнению с длиной апокампа ($l_s \ll l_a$). Такая структура и в эксперименте, и в природе имеет вид узкой струи. Гораздо более длинными являются голубые струи, формирующиеся при меньших давлениях. В этом случае и в эксперименте, и в природе они состоят из яркой части l_s и сопоставимой с ней по длине голубой части l_a , причем $l_s \geq l_a$, а при самых низких давлениях (соответствующих высотам $h > 30$ км) $l_s \sim 2l_a$ (см. рис. 3а). Здесь же свечение апокампа становится едва заметным и рассеянным, т.е. таким, каким его фиксируют со спутников на высотах более 30 км.

При замене воздуха на азот аналогичные закономерности для длин l_a , l_s и l наблюдаются в диапазоне $p > 120$ Торр, а при более низких давлениях рост указанных величин стабилизируется (рис. 3б), т.е. в азоте протяженные синие струи образуются при давлени-

ях примерно на порядок больших, чем в воздухе. Следовательно высоты (стартовые и распространения), характерные для синих струй и стартеров в атмосфере Земли, обеспечивает именно воздушная среда.

Аппроксимация полученных кривых позволяет вычислять высоту, на которую распространяется волна ионизации, с помощью выражения:

$$l_a = l - l_s \sim [a/p^b] - [c/(p - d)^e],$$

где p – давление в Торр, a, b, c, d, e – параметры аппроксимации, приведенные в табл. 1. Для $p < 120$ Торр в азоте указанная аппроксимация неприменима.

В работах [15, 16] была измерена скорость распространения плазменных пульс (следы свечения от волн ионизации) от отростка при нормальных условиях, которая составила ~ 220 км/с. Не менее важным для сравнения экспериментальных и природных плазменных струй является сопоставление скоростей их распространения в характерном для них диапазоне давлений.

На рис. 4 показаны четыре кадра распространения свечения волны ионизации – плазменной “пули”, зарегистрированной примерно в середине апокампа ($h = 40$ мм). Высокоскоростная камера ра-

ботала на максимуме чувствительности, поэтому на фоне самой “пули” заметны отдельные, рассеянные по всему кадру одиночные точки. Снимки получены в установившемся режиме за один импульс. Давление $p = 90$ Торр, т.е. примерно в середине интервала, в котором формируются протяженные плазменные струи в экспериментах (см. рис. 3а). Регистрацию проводили при десяти включениях генератора после выхода разряда на стационарный режим. Видно, что “пуля” движется вверх, и по смещению светящейся зоны на фотографиях можно определить ее скорость, составившую 223 ± 20 км/с. Аналогично была оценена скорость “пуль”, стартующих от отростка ($h \sim 17$ мм), она составила ~ 150 км/с. С учетом этого, а также принимая во внимание то, что в атмосфере Земли голубые струи распространяются в сильно неоднородной по давлению среде, можно сказать, что усредненные значения скоростей распространения “пуль” в наших экспериментах по порядку величины совпадают со скоростями распространения голубых струй в атмосфере Земли.

4. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают возможность моделирования крупномасштабных атмосферных разрядов, наблюдаемых на высотах в десятки километров. В лабораторных условиях за счет применения импульсно-периодического разряда в режиме с апокампом получены мини стартеры и мини голубые струи, которые имеют сходство с атмосферными стартерами и голубыми струями, но отличаются малыми размерами. Планируется продолжить наши исследования, чтобы учесть большее количество факторов, определяющих развитие голубых струй и стартеров. В частности, планируется увеличить размеры мини стартеров и мини голубых струй до нескольких метров.

Работа выполнена в рамках государственной задачи ИСЭ СО РАН по теме # 13.1.3.

1. E. M. Wescott, D. D. Sentman, M. J. Heavner, D. L. Hampton, D. L. Osborne, and O. H. Jr. Vaughan, *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2153 (1996).
2. E. M. Wescott, D. D. Sentman, D. Osborne, D. L. Hampton, and M. Heavner, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 1209 (1995).
3. D. Siingh, R. P. Singh, S. Kumar, A. K. Singh, M. N. Patil, and Sh. Singh, *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* **134**, 78 (2015).
4. *Planetary Atmospheric Electricity*, ed. by F. Leblanc, K. Aplin, Y. Yair, G. Harrison, J. P. Lebreton, M. Blanc, Springer Science+Business Media (2008), p. 473.
5. A. I. Sukhorukov and P. Stubbe, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **60**, 725 (1998).
6. V. P. Pasko and J. J. George, *J. Geophys. Res.* **107**, 1458 (2002).
7. V. P. Pasko, *Plasma Phys. Control. Fusion.* **50**, 4050 (2008).
8. Y. P. Raizer, G. M. Milikh, and M. N. Shneider, *J. Geophys. Res.* **115**, A00E42 (2010).
9. N. Y. Babaeva and G. V. Naidis, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25**, 375 (1997).
10. Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер, *Физика молнии и молниезащиты*, Физматлит, М. (2001).
11. L. Niemeyer, L. Ullrich, and N. Wiegart, *IEEE Trans. Electr. Insul.* **24**, 309 (1989).
12. V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, Cambridge (2003).
13. A. I. Egorov, S. I. Stepanov, and G. D. Shabanov, *Physics-Uspokhi* **47**, 99 (2004).
14. V. Yukhimuk, R. A. Roussel-Dupre, and E. M. D. Symbalisty, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 3289 (1998).
15. H. Peterson, M. Bailey, J. Hallett, and W. Beasley, *J. Geophys. Res.* **114**, A00E07 (2009).
16. V. March and J. Montanyá, *Geophys. Res. Lett.* **37**, L19801 (2010).
17. F. C. Parra-Rojas, M. Passas, E. Carrasco, A. Luque, I. Tanarro, M. Simek, and F. J. Gordillo-Vázquez, *European Planetary Science Congress* **8**, 121 (2013).
18. A. Robledo-Martinez, G. Palacios, A. Vera, and H. M. Sobral, *31st ICPIG. PS2-001*, Granada (2013).
19. O. Chanrion, T. Neubert, A. Mogensen, Y. Yair, M. Stendel, R. Singh, and D. Siingh, *Geophys. Res. Lett.* **44**, 496 (2017).
20. В. С. Скакун, В. А. Панарин, Д. С. Печеницин, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко, *Известия вузов. Физика* **59**, 92 (2016).
21. Э. А. Соснин, А. А. Панарин, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, *Оптика атмосферы и океана* **29**, 855 (2016).
22. Э. А. Соснин, В. С. Скакун, В. А. Панарин, Д. С. Печеницин, В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакшт, *Письма в ЖЭТФ* **103**, 857 (2016).
23. А. А. Панарин, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко, *Оптика атмосферы и океана* **30**, 243 (2017).
24. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. Kh. Baksht, and V. F. Tarasenko, *Eur. Phys. J. D* **71**, 25 (2017).