

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 52-74, 523.9-7, 523.98, 539.1.074.4

**Излучение Вавилова–Черенкова в области 200–300 нм
у поверхности Земли****Е.И. Липатов, В.Ф. Тарасенко, М.В. Ерофеев,
В.С. Рипенко, М.А. Шулепов****Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 27.06.2019 г.

Приведены результаты исследований спектров излучения атмосферы Земли в УФ- и видимой областях спектра. Входное окно спектрометра направлялось на Солнце или располагалось под различными углами к оси, проходящей через центр солнечного диска. Впервые стандартным спектрометром зарегистрирован спектр излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) у поверхности Земли в области 200–300 нм. Рассчитаны пороговая энергия электронов для возникновения ИВЧ в воздухе и максимальный угол распространения ИВЧ по отношению к направлению движения электрона. Предполагается, что ИВЧ возникает при торможении высокоэнергетических частиц солнечного ветра в атмосфере Земли.

Ключевые слова: излучение Вавилова–Черенкова (ИВЧ), атмосфера Земли, солнечный ветер, ультрафиолетовое излучение; Vavilov–Cherenkov (VCh) radiation, Earth's atmosphere, solar wind, ultraviolet radiation.

Излучение, возникающее в атмосфере Земли под действием электромагнитных полей и высокоэнергетических частиц, хорошо изучено [1–5], но благодаря, в частности, совершенствованию измерительной аппаратуры и применению космических аппаратов [5] продолжает активно исследоваться [3–7]. В настоящей работе сообщается о регистрации УФ-излучения в направлении от Солнца, интенсивность которого возрастала с уменьшением длины волны вплоть до коротковолновой границы поглощения воздухом (~200 нм). Такое поведение спектральной плотности излучения характерно для излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ) [8, 9].

Для потока высокоэнергетических электронов спектральная плотность мощности ИВЧ $dP(\lambda)/d\lambda$, возбуждаемого отдельным электроном, определяется формулой, полученной в [10] из данных монографии [9]:

$$dP(\lambda) = 4\pi^2 e^2 v \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n(\lambda)^2} \right) \frac{d\lambda}{\lambda^3}, \quad (1)$$

где e — элементарный заряд электрона; v — скорость электрона; c — скорость света; n — показатель преломления вещества; λ — длина волны.

Из формулы (1) следует, что плотность мощности ИВЧ возрастает с уменьшением длины волны излучения обратно пропорционально λ^3 и существует

пороговая энергия электронов, соответствующая скорости света в веществе, при которой возникает ИВЧ. Расчетный спектр ИВЧ в области 200–400 нм приводится в большом числе работ, в том числе в [10, 11].

Пороговую энергию электрона для возникновения ИВЧ можно определить из формулы [9]:

$$E_{cr} = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-1/n^2}} - 1 \right), \quad (2)$$

где E_{cr} — критическая энергия релятивистской частицы для возбуждения ИВЧ; m — масса частицы.

Известно, что в тропосфере и стратосфере показатель преломления воздуха больше единицы [5]. Тогда, согласно формуле (2), для значений показателя преломления воздуха $n = 1,00029 \div 1,00003$ критическая энергия электронов для возникновения ИВЧ должна составлять $E_{cr} = 21 \div 65$ МэВ. Также известно, что энергия электронов солнечного ветра в верхних слоях атмосферы может достигать десятков ГэВ [12]. Поэтому возбуждение ИВЧ в разреженном воздухе возможно.

При возбуждении ИВЧ высокоэнергетические заряженные частицы порождают фотоны с волновыми векторами, образующими с вектором скорости частицы угол θ_{ch} [9]:

$$\cos \theta_{ch} = \frac{c}{nv}. \quad (3)$$

Для приведенных выше значений показателя преломления воздуха максимальный угол, под которым может наблюдаться ИВЧ, составляет $\theta_{ch} = 1,38 \div 0,44^\circ$. Следовательно, при направлении

* Евгений Игоревич Липатов (lipatov@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (vft@loi.hcei.tsc.ru); Михаил Владимирович Ерофеев (michael@loi.hcei.tsc.ru); Василий Сергеевич Рипенко (vstk91@mail.ru); Михаил Александрович Шулепов (mixshlp@yandex.ru).

входного окна спектрометра на Солнце в него должно попадать ИВЧ.

Свойство высокоэнергетических частиц порождать ИВЧ при скоростях выше скорости распространения света в среде широко используется для диагностики космических лучей [11, 13]. При этом энергия космических частиц может достигать 10^{17} эВ [13]. Для регистрации ИВЧ малой интенсивности от высокоэнергетических космических частиц используют черенковские детекторы высокой чувствительности, регистрирующие излучение в видимой области спектра с помощью ФЭУ.

Помимо изучения космических частиц, в последние годы существенно возрос интерес к исследованию ИВЧ в УФ- и видимой областях спектра в связи с необходимостью создания датчиков для диагностики пучков убегающих электронов в установках типа ТОКАМАК [10, 14–17]. Спектры ИВЧ в алмазе в УФ-области были зарегистрированы в работах [10, 15, 16] с помощью монохроматора и ФЭУ, а при энергии электронов 6 МэВ – с помощью стандартного спектрометра [17]. Причем при энергии электронов 6 МэВ спектр ИВЧ был зарегистрирован в кварце марки GE-014 и КУ1 [14].

Как следует из теории [8, 9], пороговая энергия заряженных частиц для достижения ИВЧ увеличивается с уменьшением показателя преломления вещества, но при этом форма спектра ИВЧ не изменяется. Интенсивность ИВЧ зависит от плотности потока заряженных частиц и от их энергии (чем больше изначальная энергия частицы, тем большее количество фотонов ИВЧ она способна породить).

Как известно, в верхних слоях атмосферы Земли регистрируются потоки электронов и позитронов высоких энергий, генерируемые высокоэнергичными частицами солнечного ветра и солнечных ливней и вызывающие свечение атмосферы Земли [1–5]. В ряде работ, например в [1], спектры излучения Солнца в области 250–300 нм, измеренные у поверхности Земли, содержат аномалию. В этой спектральной области наблюдалось некоторое увеличение спектральной плотности энергии излучения при уменьшении длины волны излучения. Как следует из теории, такая форма полосы излучения соответствует характеристикам ИВЧ.

Было высказано предположение [2], что потоки электронов и позитронов, генерируемых солнечным ветром при торможении в атмосфере Земли, должны вызывать ИВЧ с интенсивностью, достаточной для регистрации стандартными спектрометрами в УФ-области.

Для регистрации спектра излучения Солнца мы использовали спектрометр Ocean Optics HR 2000+, входное окно которого через бленду направлялось как на Солнце, так и под различными углами к оси, проходящей через центр солнечного диска и ось бленды. Измерения проводились с 5 апреля по 15 мая 2019 г. в солнечную безоблачную погоду. Схема эксперимента показана на рис. 1. В процессе измерений с помощью программного обеспечения спектрометра OceanView время экспозиции устанавливалось равным 1 мс и проводилось усреднение по

10 спектрам. Спектрометр работал в линейном диапазоне, ограниченном 10000 отн. ед. После измерений производился учет спектральной чувствительности спектрометра.

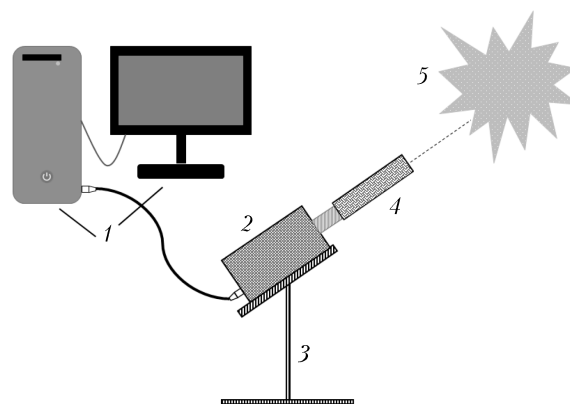


Рис. 1. Схема измерения спектра Солнца в диапазоне длин волн 200–1000 нм: 1 – персональный компьютер с программным обеспечением OceanView; 2 – спектрометр Ocean Optics HR 2000+; 3 – держатель спектрометра; 4 – бленда; 5 – Солнце

На рис. 2 приведены измеренные спектры Солнца, а также спектр ИВЧ, рассчитанный по формуле (1). Все спектры были нормированы для удобства сравнения.

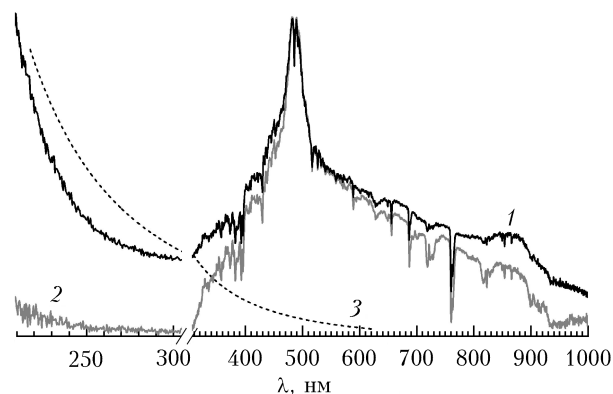


Рис. 2. Спектры излучения Солнца в безоблачную погоду: 1 – при направлении точно на Солнце; 2 – при направлении на Солнце за пределами солнечного диска; 3 – спектр излучения Вавилова-Черенкова, рассчитанный по формуле (1). Излучение Солнца с длиной волны более 300 нм ослаблено

Подробному описанию солнечного спектра, соответствующего излучению абсолютно черного тела, и наложенных на него полос поглощения атмосферы посвящено множество работ [1–7]. Однако в диапазоне длин волн 200–300 нм спектры излучения, соответствующие расчетным для ИВЧ, ранее не наблюдались.

Таким образом, в настоящей работе впервые сообщается о регистрации в солнечном спектре излучения Вавилова–Черенкова в области 200–300 нм. ИВЧ, как мы считаем, возникает при торможении в атмосферных газах высокоэнергетических частиц,

прежде всего электронов и позитронов, генерируемых солнечным ветром. Экспериментально установлено, что интенсивность УФ-полосы излучения в области 200–300 нм возрастает с уменьшением длины волны примерно обратно пропорционально λ^3 , что соответствует спектру ИВЧ. Излучение наблюдалось при направлении спектрометра точно на Солнце. Измерение солнечного спектра у поверхности Земли в области длин волн короче 200 нм (в области вакуумного УФ) крайне затруднено сильным поглощением воздуха. Мы считаем, что данную особенность излучения атмосферного воздуха, обусловленную высокоэнергетическими частицами, следует учитывать при изучении воздействия Солнца на биологические и другие объекты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-19-00184).

1. *Handbook of geophysics and space environments* / S.L. Valley (ed.). New York: McGraw-Hill, 1965. 691 p.
2. *Akasofu S.I., Chapman S. Solar-terrestrial physics*. Oxford: The Clarendon press, 1972. 891 p.
3. *Чукин В.В.* Исследование атмосферы методом электромагнитного просвечивания. СПб.: Изд-во РГТМУ, 2004. 107 с.
4. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 740 с.
5. *Коломиец С.М.* Зондирование ионосферы с использованием искусственных спутников Земли с пассивным ответом [Электронный ресурс] // Исследования в области естественных наук. 2014. № 11. URL: <http://science.snauka.ru/2014/11/8498> (дата обращения: 7.02.2019).
6. *Тащилин М.А., Михалев А.В.* Весенняя особенность сезонного хода приземной ультрафиолетовой радиации в некоторых регионах России // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 205–210; *Tashchilin M.A., Mikhalev A.V.* Springtime feature of the seasonal behavior of near-ground ultraviolet radiation in certain regions of Russia // Atmos. Ocean. Opt. 2010. V. 23, N 4. P. 303–308.
7. *Чубарова Н.Е., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А., Поляков А.В.* Оценки УФ-индексов в периоды пониженного содержания озона над Сибирью зимой – весной 2016 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 11. С. 902–905; *Chubarova N.E., Timofeev Yu.M., Viro-*

- lainen Ya.A., Polyakov A.V.* Estimates of UV indices during the periods of reduced ozone content over Siberia in winter–spring 2016 // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 177–179.
8. *Зрелов В.П.* Излучение Вавилова–Черенкова и его применение в физике высоких энергий. Т. 1. М.: Атомиздат, 1968. 274 с.
 9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 8. М.: Наука, 1982. 621 с.
 10. *Sorokin D.A., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Baksh E.Kh., Lipatov E.I., Lomaev M.I.* Luminescence of crystals excited by a runaway electron beam and by excilamp radiation with a peak wavelength of 222 nm // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. P. 093304.
 11. *Tsunesada Y., Katsuya R., Mitsumori Y., Nakayama K., Kakimoto F., Tokuno H., Tajima N., Miranda P., Salinas J., Tavera W.* New air Cherenkov light detectors to study mass composition of cosmic rays with energies above knee region // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2014. V. 763. P. 320–328.
 12. *Clem J.M., Niessen P., Stoyanov S.* Response of Ice-Top tanks to low-energy particles // Proc. 30th Intern. Cosmic Ray Conf. Mexico City, Mexico. 2008. V. 1(SH). P. 237–240.
 13. *De Vries K.D., van den Berg A.M., Scholten O., Werner K.* Coherent Cherenkov radiation from cosmic-ray-induced air showers // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 061101.
 14. *Bagnato F., Romano A., Buratti P., Doria A., Gabelieri L., Giovenale E., Rabinski M.* Triple Cherenkov probe measurements on FTU: Calibration and runaway energy spectra // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60, N 11. P. 115010.
 15. *Lipatov E.I., Genin D.E., Grigor'ev D.V., Tarasenko V.F., Burachenko A.G., Baksh E.Kh., Beloplotov D.V.* Applied optical properties of diamond // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2069. P. 040007(1–8).
 16. *Tarasenko V.F., Lomaev M.I., Baksh E.Kh., Beloplotov D.V., Burachenko A.G., Sorokin D.A., Lipatov E.I.* Spectral and amplitude-time characteristics of crystals excited by a runaway electron beam // Matter Radiat. Extremes. 2019. V. 4. P. 037401.
 17. *Бакшт Е.Х., Вуколов А.В., Ерофеев М.В., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Шевелев М.В.* Излучение Вавилова–Черенкова в видимой и УФ-областях спектра при прохождении электронов с энергией 6 МэВ через кварцевую пластинку // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 109, № 9. С. 584–588.

E.I. Lipatov, V.F. Tarasenko, M.V. Erofeev, V.S. Ripenko, M.A. Shulepov. Vavilov–Cherenkov radiation in the region 200–300 nm in the Earth's atmosphere.

The results of studies of the emission spectra of the Earth's atmosphere in the ultraviolet (UV) and visible spectral regions are presented. The input window of the spectrometer was directed to the Sun or located at different angles to the axis passing through the center of the solar disk. For the first time, a Vavilov–Cherenkov (VCh) emission spectrum was recorded with a standard spectrometer in the region 200–300 nm. The threshold energy of electrons for the occurrence of VCh emission in air and the maximum angle of propagation of VCh emission with respect to the direction of electron motion are calculated. It is assumed that the VCh emission occurs when high-energy particles of the solar wind are braked in the Earth's atmosphere.