

ВАРИАЦИИ ЧИСЛА РАДИОИМПУЛЬСОВ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ЯКУТСКЕ

В.И. Козлов, А.А. Корсаков, Л.Д. Тарабукина, Н.С. Дуюкова

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск,

Российская Федерация

E-mail: vkozlov@ikfia.ysn.ru

По данным часового счета атмосфериков, регистрируемых непрерывно в окрестностях Якутска с 2001 по 2015 г., с учетом вклада распространения, установлено, что отношение между количеством атмосфериков в минимуме и максимуме солнечной активности составляет около 159 % (лето). В Северной Азии вариация грозových разрядов находится в фазе с вариацией галактических космических лучей и противофазна солнечной активности.

Ключевые слова: атмосферик; грозовая активность; солнечная активность; распространение радиоволн; галактические космические лучи.

Основным природным источником очень низкочастотного излучения (ОНЧ: 3–30 кГц) являются грозовые разряды, порождающие радиоимпульсы – атмосферерики. Атмосферерики распространяются на большие расстояния с малым затуханием. Исследованиям импульсной составляющей радишумов ОНЧ-диапазона посвящен ряд работ [1, 2]. Ряд вопросов, связанных с проведением регистрации и обработки атмосфериков, методы мониторинга грозовой активности описаны в работах Панюкова А.В. [3–5]. В работах [6–8] авторы указывают на зависимость атмосферных помех от активности Солнца.

Атмосферерики регистрировались в 30 км от г. Якутска ($\varphi = 62^\circ \text{N}$; $\lambda = 129,72^\circ \text{E}$). Рамочная приемная антенна ориентирована восток–запад. Приемный тракт включает в себя предварительный усилитель с полосой усиления 0,3–10 кГц, что соответствует полосе сосредоточения наибольшей энергии наземных грозových разрядов. Порог регистрации выбирался так, что средняя плотность потока атмосфериков в суточном дневном летнем максимуме превышала 1 сек^{-1} . Пороговый уровень поля, принимаемого антенной $\sim 2 \text{ мВ/м}$, что для ночной трассы распространения дает возможность регистрации импульсов на дальности до $\sim 6000 \text{ км}$. Выставленный порог превышает верхнюю оценку шумовой составляющей. Стандартное отклонение шумовой составляющей атмосферных помех в полосе частот 2–9 кГц, измеренное в Канаде в 1950-х годах лежит в пределах $0,03 \dots 2 \text{ мВ/м}$ [9]. Наши измерения показывают, что для окрестности г. Якутска, максимальная величина флуктуационной составляющей во время летних ближних гроз достигает 1 мВ/м . Превысивший порог сигнал поступал на счетчик.

Для исследования вариаций потока атмосфериков использованы данные регистрации счета импульсов в час с 2001 по 2015 гг. В указанный период регистрации получены суточные и сезонные хода принимаемых атмосфериков. В суточном ходе импульсов выделяются три характерных периода: 3–7 UT – минимум в суточном ходе, обусловленный утренним и дневным временем в окрестности точки регистрации, при минимальной активности остальных очагов, входящих в зону регистрации, и максимальным затуханием на трассе распространения; 8–12 UT – максимум в летнее время, обусловленный дневным и вечерним временем в окрестности точки регистрации, максимумом вклада местной грозовой активности при максимальном затухании сигналов при их распространении; 15–19 UT – максимум, наблюдаемый зимой и второй летний максимум, обусловленный ночным временем в окрестности точки регистрации, при минимальном затухании на трассе распространения. В сезонной вариации максимум наблюдается в летнее время [10]. Вариация для суточного максимума в $\sim 17 \text{ ч (UT)}$ между летними и зимними месяцами составляет 230 %, а в $\sim 9 \text{ ч (UT)}$ – 2600 %, что определяется вкладом местной грозовой активности летом.

Одиннадцатилетняя вариация имеет характерный вид полуволны с максимумом на 1 год раньше минимума солнечной активности для всех отмеченных выше экстремумов суточного хо-

да как для летних (рис. 1), так и для зимних месяцев (рис. 2). На ниспадающей ветви солнечной активности, с максимума (2001 г.) до минимума (2008 г.), идет нарастание превышающего порог 1,75 мВ/м. числа атмосфериков. Вместе с тем, при нарастании солнечной активности (2008–2015 гг.), наоборот, наблюдается уменьшение плотности потока атмосфериков. Таким образом, поток атмосфериков находится в противофазе с солнечной активностью и в фазе с вариацией космических лучей, которые и ответственны за ионизацию атмосферы. От максимума к минимуму солнечной активности (2001–2007 гг.) изменение потока радиоимпульсов 3–7 UT составило 59 и 13 раз в зимний и летний сезоны соответственно. Изменение потока атмосфериков 15–19 UT составило 38 и 5 раз в зимний и летний сезоны соответственно. Повышение потока атмосфериков, соответствующих местной грозовой активности летом и грозовому очагу Северной Индии зимой (8–12 UT), составило 34 и 8 раз для зимы и лета соответственно.

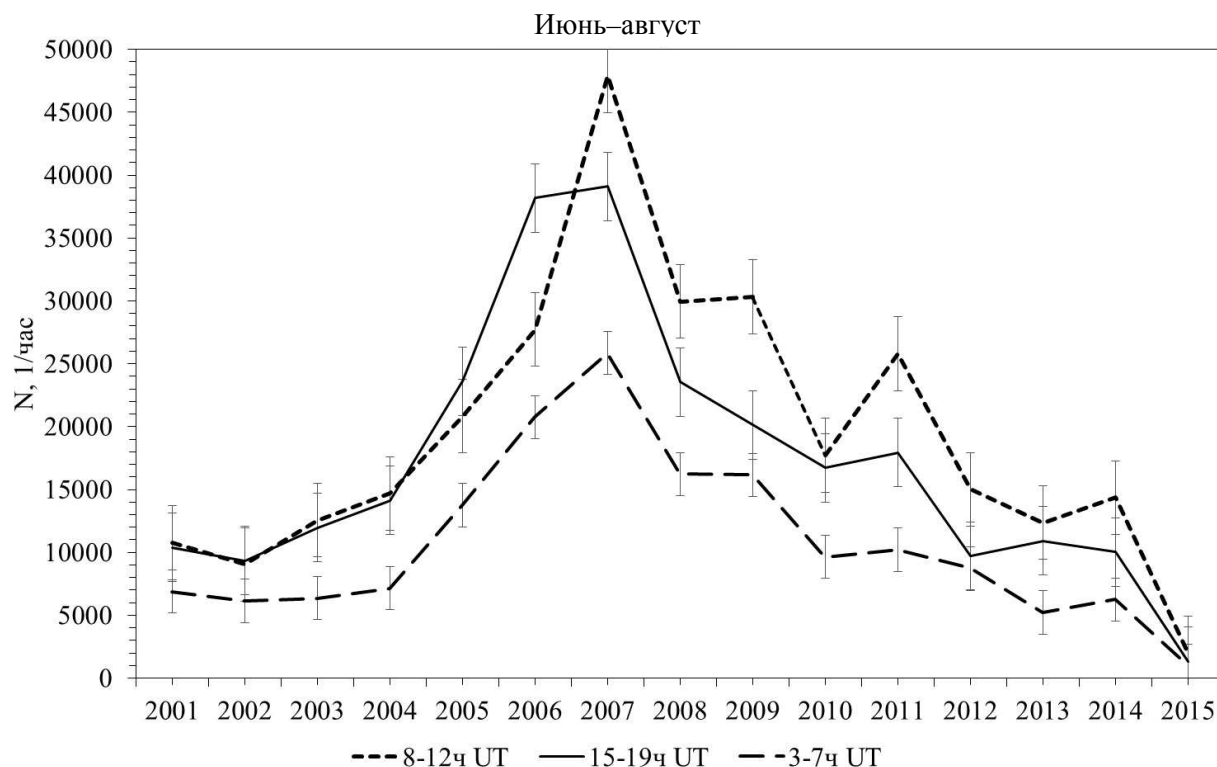


Рис. 1. Вариации числа атмосфериков, превышающих 1,75 мВ/м, по наблюдению в Якутске в летние месяцы 2001–2015 гг.

Одиннадцатилетняя вариация количества регистрируемых атмосфериков, на наш взгляд, может быть объяснена тремя причинами: изменением величины затухания атмосфериков при распространении, изменением активности грозовых очагов и смещением положения этих очагов относительно пункта регистрации.

В зимние месяцы регистрируются атмосферика от грозовых разрядов, происходящих на самом севере полуострова Индостан. Небольшое смещение положения этого грозового очага в солнечном цикле приводит к значительным вариациям числа регистрируемых атмосфериков.

С 2009 г. в Якутске регистрируются сигналы ОНЧ навигационной системы станций РСДН – 20 (Новосибирск и Хабаровск). Методика регистрации описана в работе [11]. Была проведена калибровка путем одновременных измерений амплитуды сигналов радиостанций РСДН-20 стационарным регистрирующим комплексом и дополнительным мобильным приемником, в состав которого вошли сертифицированная дипольная антенна П6-51 (Антенна дипольная активная П6-51 – № 349 Руководство по эксплуатации, ИУШЯ.464651.006РЭ), АЦП Е14-440, ноутбук с программным обеспечением для АЦП «LGraph2». Сертификат соответствия позволил определить, что на частоте 15 кГц номинальное значение коэффициента преобразования антенны ($K_{ант}$) составляет 15,9 дБ(1/м). Одновременно со стационарным регистратором были проведены измерения амплитуд ОНЧ сигналов радиостанций дополнительным мобильным приемником. Измерения выполнены на открытой сельской местности в окрестностях г. Якутска (удаление 10 км), без

застроек в радиусе 2 км. Местность представляет открытый луг без посевов и кустарников, плотность застройки < 1/га, вдали от крупных автодорог и от электрифицированных железных дорог. Предполагается, что основным источником радишума является атмосферный шум грозовых разрядов (9 кГц – 30 МГц).

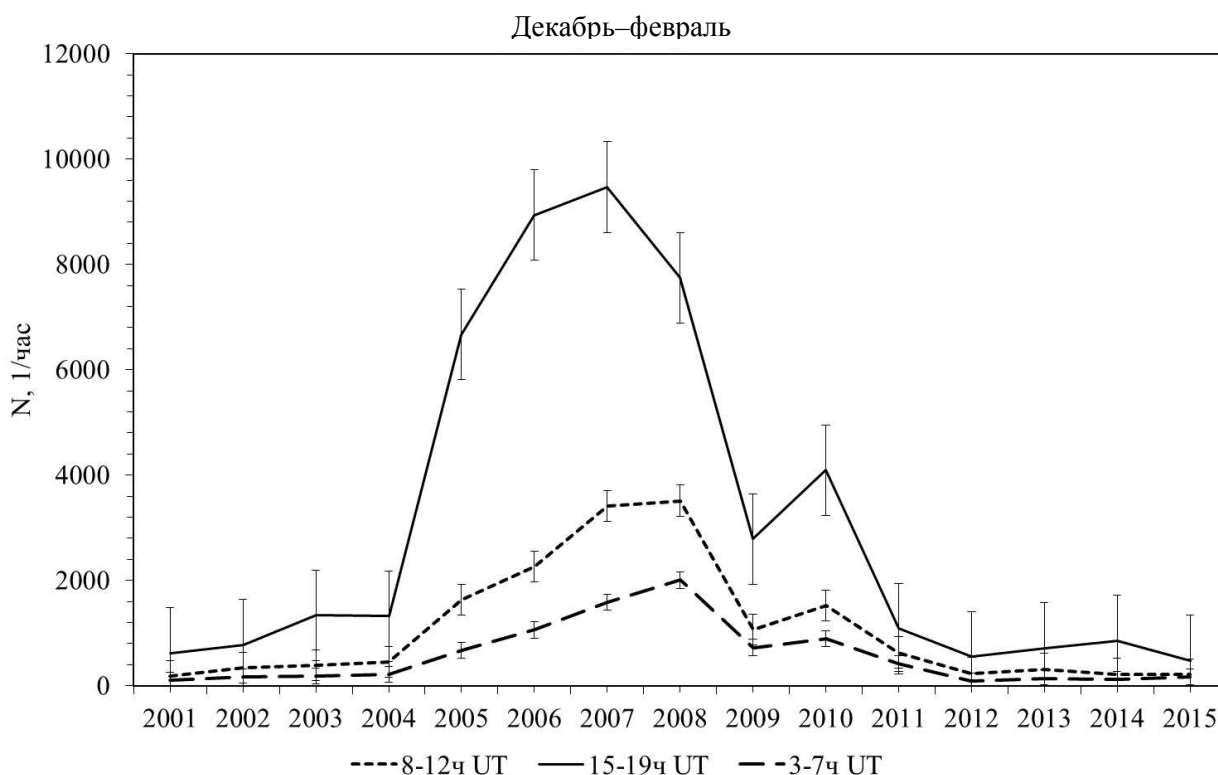


Рис. 2. Вариации числа атмосфериков, превышающих 1,75 мВ/м по наблюдению в Якутске в зимние месяцы 2001–2015 гг.

Для спектрального анализа выбрано прямоугольное окно $\text{дБ}(\text{Вср.кв.}/\sqrt{\text{Гц}})$, время полевых измерений амплитуды сигналов радиостанций 04:12 UT. Полоса спектрального анализа (прямоугольное окно) стационарного регистратора ОНЧ радиосигналов равна 372 Гц.

В таблице представлены усредненные коэффициенты пересчета к 1 отн.ед. или 1 В амплитудного значения стационарного регистратора к уровню электрической составляющей поля ($\text{мкВср.кв.}/\text{м}\cdot\sqrt{\text{Гц}}$) ОНЧ сигналов радиостанций на частотах 11,904, 12,649 и 14,881 кГц у приемной антенны.

Коэффициент пересчета 1 В амплитудного значения (1 отн. ед.) стационарного регистратора к уровню электрической составляющей поля ОНЧ радиосигналов

Частота сигнала, кГц	Коэффициент пересчета, $\text{дБ}(\text{Вср.кв.}/\text{м}\cdot\sqrt{\text{Гц}})$	Коэффициент пересчета, $\text{дБ}(\text{мкВср.кв.}/\text{м}\cdot\sqrt{\text{Гц}})$	Уровень сигнала, принимаемого антенной, $\text{мкВср.кв.}/\text{м}\cdot\sqrt{\text{Гц}}$
11,904 кГц	-81,4	38,6	85,11
12,649 кГц	-80,76	39,24	91,62
14,881 кГц	-83,05	36,95	70,39

На рис. 3 и 4 представлены суточные вариации электрической составляющей поля сигналов радиостанций, принимаемых на частотах 11,904 и 14,881 кГц с учетом коэффициента пересчета к уровню электрической составляющей поля. Здесь же показана суточная вариация флуктуационной составляющей радишума, регистрируемая в интервалы времени отсутствия сигналов радиостанций. Соотношение между величиной сигнала радиостанций и радишума определяет отношение сигнал \ шум.

Якутский пункт с 2009 г. входит в мировую сеть регистрации гроз WWLLN [12]. По данным этой сети для Северо-Восточной Азии выделяются два максимума плотности грозовых разрядов, вносящих большой вклад в местную послеполуденную (3–7 UT) грозовую активность в летний период. Один максимум находится западнее Новосибирска, а второй – южнее Хабаровска. Ва-

риации распространения атмосфериков из этих областей до Якутска оцениваются с помощью регистрации сигналов станций Новосибирск и Хабаровск. В работе [13] указывается, что в дневных условиях в минимуме солнечной активности затухание примерно на 0,3 дБ/Мм больше, чем в солнечном максимуме. Максимальное расстояние регистрации атмосфериков составляет 6 Мм, таким образом оценка затухания в солнечном цикле меняется на 1,8 дБ, что соответствует изменению величины электрического поля в 1,41 раза. По нашим наблюдениям (рис. 5) на трассе Новосибирск–Якутск изменение затухания составляет 1,5 дБ, что соответствует изменению величины электрического поля в 1,2 раза.

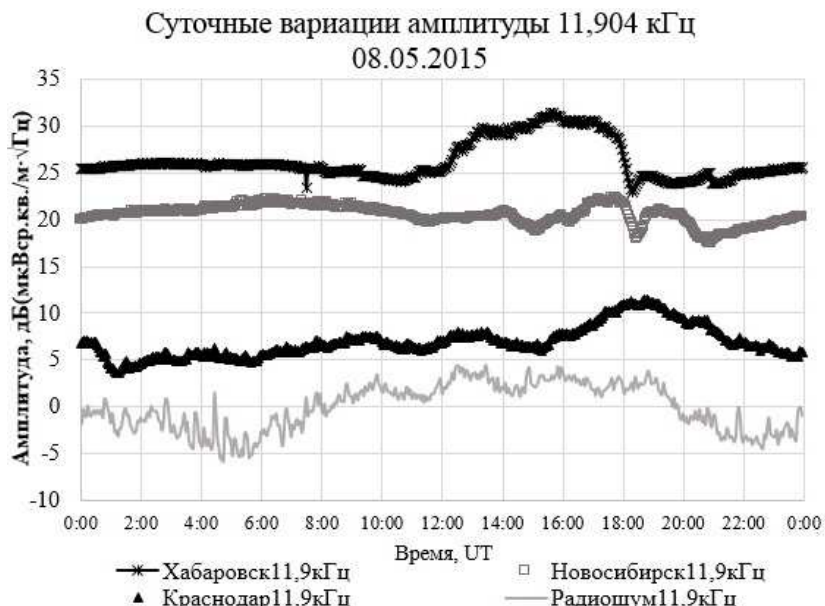


Рис. 3. Суточные вариации поля ОНЧ сигналов радиостанций и радиошума 11,904 кГц

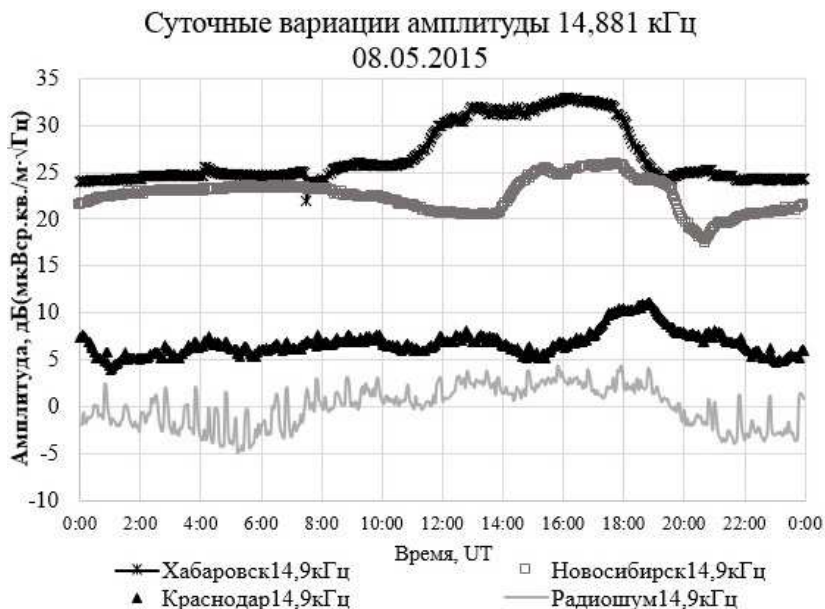


Рис. 4. Суточные вариации поля ОНЧ сигналов радиостанций и радиошума 14,881 кГц

Для пересчета изменений в величине электрического поля E в изменения в плотности потока атмосфериков $N(E)$ воспользуемся соотношением:

$$N(E)/N(E_0) = (E/E_0)^\kappa,$$

где в нашем случае $\kappa = 2,5$. Соотношение выведено исходя из следующих допущений: равномерного распределения гроз по поверхности Земли; амплитуда атмосферика убывает по степенному закону при удалении от источника; функция распределения амплитуд атмосфериков логарифми-

чески нормальная для любого грозового очага на небольшом расстоянии от него. Значения показателя k для Якутска изменяются от 1,36...3 летом до 2...3,2 зимой. Для сезонов весна–осень значения показателя составляют 2,2...2,9. Полученные нами значения k соответствуют значениям 1,5...3 весной и осенью, 1...2 летом и 2,5...3,5 зимой, измеренным в средних широтах европейской части России [2]. Сравнение вариаций ОНЧ сигналов радиостанций, зарегистрированных в 2009–2014 гг., с вариациями потока атмосфериков указывает на присутствие связи солнечной активности с числом регистрируемых импульсов от грозовых источников. С учетом вклада распространения, отношение между количеством атмосфериков, принятых в минимуме солнечной активности (2009 г.) и максимуме (2013 г.) для летних месяцев составляет около 159 %.

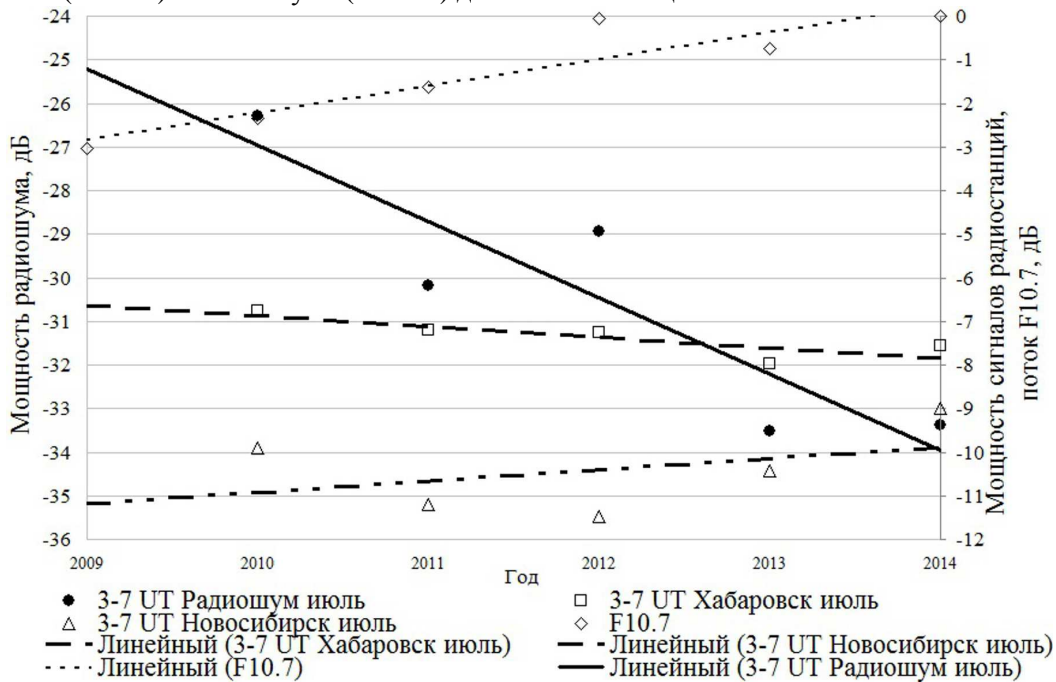


Рис. 5. Вариации потока F10.7, спектральной составляющей мощности радиошума и сигналов радиостанций (14,88 кГц) в дневной летний период

Эффекты вариаций флуктуационной составляющей ОНЧ естественных радиошумов, вызываемых грозовой активностью по наблюдениям в 1979–1996 гг. в Якутске рассмотрены в [8], где показано, что вариация интенсивности регистрируемых радиошумов противофазна солнечной активности и модулируется параметрами солнечного ветра. Количество молний по наблюдениям в Европе также модулируется скоростными потоками солнечного ветра [14, 15].

Регистрируемое на основе вариаций амплитуд сигналов радиостанций изменение функции прохождения не может полностью объяснить величину наблюдаемой нами одиннадцатилетней вариации количества регистрируемых атмосфериков. Имеются публикации о регистрации длинного ряда грозовых разрядов в двух регионах, Южной (8°N–35°N, 60°E–95°E) и Юго-Восточной Азии (8°N–35°N, 95°E–120°E) [16]. В работе рассмотрен длинный ряд данных регистрации числа световых вспышек молний спутниковым прибором Lightning Imaging Sensors (LISs) помещенным на борту спутника Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). LIS определяет местоположение молнии с пространственным разрешением 5–10 км и временным разрешением 2 мс на большой области земной поверхности в окрестности от 35° южной широты до 35° северной широты. Эффективность детектирования молниевых вспышек LIS около 90 % в поле наблюдения сенсора, прибор обнаруживает как внутриоблачные разряды, так, и разряды облако–земля в дневных и ночных условиях. Использованы ежемесячные данные, с разрешением 5°×5° за период 1998–2010. Одиннадцатилетняя вариация количества гроз как в Южной Азии, так и Юго-Восточной Азии находится в противофазе с солнечной активностью, выражаемой количеством солнечных пятен и потоком радиоизлучения F10,7. В то же время одиннадцатилетняя вариация количества гроз коррелирует в фазе с потоком космических лучей. Изменение количества гроз с 2000 по 2007 год составило 3,5 раза.

Подобный анализ регистрации грозových разрядов, использующих данные как спутника ОТД, так и LIS для того же временного периода 1998–2009 годы проведен в работе [17]. Данные по количеству грозových разрядов для региона Индии анти коррелируют с солнечной активностью и коррелируют со средней температурой земной поверхности. При этом изменение плотности грозových разрядов для северной геосферы от минимума 1999–2000 до максимума 2006–2007 составляет 1,4 раза.

В заключение можно сделать вывод, что с учетом вклада распространения, отношение между количеством атмосфериков, принятых в минимуме солнечной активности (2009 г.) и максимуме (2013 г.) составляет около полутора раз. Это соответствует вариации количества грозových разрядов, наблюдаемых в Южной и Юго-Восточной Азии. Таким образом, как в регионах Южной и Юго-Восточной Азии, так и в Северной Азии вариация грозových разрядов находится в противофазе с солнечной активностью и в фазе с вариацией галактических космических лучей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, № 15-45-05005-р_восток_а, № 15-45-05135-р_восток_а и частично РНФ (проект №14-19-01079).

Литература

1. Ремизов, Л.Т. Естественные радиопомехи / Л.Т. Ремизов. – М.: Наука, 1985. – 196 с.
2. Александров, М.С. Исследование атмосферных радиопомех ОНЧ- и НЧ-диапазонов и их источников / М.С. Александров // Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 10. – С. 3–25.
3. Панюков, А.В. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности / А.В. Панюков, Д.В. Будуев, Д.Н. Малов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика, физика, химия». – 2003. – Вып. 4. – № 8(24). – С. 11–20.
4. Панюков, А.В. Математическое и программное обеспечение распределенной сети грозопенггаторов-дальномеров / А.В. Панюков // VI Российская конференция по атмосферному электричеству (Нижний Новгород, 1–7 октября 2007). – Нижний Новгород: ИПФ РАН. – С. 255–256.
5. Панюков, А.В. Спектрально-статистический метод определения параметров положения дипольного источника электромагнитного излучения / А.В. Панюков, А.К. Богушов // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2016. – Т. 59, № 4. – С. 308–319.
6. Лихтер, Я.И. О циклических вариациях интенсивности атмосферных радиопомех / Я.И. Лихтер // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1966. – Т. 6, № 4. – С. 795–796.
7. Клейменова, З.П. Об изменении грозовой активности в солнечном цикле / З.П. Клейменова // Метрология и гидрология. – 1967. – № 8. – С. 64–68.
8. Mullayarov, V.A. Effect of variations in the solar-wind parameters on thunderstorm activity / Mullayarov V.A., V.I. Kozlov, R.R. Karimov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2009. – Vol. 49, Issue 8. – pp. 1299–1301.
9. McKerrow, C.A. Some Measurements of Atmospheric Noise at Low and Very Low Frequencies in Canada / C.A. McKerrow // Journal of Geophysical Research. – 1960. – Vol. 65, № 7. – P. 1911–1926.
10. Козлов, В.И. Суточно-сезонные вариации атмосфериков / В.И. Козлов, Г.В. Федорова, С.Н. Шабаганова // Вестник Якутского государственного университета. – 2009. – Т. 6, № 4. – С. 29–34.
11. Вариации параметров сигналов радионавигационных станций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот / Р.П. Каримов, В.И. Козлов, А.А. Корсаков и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 4. – С. 57–62.
12. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network / M.L. Hutchins, R.H. Holzworth, J.B. Brundell, C.J. Rodger // Radio Sci. – 2012. – Vol. 47. – P. RS6005. (9 p.). DOI: 10.1029/2012RS005049.
13. Thomson, N.R. Solar cycle changes in daytime VLF subionospheric attenuation / N.R. Thomson, M.A. Clilverd // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62, № 7. – P. 601–608.
14. Evidence for solar wind modulation of lightning / C.J. Scott, R.G. Harrison, M.J. Owens *et al.* // Environmental Research Letters. – 2014. – Vol. 9, no. 5. – P. 055004 (12 p.).

15. Global Circuit Response to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? / E. Williams, A. Guha, R. Boldi *et al.* // XV International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014), 15–20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.

16. Siingh, D. Lightning, convective rain and solar activity – Over the South/Southeast Asia / D. Siingh, P.R. Kumar, M.N. Kulkarni // *Atmospheric Research*. – 2013. – Vol. 120–121. – P. 99–111.

17. Pereira, F.B. A possible relationship between global warming and lightning activity in India during the period 1998–2009 / F.B. Pereira, G. Priyadarsini, T.E. Girish. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1012/1012.3338.pdf>

Поступила в редакцию 5 октября 2016 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2017, vol. 9, no. 1, pp. 57–64

DOI: 10.14529/mmph170107

VARIATIONS IN NUMBER OF LIGHTNING DISCHARGE RADIO PULSES BY OBSERVATIONS IN YAKUTSK

V.I. Kozlov, A.A. Korsakov, L.D. Tarabukina, N.S. Duiukova
North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
E-mail: vkozlov@ikfia.ysn.ru

The main natural source of very low-frequency radiation (LFR: 3–30 kHz) is a lightning discharge which generates radio pulses, namely atmospheric. The atmospheric were registered in the period from 2001–2015 30 km away from Yakutsk (62N; 129,72 E) in the context of industrial noise-free environment. A receive path corresponds to a band of ground lightning discharge's energy concentration: 0,3–10 kHz. The threshold level of a field, received by a frame antenna ~2 mV/m, which provides an opportunity to register radio pulses at night propagation conditions is up to ~6 000 km. The specific period of a daily variation: minimum 3–7 UT (minimum thunderstorm activity, maximum radio signal attenuation); the summer maximum 8–12 UT (influence of local thunderstorms, maximum signal attenuation); the winter and summer maximum 15–19 UT (minimum attenuation in radio signal propagation). The variation of maximums 17 h (UT) – 230 % (summer to winter) and 9 h (UT) – 2 600 % (local thunderstorms in summer). The 11-year variation is a half-wave with the maximum of 1 year earlier than the minimum of solar activity. The flow of atmospheric is in an antiphase with the solar activity and in a phase with the variation of cosmic rays. From the maximum to the minimum of the solar activity (2001–2007) the change of radio pulse flow 3–7 UT has comprised 59 and 13 times; 15–19 UT comprised 38 and 5 times; 8–12 UT comprised 34 and 8 in winter and summer, respectively. According to our observations, by registering radio signals of a radio navigation system RSDN-20, in the radio path Novosibirsk – Yakutsk the change of attenuation from the minimum to the maximum of the solar activity is 120 %. Taking into account the propagation, the ratio between the number of atmospheric, accepted in the minimum of the solar activity (2009) and the maximum (2013) for summer months is 159 %.

Keywords: atmospheric; thunderstorm activity; solar activity; radio wave propagation; galactic cosmic rays.

References

1. Remizov L.T. *Estestvennye radiopomekhi* (Natural interference). Moscow, Nauka Publ., 1985, 196 p. (in Russ.).

2. Aleksandrov M.S. Issledovanie atmosferykh radiopomekh ONCh- i NCh-diapazonov i ikh istochnikov (The study of atmospheric radio interference VLF and LF bands and their sources). *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki*, 1998, no. 10, pp. 3–25. (in Russ.).

3. Panyukov A.V., Buduev D.V., Malov D.N. Sistemy passivnogo monitoringa grozovoy deyatel'nosti (Passive monitoring systems of thunderstorm). *Vestnik YuUrGU. Seriya "Matematika, fizika, khimiya"*, 2003, Issue 4, no. 8(24), pp. 11–20. (in Russ.).

4. Panyukov A.V. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie raspredelennoy seti grozopelen-gatorov-dal'nomerov (Mathematical and software support of distributed network of thunderstorm pelen-gation and distance measuring). *VI Rossiyskaya konferentsiya po atmosfernomu elektrichestvu, Nizhniy Novgorod, 1–7 oktyabrya 2007* (Proceedings of the VI Russian Conference on Atmospheric Electricity, Nizhniy Novgorod, October 1–7, 2007), Nizhniy Novgorod, IPF RAN, Publ., pp. 255–256. (in Russ.).
5. Panyukov A.V., Bogushov A.K. The Spectral Statistical Method for Determining the Location Parameters of a Dipole Source of Electromagnetic Radiation. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, Vol. 59, Issue 4, pp. 278–288. DOI: 10.1007/s11141-016-9696-4
6. Likhter Ya.I. *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1966, Vol. 6, no. 4, pp. 795–796. (in Russ.).
7. Kleymenova Z.P. *Metrologiya i gidrologiya*, 1967, no. 8, pp. 64–68. (in Russ.).
8. Mullayarov V.A., Kozlov V.I., Karimov R.R. Effect of variations in the solar-wind parameters on thunderstorm activity. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, Vol. 49, Issue 8, pp. 1299–1301. DOI: 10.1134/S0016793209080556
9. McKerrow C.A. Some Measurements of Atmospheric Noise at Low and Very Low Frequencies in Canada. *Journal of Geophysical Research*, 1960, Vol. 65, no. 7, pp. 1911–1926. DOI: 10.1029/JZ065i007p01911
10. Kozlov V.I., Fedorova G.V., Shabaganova S.N. *Vestnik Yakutskogo gosudarstvennogo univer-siteta*, 2009, Vol. 6, no. 4, pp. 29–34. (in Russ.).
11. Karimov R.R., Kozlov V.I., Korsakov A.A., Mullayarov V.A., Melchinov V.P. Variations of very low frequency signal parameters of radio navigation stations, registrated in Yakutsk. *Sovremennye problemy distantsionnoy zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, no. 4, pp. 57–62. (in Russ.).
12. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B., Rodger C.J. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network. *Radio Science*, 2012, Vol. 47, p. RS6005 (9 p). DOI: 10.1029/2012RS005049.
13. Thomson N.R., Clilverd M.A. Solar cycle changes in daytime VLF subionospheric attenuation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, Vol. 62, no. 7, pp. 601–608. DOI: 10.1016/s1364-6826(00)00026-2
14. Scott C.J., Harrison R.G., Owens M.J., Lockwood M., Barnard L. Evidence for solar wind modulation of lightning. *Environmental Research Letters*, 2014, Vol. 9, no. 5, p. 055004 (12p). DOI:10.1088/1748-9326/9/5/055004.
15. Williams E., Guha A., Boldi R., Satori G., Koloskov A., Yampolski Yu. Global Circuit Re-sponse to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? *XV International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2014)*, June 15–20, 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.
16. Siingh D., Kumar P.R., Kulkarni M.N., Singh R.P., Singh A.K. Lightning, convective rain and solar activity – Over the South/Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 2013, Vol. 120–121, pp. 99–111. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.07.026
17. Pereira F.B., Priyadarsini G., Girish T.E. *A possible relationship between global warming and lightning activity in India during the period 1998–2009*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1012/1012.3338.pdf>

Received October 5, 2016