

Министерство науки и высшего образования РФ
Геофизическая обсерватория «Борок» –
филиал ФГБУН Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

МАТЕРИАЛЫ
ШЕСТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

БОРОК
2–6 ОКТЯБРЯ 2023 Г.

Ярославль

2023

УДК 621.3.01(063)

ББК 31.211я431

Г54

Г54 **Глобальная электрическая цепь** : материалы шестой Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН ; отв. ред. С. В. Анисимов. – Ярославль : Филигрань, 2023. – 112 с. (Шестая Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь», 2–6 октября 2023 г., Борок).

ISBN 978-5-6050550-4-4

Ответственный редактор:

д.ф.-м.н. С. В. Анисимов

В сборнике материалов шестой Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований глобальной электрической цепи. Для ученых, работающих в области глобальной электрической цепи, атмосферного электричества, геомагнетизма, физики атмосферы и смежных областях, преподавателей и студентов вузов.

Проведение конференции и издание материалов осуществлено при финансовой поддержке ННГУ и ГО «Борок» ИФЗ РАН.

ISBN 978-5-6050550-4-4

© ГО «Борок» ИФЗ РАН
макет, оформление, верстка, 2023
© Коллектив авторов, текст

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Анисимов С. В. – д.ф.-м.н., ГО «Борок» ИФЗ РАН, Борок (председатель);
2. Глико А. О. – академик РАН, д.ф.-м.н., ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва;
3. Гвишиани А. Д. – академик РАН, д.ф.-м.н., ГЦ РАН, Москва;
4. Мареев Е. А. – академик РАН, д.ф.-м.н., ИПФ им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород;
5. Мохов И. И. – академик РАН, д.ф.-м.н., ИФА им. А. М. Обухова РАН, Москва;
6. Эпов М. И. – академик РАН, д.т.н., ИНГГ им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск;
7. Тихоцкий С. А. – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва;
8. Еланский Н. Ф. – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., ИФА им. А. М. Обухова РАН, Москва;
9. Жмур В. В. – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., МФТИ, Москва;
10. Медведев А. В. – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., ИСЗФ СО РАН, Иркутск;
11. Катцов В. М. – д.ф.-м.н., ГГО им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург;
12. Репина И. А. – д.ф.-м.н., ИФА им. А. М. Обухова РАН, Москва;
13. Денисенко В. В. – д.ф.-м.н., ИВМ СО РАН, Красноярск;
14. Калинин А. В. – д.ф.-м.н., ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород;
15. Морозов В. Н. – д.ф.-м.н., ГГО им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург;
16. Нагорский П. М. – д.ф.-м.н., профессор, ИМКЭС СО РАН, Томск;
17. Нургалиев Д. К. – д.г.-м.н., профессор, ИГиНГТ КФУ, Казань;
18. Свертилов С. И. – д.ф.-м.н., НИИЯФ МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва;
19. Евтушенко А. А. – к.ф.-м.н., ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород;
20. Ильин Н. В. – к.ф.-м.н., ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород;
21. Шлюгаев Ю. В. – к.ф.-м.н., ИПФ им. А. В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород.

Конференция организована при финансовой поддержке
ННГУ и ГО «Борок» ИФЗ РАН

ПРЕДИСЛОВИЕ

Шестая Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» (ГЭЦ'2023) организована Геофизической обсерваторией «Борок» — филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ГО «Борок» ИФЗ РАН) при поддержке Нижегородским государственным университетом им. Н.И.Лобачевского (ННГУ), и пройдет со 2 по 6 октября 2023 г. в пос. Борок Ярославской области.

ГЭЦ'2023 планируется как закономерное продолжение Всероссийских конференций «Глобальная электрическая цепь», прошедших в 2013, 2015, 2017, 2019 и 2021 гг. в ГО «Борок» ИФЗ РАН. В конференциях приняли участие специалисты из ведущих геофизических центров России: ААНИИ (С.-Петербург), ВГИ (Нальчик), ГАГУ (Горно-Алтайск), ГГО (С.-Петербург), ГО «Борок» ИФЗ РАН (Борок), ГЦ РАН (Москва), ИВМ СО РАН (Красноярск), ИДГ РАН (Москва), ИЗМИРАН (Троицк), ИКИР ДВО РАН (Паратунка), ИКФИА СО РАН (Якутск), ИМКЭС СО РАН (Томск), ИПГ (Москва), ИПФ РАН (Н. Новгород), ИФА РАН (Москва), ИФЗ РАН (Москва), ИЯИ РАН (Москва), МИФИ (Москва), НИИЯФ МГУ (Москва), НИРФИ ННГУ (Н. Новгород), ПГИ КНЦ РАН (Апатиты), РГМУ (С.-Петербург), С-ПБГУ (С.-Петербург), ТГУ (Томск), ЦАО (Долгопрудный), ФИАН (Москва), ЮУрГУ (Челябинск), ЮФУ (Таганрог, Ростов-на-Дону) и др., а также Украины (ИГН НАН, РАИ НАН) и Казахстана (ИКТТ). В ходе дискуссий и в итоговых решениях конференций был отмечен высокий научный уровень представленных докладов, затронуты актуальные фундаментальные вопросы атмосферного электричества, математического моделирования глобальной электрической цепи, геофизических наблюдений, интерпретации данных аэроэлектрических наблюдений. Конференции стали заметными событиями в жизни геофизического сообщества.

Основная задача конференции ГЭЦ'2023 состоит в представлении и обсуждении важнейших результатов теоретических и экспериментальных исследований геофизических процессов формирования глобальной электрической цепи. В конференции примут участие исследователи, работающие в области физики атмосферы, атмосферного электричества, геомагнетизма, магнитосферно-ионосферной физики, геоэлектродинамики и смежных областях теоретической и наблюдательной геофизики. Конференция послужит развитию творческих научных связей российских ученых с целью решения актуальных проблем геоэлектромагнитного окружения Земли.

Конференция организована при финансовой поддержке ННГУ (Программа развития ННГУ им. Лобачевского «Приоритет-2030») и ГО «Борок» ИФЗ РАН.

Председатель программного комитета,
директор ГО «Борок» ИФЗ РАН, доктор физ.-мат. наук
С. В. Анисимов

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Современное состояние исследований глобальной электрической цепи постоянного тока

Е. А. Мареев^{1,2}, Н. Н. Слюняев¹, Н. В. Ильин¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В.Гопонова-Грехова РАН, Н.Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

Доклад посвящен обзору современного состояния исследования классической проблемы вариабельности глобальной электрической цепи (ГЭЦ) постоянного тока. За последние пять лет актуальность проблемы моделирования глобальной электрической цепи и выяснения ее роли в погодноклиматической системе Земли существенно возросла, что связано с повышенным вниманием к вопросам экологии и климата [1–3]. Резко растет интерес исследователей к опасным явлениям, связанным с атмосферным электричеством (экстремальные грозы и разряды молний, ливни, торнадо, пылевые бури, пожары). Особый интерес вызывают эффекты возможного воздействия атмосферного электричества на формирование облаков и на состав атмосферы, на живые системы, на процесс фотосинтеза и биосферу в целом. Наибольшее внимание в обзоре уделено результатам, полученным в последнее время (в широкой кооперации) сотрудниками ИПФ РАН.

Прежде всего, это цикл статей, посвященных выявлению связей ГЭЦ с основными климатическими модами. Моделирование многолетней динамики атмосферы с помощью модели WRF (Weather Research and Forecasting model) и данных реанализа метеорологических наблюдений позволяет, используя предложенную в последнее время параметризацию ионосферного потенциала, детально воспроизводить эволюцию ГЭЦ постоянного тока, изучать связь электрических явлений с глобальными климатическими модами, такими как Эль-Ниньо – Южное Колебание, осцилляция Маддена–Джулиана [4–9].

Основные направления дальнейшего развития предложенных подходов включают переход на более мелкомасштабное моделирование и адаптацию разработанных параметризаций ионосферного потенциала, более последовательный учет турбулентности в облаках и в пограничном слое [10, 11], учет влияния аэрозолей на электрические процессы в облаках. В частности, открываются перспективы разработки параметризаций из первых принципов не только ионосферного потенциала, но и частоты молниевых вспышек, пригодных для использования как над сушей, так и над океаном [12]. Здесь необходимы новые данные по баллонному зондированию атмосферы для верификации моделирования.

В ближайшее время продолжится изучение биологических и биохимических проявлений электромагнитного окружения Земли. Особое внимание будет уделено связи ГЭЦ с циклом углекислого газа на планете [13].

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке Программы развития ННГУ им. Лобачевского «Приоритет-2030».

Литература

1. *Lavigne T., Liu C., Deierling W., Mach D.* Relationship between the global electric circuit and electrified cloud parameters at diurnal, seasonal, and interannual time-scales // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. V. 122, № 16. P. 8525–8542.
2. *Jánský J., Lucas G.M., Kalb C., Bayona V., Peterson M.J., Deierling W., Flyer N., Pasko V.P.* Analysis of the diurnal variation of the global electric circuit obtained from different numerical models // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. V. 122, № 23. P. 12906–12917.
3. *Ilin N.V., Slyunyaev N.N., Mareev E.A.* Toward a realistic representation of global electric circuit generators in models of atmospheric dynamics // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. V. 125, № 6.
4. *Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A., Price C.G.* A new link between El Niño—Southern Oscillation and atmospheric electricity // *Env. Res. Lett.* 2021. V. 16, № 4. P. 044025.
5. *Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Mareev E.A., Price C.G.* The global electric circuit land–ocean response to the El Niño—Southern Oscillation // *Atmos. Res.* 2021. V. 260. P. 105626.
6. *Slyunyaev N.N., Frank-Kamenetsky A.V., Ilin N.V., Sarafanov F.G., Shatalina M.V., Mareev E.A., Price C.G.* Electric field measurements in the Antarctic reveal patterns related to the El Niño—Southern Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, № 21. P. e2021GL095389.
7. *Kozlov A.V., Slyunyaev N.N., Ilin N.V., Sarafanov F.G., Frank-Kamenetsky A.V.* The effect of the Madden–Julian Oscillation on the global electric circuit // *Atmos. Res.* 2023. V. 284. P. 106585.
8. *Ильин Н.В., Шаталина М.В., Слюняев Н.Н.* Моделирование сезонной динамики суточной вариации глобальной электрической цепи // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2019. Т. 55, № 5. С. 76–84.
9. *Harrison R.G., Nicoll K.A., Joshi M., Hawkins E.* Empirical evidence for multidecadal scale global atmospheric electric circuit modulation by the El Niño–Southern Oscillation // *Environ. Res. Lett.* 2022. V. 17, № 12. P. 124048.
10. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A.S.* Turbulent electric current in the marine convective atmospheric boundary layer // *Atmos. Res.* 2019. V. 228. P. 86–94.
11. *Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E., Slyunyaev N., Rycroft M.J.* Extensive layer clouds in the global electric circuit: their effects on vertical charge distribution and storage // *Proc. Roy. Soc. A.* 2020. V. 476, № 2238. P. 20190758.
12. *Mareev E., Ilin N., Slyunyaev N., Volodin E., Price C.* Towards a realistic parameterization of lightning over land and ocean // 28th International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Berlin, Germany, 11–20 July 2023.
13. *Price C., Bekenshtein R., Mareev E.* Is Amazon deforestation decreasing the number of thunderstorms over South America? // *Q. J. Roy. Met Soc.* 2023. V. 149, № 755. P. 2514–2526.

Стационарная модель токовой цепи с учетом аэрозольной составляющей атмосферы

В. Н. Морозов

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова Росгидромета, С.-Петербург

Рассматривается обобщение стационарной модели токовой цепи, предложенной в работе [1]. на случай учета аэрозольной составляющей атмосферы. Основные уравнения для решения данной задачи представляются в следующем виде:

$$-(\lambda(r, \theta, \phi) \nabla \varphi_f) = 0, \quad \varphi_f|_{r=R} = 0, \quad \varphi_f|_{r=R+H} = \varphi_\infty, \quad (1)$$

$$-(\lambda(r, \theta, \phi) \nabla \varphi_s) = S(r, \theta, \phi), \quad \varphi_s|_{r=R} = 0, \quad \varphi_s|_{r=R+H} = 0, \quad (2)$$

где $\lambda(r, \theta, \phi)$ — электрическая проводимость атмосферы, R — радиус сферической Земли, φ — потенциал электрического поля.

Для электрической проводимости с учетом аэрозольной составляющей атмосферы используется представление:

$$\lambda(r) = \eta \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, \quad r \in [r, r_1], \quad (3)$$

$$\lambda_1(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}, \quad r \in [r_1, R+H], \quad (4)$$

где: η — величина, определяющая уменьшение электрической проводимости за счет присоединения ионов к аэрозольным частицам [2].

В настоящем сообщении приводятся результаты расчета изменений потенциала ионосферы за счет изменения электрической проводимости, вызванного присутствием аэрозольных частиц (3). Используя разложение по сферическим гармоникам [1], принимая во внимание нулевую сферическую гармонику, определяя постоянные входящие в решение с помощью условий непрерывности потенциала и плотности электрического тока и используя условие баланса тока, текущего в области отсутствия, с током в области действия грозовых генераторов, получим для потенциала ионосферы выражение:

$$\varphi_\infty = \frac{1}{\eta \alpha} \int_{r_1}^{R+H} \frac{S_{00,m}(r)}{\lambda(r) \alpha} dr, \quad (5)$$

$$S_{00,m}(r) = f_m(r) \int_{\theta_1}^{\theta_2} e^{-\frac{r^2}{b^2}(\cos\theta - \cos\theta_m)^2} \sin\theta \int_{\phi}^{\phi_2} e^{-\frac{r^2}{b^2}(\phi - \phi_m)^2} Y_{ij}(\theta, \phi) d\theta d\phi,$$

$$f_m(r) = I_m^+ e^{-\frac{(r-r_m)^2}{a^2}} + I_m^- e^{-\frac{(r-r_m)^2}{a^2}},$$

где: m — номер генератора, I_m^+ — ток, даваемый положительным зарядом облака, I_m^- — ток, даваемый отрицательным зарядом облака.

Вычисления, приведенные в [2], показывают, что при концентрации аэрозольных частиц, равной 10^9 м^{-3} величина $\eta = 0.82$, то есть при наличии в приземном слое аэрозольных частиц, потенциал ионосферы увеличивается. Отметим также, что для получения общего выражения для потенциала ионосферы формулу (3) надо просуммировать по числу облаков..

Литература

- 1 *В.Н. Морозов* Стационарная модель токовой цепи с учетом пространственного распределения грозových генераторов. Труды ГГО. Вып. 601. С. 46–64.
- 2 *В.Н. Морозов* Влияние глобального распределения аэрозольных частиц на электрический потенциал ионосферы. Труды ГГО. Вып. 577. С. 106–112.

Моделирование глобальной электрической цепи переменного тока на основе данных о глобальной молниевой активности

Н. Н. Слюняев¹, Ф. Г. Сарафанов^{1,2}

¹ Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

Глобальной электрической цепью (ГЭЦ) переменного тока называют распределение низкочастотных электромагнитных полей в атмосфере, поддерживаемое молниевыми разрядами. В первую очередь сюда относятся шумановские резонансы — колебания в резонаторе Земля – ионосфера.

Литература, посвящённая теоретическому изучению шумановских резонансов, довольно обширна [1–4]. Со времени открытия этого явления в 1950-х – 1960-х годах появилось множество моделей, способных объяснить наблюдения с хорошей точностью. При этом исторически шумановские резонансы обычно изучались в первую очередь в контексте влияния на них возмущений ионосферы; в первых численных моделях даже проводимость, как правило, задавалась именно на ионосферных высотах [1, 2].

Вместе с тем в простейшем приближении задача о резонаторе Земля – ионосфера может быть также рассмотрена без существенного внимания к ионосферным эффектам — с использованием обычного профиля проводимости, применяемого, например, для анализа ГЭЦ постоянного тока. Этого оказывается достаточно для воспроизведения реалистичной картины резонансов.

Важный аргумент в пользу фокуса на атмосфере (а не ионосфере) при моделировании ГЭЦ переменного тока — возросший в последние годы интерес к роли поддерживающих её источников (молниевых разрядов). Уже в первых работах на тему моделирования шумановских резонансов авторы пытались учитывать распределение молниевых разрядов по земной поверхности [2], однако лишь сравнительно недавно наблюдения с помощью спутников и глобальных систем грозопеленгации сделали возможным детальное исследование ряда связанных с этим вопросов.

В настоящем докладе представлена численная модель ГЭЦ переменного тока, в которой для параметризации источников используются данные о мировой молниевой активности. С математической точки зрения задача в сферической геометрии в предположении одинакового профиля проводимости по всей Земле допускает формулировку в терминах одной потенциальной функции, через которую можно выразить все поля. Саму эту потенциальную функцию можно представить в виде ряда по сферическим гармоникам, коэффициенты которого (зависящие от радиальной переменной) будут

находиться с помощью решения линейных обыкновенных дифференциальных уравнений.

В задачах о шумановских резонансах такой подход хорошо известен [3, 4], однако в данном случае особое внимание уделено интеграции расчётов с данными глобальной грозопеленгационной сети WWLLN. Пример спектра шумановских резонансов, рассчитанного по источникам из WWLLN, показан на рис. 1. Построенная модель может быть использована для исследования взаимосвязей между климатическими изменениями и электромагнитным окружением Земли.

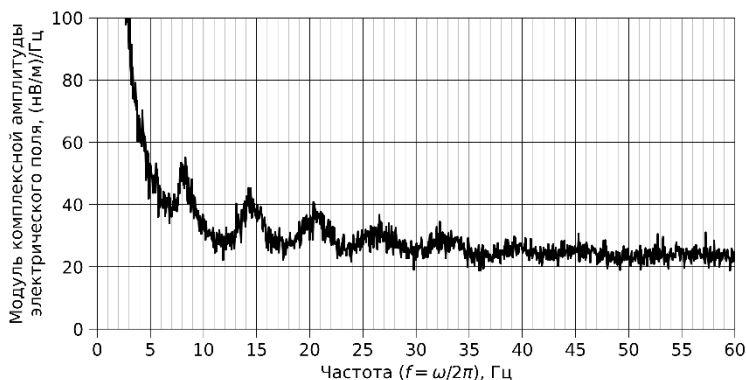


Рис. 1. Результаты расчёта среднего спектра шумановских резонансов в точке 45° с.ш., 180° в.д. за 1 июля 2020 года по источникам, задаваемым на основе данных грозопеленгационной сети WWLLN (при усреднении 48 расчётов по 30-минутным интервалам времени) с экспоненциальным профилем проводимости в атмосфере.

Создание математической модели выполнено при финансовой поддержке проекта НОМЦ «Математика технологий будущего». Моделирование на основе реального распределения источников выполнено при поддержке программы развития ННГУ «Приоритет-2030» в рамках стратегического проекта «Комфортная окружающая среда».

Литература

1. *Galejs, J.* Terrestrial extremely low frequency noise spectrum in the presence of exponential ionospheric conductivity profiles // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66, № 9. P. 2787–2792. 1961.
2. *Raemer, H.R.* On the spectrum of terrestrial radio noise at extremely low frequencies // *J. Res. Natl. Bur. Stand., Sec. D: Radio Prop.* 1961. V. 65D, № 6. P. 581–593.
3. *Блиох, П.В., Николаенко, А.П., Филиппов, Ю.Ф.* Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля — ионосфера. – Киев: Наукова думка, 1977.
4. *Surkov, V., Hayakawa, M.* Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. – Tokyo: Springer, 2014.

**ФОРМИРОВАНИЕ
ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ —
ГРОВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО,
МОЛНИЕВЫЕ РАЗРЯДЫ
И ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ,
ИОНОСФЕРНЫЕ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ
ВОЗМУЩЕНИЯ**

Динамика изменения состава отрицательных ионов вокруг гидрометеоров в грозовом облаке

Н. Л. Александров^{1,2}, А. А. Пономарев^{2,3}, А. А. Сысов², Д. И. Иудин²

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный

² Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

³ Высшая школа экономики, Москва

Один из новых обсуждаемых механизмов зарождения молниевых разрядов в грозовом облаке основан на индуцированном шумом кинетическом переходе, происходящем в стохастическом поле заряженных гидрометеоров [1]. Ключевым моментом в этом сценарии является эстафетный процесс, приводящий к постепенному росту концентрации отрицательных ионов, способных служить источником свободных электронов даже в допробойных электрических полях. Скорость отлипания электронов от нагреваемых в поле отрицательных ионов существенно зависит от сорта этих ионов.

В данной работе выполнено численное 0D моделирование кинетики отрицательных ионов, рождаемых в бесстримерной отрицательной короне, которая возникает около гидрометеора в грозовом облаке. Расчеты проведены для разных высот над поверхностью земли, что сказывается на давлении и температуре воздуха, а также на концентрации присутствующих в нем малых нейтральных компонентов. Основная цель исследования — определить электрические поля, при которых отрицательные ионы могут служить источником свободных электронов, несмотря на существенное изменение состава ионов.

По аналогии с процессами для положительных ионов построена кинетическая схема и определены константы скорости образования и гибели различных отрицательных ионов в воздухе в зависимости от его параметров и приведенного электрического поля. Учтена зависимость констант скорости образования и гибели кластерных ионов от давления и температуры газа. С использованием этих констант выполнено численное моделирование динамики изменения состава отрицательных ионов в условиях грозового облака как в отсутствие сильного электрического поля (модель дрейфовой зоны бесстримерной отрицательной короны около гидрометеора), так и при его наличии. Расчеты без сильного электрического поля показали, что в хорошем приближении эволюцию отрицательных ионов, образованных в бесстримерной отрицательной короне около гидрометеора, можно описывать только с учетом ионов $O_2-(H_2O)_k$, O_4^- и O_2^- . Последующие вычисления при наложении сильного электрического поля показали, что в весьма умеренных приведенных полях (на уровне 65 Тд и выше) за времена менее 1 мс происходит не только развал сложных ионов типа $O_2-(H_2O)_k$, и O_4^- , но и освобождаются электроны при разрушении отрицательных ионов.

Из результатов данной работы можно сделать вывод о том, что усложнение и гидратация отрицательных ионов, образованных в бесстримерной отрицательной короне около гидрометеора в грозовом облаке, не мешает этим ионам оставаться потенциальным источником свободных электронов в грозовом облаке при наложении весьма умеренных электрических полей, которые могут возникать, например, при сближении двух заряженных гидрометеоров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-11-00245.

Литература

1. *Иудин Д.И., Сысоев А.А., Раков В.А.* Проблемы инициации и развития молнии // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2021. Т. LXIV. вып. 11. С. 867–894.

Экспериментальное исследование влияния грозовой активности на структуру ионосферы

В. П. Антонова, Г. И. Гордиенко, В. Ю. Луценко, С. В. Крюков
Институт Ионосферы, Алматы, Республика Казахстан

Представлены результаты расширенного исследования событий грозовой активности на высокогорной Тянь-Шаньской станции (3340 м над уровнем моря) за 11-летний период с привлечением данных о параметрах ионосферы, геомагнитной активности и геоэффективных событиях в околоземном космическом пространстве. Все грозовые события (125 случаев) классифицированы по типам развития молниевых разрядов: положительные, отрицательные и смешанные (положительные и отрицательные).

Подтверждена тенденция появления грозовой активности с вероятностью ~70% после воздействия на атмосферу/ионосферу Земли геоэффективных выбросов корональных масс (СМЕ), высокоскоростных потоков солнечного ветра (HSS) с запаздыванием на 1–2 суток и более, что согласуется с результатами исследований [1, 2]. Наблюдаются заметные изменения состояния нижней ионосферы в эти периоды. Максимум и минимум грозовой активности на Тянь-Шаньской высокогорной станции соответствуют кривой распределения суточной активности гроз для азиатского региона в работе [3]. Воздушные течения, возникающие над океаном, преодолев тысячи километров, переносят влагу на Тянь-Шань и определяют особенности погоды и грозовую активность на станции. Количество гроз с положительными разрядами не превышает 24% [4].

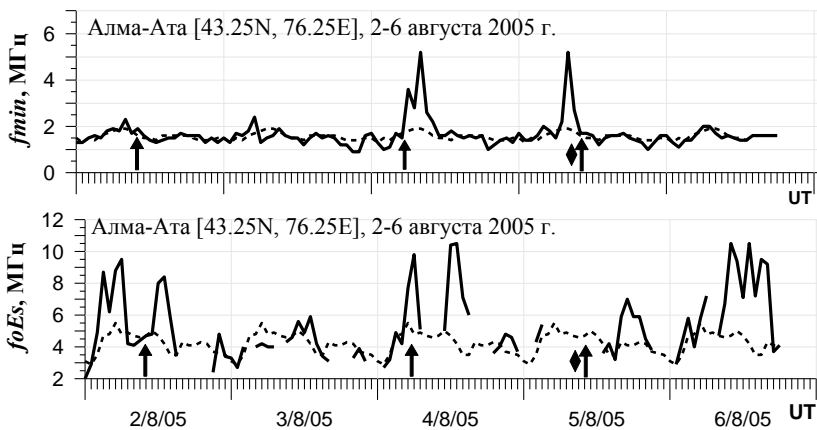


Рис. 1. Вариации f_{min} и $foEs$ 2–6 августа 2005 г

Проведено исследование вариаций параметров верхней и нижней ионосферы во время грозовой активности в условиях спокойного геомагнитного поля за период 2005–2015 гг. Проанализировано 12 грозовых событий. Исключая событие 03.09.2008 года, все грозы сопровождались положительными разрядами, а именно с ними связывают высотные разряды, направленные в ионосферу. На рисунке 1 приведены вариации минимальной частоты отражения от ионосферы (f_{\min}) и критической частоты спорадического слоя Es. Символ \uparrow характеризует грозу с положительными разрядами, \blacklozenge — грозу с положительными и отрицательными разрядами.

Результаты исследования вариаций параметров ионосферы, ассоциируемые с воздействием грозовой активности, показали модификацию регулярного суточного хода полного электронного содержания, ТЕС. Модификация проявляется в виде изменений характера временного распределения полного электронного содержания, типичного для летнего сезона средних широт: смещение полуденного максимума суточного хода на более поздние часы; сглаживание эффекта летней аномалии, характерной для средних широт северного полушария.

На фоне суточного хода обнаружено появление волнообразных возмущений с амплитудой порядка 3–4 ТЕСч и периодом 2–5 ч. В области грозового события структура волновых возмущений полного электронного содержания и параметров области F изменяется в диапазоне 60–120 мин. Амплитуда отклонений полного электронного содержания в результате грозового эффекта для большинства случаев составляет 1–2 ТЕСч.

В дни с грозовой активности наблюдалось повышение значений f_{\min} , что говорит о повышении уровня поглощения радиоволн в D-области ионосферы и интенсификация спорадического слоя E, которая указывает на повышение уровня электронной концентрации на высотах 100–120 км.

Литература

1. *Ермаков В.И., Стожков Ю.И.* Влияние активных областей Солнца на глобальную грозовую активность и погоду на Земле // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2003. №3. С. 9–25.
2. *Reiter R.* Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity / Amsterdam, New York: Elsevier, 1992. – 541p.
3. *Harrison R.G., Nicoll K.A.* Fair weather criteria for atmospheric electricity measurements // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2018. V. 179. P. 239–250.
4. *Antonova V., Lutsenko V., Gordiyenko G., Kryukov S.* Impact of Various Disturbance Sources on the Atmospheric Electric Field and Thunderstorm Activity of the Northern Tien-Shan // Atmosphere. 2023. V. 14, №1: 164.
<https://doi.org/10.3390/atmos14010164>.

Результаты лабораторного моделирования молниевго разряда на установке «Гроза ГИН-1МВ»

*В. В. Богомолов^{1,2}, Е. А. Мареев³, Ю. В. Шлюгаев³, М. В. Шаталина³,
Ф. Г. Сарафанов³, А. А. Белов¹, А. Ф. Июдин¹, П. А. Климов¹, Р. Е. Сараев¹,
С. И. Свертилов^{1,2}, И. В. Яшин¹*

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына, Москва

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва

³ Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

Важным методом исследования процессов, происходящих в электрических разрядах, является их лабораторное моделирование в экспериментах с длинными искрами [1, 2]. Условия лабораторного эксперимента обеспечивают исследователям больше возможностей относительно условий изучения естественных молний, так как оптические камеры и детекторы могут быть гарантированно расположены вблизи разряда, а параметры самого разряда также поддаются контролю. Указанное обстоятельство делает лабораторный эксперимент по обнаружению энергичных фотонов, созданных длинной искрой, полезным как с точки зрения развития теории разряда вообще, так и для изучения естественных молний в частности. В этом случае для регистрации жесткого электромагнитного излучения, которое может возникать в подобных экспериментах, можно использовать и аппаратуру однотипную с той, что применяется в орбитальных наблюдениях.

Для проведения лабораторного моделирования молниевго разряда использовался генератор Маркса «Гроза ГИН-1 МВ», находящийся в ИПФ РАН. Этот генератор состоит из 13 этажей, на которых находятся конденсаторы общей ёмкостью 1 мкФ на этаж. Конденсаторы могут заряжаться до напряжения 100 кВ, т. е. напряжение разряда может достигать, примерно, 1 МВ с учетом КПД установки.

В ходе лабораторного моделирования осуществлялась регистрация рентгеновских и гамма (с энергией более 10 кэВ), УФ (240 – 400 нм) и красных (600 – 800 нм) фотонов с помощью фотометров-спектрометров разработки НИИЯФ МГУ, однотипных с теми, которые используются для регистрации УФ и рентгеновского излучения высотных разрядов в орбитальных экспериментах. Для регистрации рентгеновских фотонов использовался сцинтилляционный спектрометр СГ (диапазон энергий регистрируемых фотонов 0.02 – 10 МэВ, эффективная площадь 50 см², энергетическое разрешение ~10% на линии 662 кэВ, временное разрешение 10 мкс), а также детектор ДеКоР-2 (диапазон энергий регистрируемых фотонов 0.01 – 1 МэВ, эффективная площадь 64 см², временное разрешение 10 мкс). Для регистрации УФ фотонов использовался телескоп-спектрометр МЛТ (диа-

пазон длин волн регистрируемых фотонов в фотометрическом режиме 240 – 400, 600 – 800 нм, в спектрометрическом режиме регистрация фотонов с длинами волн 337, 391, 427 нм., диаметр входного окна фотометра 5 см, диаметр входных окон спектрометрических каналов 1 см, временное разрешение 1 мкс).

При проведении измерений приборы СГ и ДеКоР-2 были размещены на металлическом основании на расстоянии ~1.5 метра от генерируемой молнии и закрыты экранирующим железным кожухом. Выходные импульсные сигналы с приборов поступали на находящийся том же кожухе преобразователь электрического сигнала в оптический, который по оптоволоконному кабелю передавался в другое помещение, где располагался блок, производящий обратное преобразование оптического сигнала в электрический, а также осциллограф, который производил запись временной развёртки по нескольким каналам. Прибор МЛТ также располагался в металлическом защитном боксе на расстоянии примерно 5 м от разрядного промежутка, при этом его входные окна были направлены непосредственно на разряд.

Была проведена серия измерений из нескольких десятков разрядов. Для этих разрядов были записаны осциллограммы, которые можно обрабатывать с помощью электронных таблиц. В ходе измерений зафиксировано несколько случаев регистрации рентгеновских фотонов с энергией от ~ 10 до 50 кэВ, в том числе одновременно несколькими детекторами. Форма импульсов указывает на то, что это реальные рентгеновские кванты, а не помехи в электрических цепях приборов, создаваемых искусственным разрядом. Что касается регистрации УФ и оптического излучения, то для большинства измерений регистрировались сигналы, связанные с разрядом.

Полученные указания на то, что удалось зарегистрировать рентгеновские фотоны в ходе проведенных лабораторных экспериментов по моделированию молниевых разрядов, в целом не противоречат предсказаниям теоретических моделей и данным орбитальных и наземных наблюдений.

Литература

1. *Bogatov N.A., Syssoev V.S., Sukharevsky D.I., Orlov A.I., Rakov V.A.*, An Experimental Study of the Breakthrough-Phase and Return-Stroke Processes in Long Sparks. // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2022. V. 127, P. e2021JD035870. DOI: 10.1029/2021jd035870.
2. *Gushchin M.E., Korobkov, S.V. Zudin I.Yu.* Nanosecond electromagnetic pulses generated by electric discharges: Observation with clouds of charged water droplets and implications for lightning. // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V.48.P. e2020GL092108. DOI: 10.1029/2020GL092108.

Анализ плотности распределения спрайтов над Россией

А. А. Евтушенко

Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

На основе предложенной ранее модели параметризации для исследования глобального распределения спрайтов по данным грозопеленгационной системы WWLLN [1] был проведен анализ спрайтовой активности над территорией России за период 2015–2021 годов. Инициация спрайтов, как и других видов высотных разрядов, тесно связана с развитием областей с высокой молниевой активностью. Экстремально мощные разряды облако-земля приводят к переносу значительного заряда и создают условия для высотных разрядов, в частности, спрайтов. Проведённые исследования показывают, что количество спрайтов над Россией существенно изменяется год к году: от 394 в 2019 году, до 2354 в 2015 году. Неожиданным является тот факт, что динамика общего количества спрайтов над Россией близка к глобальному тренду: с 2015 до 2019 года наблюдается плавное падение количества спрайтов, с последующим ростом в 2020–2021 годах, хотя можно было ожидать, что изменение спрайтовой активности в средних широтах имеет большую амплитуду.

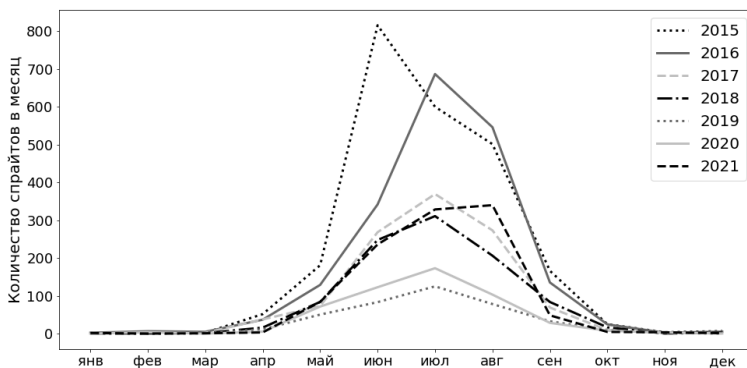


Рис. 1. Сезонная динамика количества спрайтов за 2015–2021 гг.

Спрайтовая активность над Россией имеет ярко выраженную сезонность, так как количество спрайтов коррелирует с молниевой активностью. В период с ноября по март количество спрайтов пренебрежимо мало и составляет менее 2% от общего количества. Обычно в июле наблюдается наибольшее количество спрайтов, но может быть смещение на июнь и август в отдельные годы.

Благодарности. Настоящая работа выполнена при поддержке Программы развития ННГУ им. Лобачевского «Приоритет-2030».

Литература

1. Evtushenko A.A., Ilin N.V., Svechnikova E.K. Parameterization and global distribution of sprites based on the WWLLN data // Atmos. Res. 2022. V. 276. P. 106272.

Переходные процессы в лидерной сети молнии

Д. И. Иудин^{1,2}, А. А. Сысоев^{1,2}

¹ Приволжский исследовательский медицинский университет, Н.Новгород

² Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

Дерево молниевых разрядов — сеть плазменных каналов — представляет собой специфическую транспортную систему, которая поддерживается квазиэлектростатическим потенциальным рельефом грозового облака и одновременно изменяет его. Структурная эволюция молнии сопровождается значительными морфологическими изменениями: появляются новые плазменные каналы, исчезают старые. В данной работе по аналогии с используемой для речных систем иерархической схемой Хортон — Штролера, анализируется асимметрия пространственного распределения ёмкости разномимённых частей разрядного дерева молнии. Обсуждается понятие точки нулевого индуцированного заряда или точки реверса. На основе парадигмы движущейся точки реверса [1–3] предложена классификация основных типов переходных процессов, связанных с реактивацией распавшихся ветвей доминирующего лидера, то есть лидера с превалирующим периферийным током. Показано, что транзиенты, вызванные реактивацией распавшихся ветвей доминирующего отрицательного лидера, являются полярными антиподами транзиентов, связанных с доминированием положительного лидера. Исследовано, при каких условиях уже на поздней стадии развития молнии отрицательный лидер становится доминирующим вместо положительного, сохраняющего свое первенство в подавляющем большинстве ситуаций. Выявлено, что переходные процессы сопровождаются перезарядкой чехла лидера, которая обеспечивает движение точки реверса в сторону доминирующего лидера. При этом погонный заряд высокопроводящей сердцевинки лидерного канала оказывается управляющим параметром процесса перезарядки чехла.

Схема динамики точки реверса и соответствующая классификация переходных процессов представлены на рис. 1. Интенсивность серого в окраске проводящих каналов соответствует абсолютной величине заряда чехла. Области сверху соответствуют положительному заряду, внизу — отрицательному. Круглые маркеры указывают точки реверса (нулевые уровни заряда чехла, окружающей тонкую сердцевину канала молнии). Стрелки, направленные вверх и вниз, указывают возможные направления движения точки реверса. Реактивированные ветви схематично показаны пунктирными линиями и пронумерованы от 1 до 6. События, представленные пунктирными линиями, соответствуют движению точки реверса к вершине положительного лидера и в сторону развития отрицательного лидера. Черные стрелки показывают направление тока в реактивированных каналах.

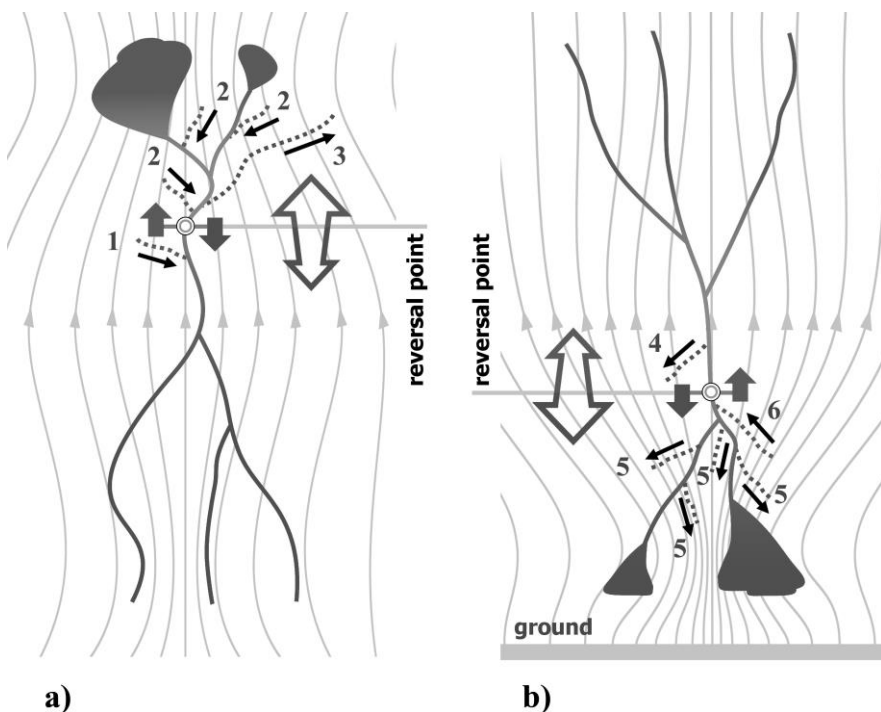


Рис. 1. Схема динамики точки реверса и соответствующая классификация переходных процессов. Основное направление распространения разряда молнии задается а) положительным лидером, б) нисходящим отрицательным лидером.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-11-00245.

Литература

1. *Iudin D.I.* Lightning as an Asymmetric Branching Network // *Atmospheric Research*, 2021, vol. 256, pp. 1–12.
2. *Иудин Д.И., Коровкин Н.В., Сысоев А.А., Хаякава М.* Разряд молнии как самоорганизующаяся транспортная сеть. Ч. 1. Концепция асимметричного разрядного дерева // *Электричество*, 2023, № 6. С. 77–88.
3. *Иудин Д.И., Коровкин Н.В., Сысоев А.А., Хаякава М.* Разряд молнии как самоорганизующаяся транспортная сеть. Ч. 2. Точка реверса и транзиенты молнии // *Электричество*, 2023, № 7. С. 66–76.

Однопунктовая радиопеленгация развития молниевых разрядов в КВ диапазоне

А. Н. Караштин¹, Ю. В. Шлюгаев^{1,2}

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт
ННГУ им.Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

² Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

Средне- и коротковолновый диапазоны для наблюдения радиоизлучения молниевых разрядов используются редко вследствие высокого уровня шумов и помех. Вместе с тем, на всех этапах развития молнии, исключая возвратный удар, излучение в этих диапазонах частот представляет собой преимущественно последовательность коротких биполярных импульсов с амплитудой для близких (до сотни километров) разрядов, значительно превышающей уровень помех [1]. В соответствии с этим широкополосный прием в данных диапазонах может быть использован для определения углов прихода радиоизлучения молниевых разрядов, а при наличии нескольких разнесенных приемных пунктов — и для их трехмерного картирования.

Представлены результаты пеленгации молниевых разрядов на основе наблюдений радиоизлучения в широком диапазоне частот (0.05–30 МГц) с высоким временным разрешением (тактовая частота съема данных 60 МГц), проводившихся в Нижегородской области (координаты приемного пункта 56.15° N, 44.32° E). В наблюдениях использовалась установка для регистрации волновой формы коротких электромагнитных импульсов, состоящая из четырех антенных модулей, аналогичных описанным в [2], разнесенных на расстояние около 300 м в восточно-западном направлении и около 75 м в север-южном.

Направление на источники радиоизлучения определялись исходя из разности времен прихода импульсов на разные антенные модули. Наличие четырех модулей позволяет организовать несколько пар базовых линий для пеленгации, что повышает точность определения углов прихода радиоизлучения, а также позволяет корректировать неточность временной привязки систем регистрации излучения.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания (проект FSWR-2023-0038).

Литература

1. *Gurevich A.V., Karashtin A.N.* Radio emission structure of cloud-to-ground lightning discharge // *Phys. Lett. A.* 2011. V. 375, № 7. P. 1128–1134.
2. *Караштин А.Н., Шлюгаев Ю.В., Гуревич А.В.* Коротковолновое радиоизлучение молнии // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2005. Т. 48, № 9. С. 800–809.

О полярности субмикросекундных импульсов радиоизлучения молниевых разрядов

А. Н. Караштин¹, Ю. В. Шлюгаев^{1,2}

¹ Научно-исследовательский радиопизический институт

ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

² Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

Наблюдения радиоизлучения грозовых облаков в широком диапазоне частот, перекрывающем средние и короткие волны, показывают, что на всех этапах развития, вплоть до возвратного удара, коротковолновое радиоизлучение молнии является преимущественно импульсным [1], и представляет собой последовательность биполярных субмикросекундных импульсов.

Данные импульсы генерируются в областях сильного электрического поля, и их начальная полярность (полярность первой части биполярного импульса) свидетельствует о направлении поля в области источника. При проведении наблюдений на поверхности земли вклад в регистрируемый сигнал дает только вертикальная компонента электрического поля.

Наблюдения радиоизлучения молниевых разрядов проводились в Нижегородской области (координаты приемного пункта 56.15°N, 44.32°E) с использованием рамочных антенн установки для регистрации волновой формы коротких электромагнитных импульсов. Предварительно рамочные антенны были откалиброваны по соответствию полярности принимаемых импульсов направлению электрического поля.

Предварительная стадия отрицательной молнии облако-земля начиналась редкими импульсами, как правило, соответствующими направлению вертикальной составляющей электрического поля вниз. В дальнейшем наблюдались импульсы обеих полярностей, частота следования которых заметно увеличивалась перед началом стадии ступенчатого лидера. Стадия развития ступенчатого лидера характеризовалась нарастанием частоты следования импульсов, соответствующих направлению электрического поля вверх, при спадании частоты следования импульсов противоположной полярности. Сопоставление с данными об углах прихода излучения показывает, что во все время развития молнии редкие импульсы обеих полярностей приходят с направления, соответствующего большим углам места. Увеличение частоты следования импульсов соответствует движению ступенчатого лидера вниз.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания (проект FSWR-2023-0038).

Литература

1. *Gurevich A.V., Karashitin A.N.* Radio emission structure of cloud-to-ground lightning discharge // Phys. Lett. A. 2011. V. 375, № 7. P. 1128– 1134.

Влияние релаксации поверхностного натяжения на капиллярные осцилляции заряженной капли

Н. Ю. Колбнева

Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова, Ярославль

Эффект релаксации поверхностного натяжения заключается в изменении коэффициента поверхностного натяжения полярной жидкости (воды) при кратковременных внешних силовых воздействиях на поверхность капли (например, при соударении капель) [1, 2]. Разрушение упорядоченной структуры приповерхностных диполей (двойного электрического слоя) сопровождается увеличением поверхностной энергии жидкости (коэффициента поверхностного натяжения) [3].

Целью настоящей работы является исследование влияния эффекта динамического поверхностного натяжения на капиллярные осцилляции заряженной водяной капли.

Математическая постановка задачи о капиллярных осцилляциях заряженной капли идеальной несжимаемой проводящей жидкости, находящейся во внешней несжимаемой диэлектрической среде, состоит из уравнения Эйлера, уравнения непрерывности и уравнений Максвелла для вектора напряженности электростатического поля. Заданы естественные граничные условия ограниченности поля скоростей движения жидкости в капле и напряженности электростатического поля в центре масс капли и на бесконечности. Введены гидродинамические и электрические граничные условия на поверхности капли и дополнительные интегральные условия неизменности объема капли, неподвижности ее центра масс и постоянства полного заряда. В задаче используется модель потенциального течения жидкости в капле. Решение сформулированной задачи проведено аналитически асимптотически путем разложения неизвестных функций по малому параметру ε — отношению амплитуды капиллярного волнового возмущения к радиусу капли.

В электрогидродинамической математической асимптотической процедуре первого порядка по ε найдено дисперсионное уравнение второго порядка, определяющее связь частоты осцилляций с номером колебательной моды.

Математическое описание эффекта релаксации поверхностного натяжения достигается введение комплексного коэффициента поверхностного натяжения по формуле Максвелла так, что дисперсионное уравнение имеет уже третий порядок и содержит комплексные коэффициенты. Увеличение порядка дисперсионного уравнения связано с появлением затухания капиллярных осцилляций за счет релаксации поверхностной энергии (коэффициента поверхностного натяжения) к равновесным значениям в результате восстановления упорядоченного расположения приповерхностных диполей.

Решением дисперсионного уравнения с учетом динамического поверхностного натяжения являются три корня: один корень — чисто мнимый, а два других — с одинаковой мнимой частью и отличающейся знаками реальной частью.

Из численных оценок, проведенных для осциллирующих облачных и дождевых капель, показано, что первый корень дисперсионного уравнения определяет чисто аperiодическое затухание, а второй и третий корни соответствуют медленно затухающим осцилляциям внутриоблачных капель и быстро затухающим осцилляциям мелких дождевых капель. Увеличение размера дождевых капель сказывается на увеличении декремента затухания так, что осцилляции крупных дождевых капель имеют аperiодический характер. Выявлено, что возрастание размера капли приводит к увеличению собственных частот осцилляций по сравнению с частотами, найденными в пренебрежении релаксационного процесса.

Показано, что эффект динамического поверхностного натяжения оказывает заметное влияние на высокочастотные осцилляции облачных капель. При этом быстрое затухание осцилляций выявляется, когда период осцилляций сравним с характерным временем релаксации поверхностного натяжения.

Показано, что в принятой модели идеальной жидкости имеет место затухание капиллярных осцилляций из-за перестройки приповерхностного двойного электрического слоя, сопровождающаяся преобразованием энергии высокочастотных капиллярных волн в энергию электромагнитного излучения [4].

Литература

1. *Быковский Ю.А., Манькин Э.А., Нахутин И.Е.* Спектр поверхностных колебаний жидкости с учетом релаксационных эффектов // *ЖТФ.* 1976. Т. 46, вып. 10. С. 2211–2213.
2. *Кочурова Н.Н., Русанов А.И.* Релаксация поверхностных свойств водных растворов поверхностно-активных веществ и механизм адсорбции // *Успехи химии.* 1993. Т. 62, вып. 12. С. 1150–1163.
3. *Ширяева С.О., Григорьев А.И.* О влиянии эффекта релаксации поверхностного натяжения на спектр движений жидкости с заряженной свободной поверхностью // *ЖТФ.* 2000. Т. 70, вып. 6. С. 31–36.
4. *Григорьев А.И., Колбнева Н.Ю., Ширяева С.О.* О некоторых особенностях преобразования энергии капиллярных волн на поверхности жидкости при наличии динамического поверхностного натяжения // *Коллоидный журнал.* 2023. Т. 85, № 3. С. 263–276.

Влияние глобальной циркуляции атмосферы на вертикальное распределение концентрации аэрозоля

А. В. Кочин

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный

Аэрозольные частицы изменяют электрические характеристики атмосферы, что важно учитывать при моделировании процессов в ГЭЦ. Аэрозоль влияет на оптические свойства атмосферы, что дает возможность измерить их концентрацию по затуханию солнечного света [1]. Радиозондовые измерения показали, что на высоте тропопаузы коэффициент затухания резко уменьшается до нуля. Таким образом основная масса аэрозоля сосредоточена в тропосфере, а в стратосфере аэрозоль практически отсутствует. Вертикальное распределение концентрации аэрозолей определяется высотой тропопаузы, которая формируется общей циркуляцией атмосферы (ОЦА) [2, 3]. Причиной общей циркуляции атмосферы (ОЦА) является уменьшение температуры на полюсах. Однако уменьшение температуры должно вызывать увеличение приземного давления на полюсах, а наблюдаемое приземное давление практически постоянно. За счет гидростатического градиента давления воздух способен смещаться только в сторону полюса. Для существования циркуляции требуется дополнительный негидростатический градиент давления. Центробежная сила, возникающая вследствие вращения Земли, сила выравняет приземное давление [3]. Это формирует негидростатический вертикальный градиент давления, обеспечивающий замкнутую циркуляцию неравномерно нагретого воздуха в меридиональном направлении. Циркуляция формируется профиль температуры с уменьшением температуры от поверхности земли до тропопаузы и изотермией выше нее. Поверхностью раздела меридиональных потоков является тропопауза, на которой происходит изменение направления зонального ветра. В данных аэрологического зондирования подобный профиль температуры наблюдается постоянно, а обнаружение особенностей в зональной оставляющей ветра удастся увидеть только при близких к штормовым условиям в атмосфере.

Циркуляция состоит из трех противоположно направленных потоков, разделенных полярной и тропической тропопаузой (рис. 1). Причиной образования циркуляции вокруг тропической тропопаузы является обратный градиент температуры в стратосфере. Воздух опускается вдоль тропопаузы и адиабатически нагревается, что формирует обратный ход температуры по сравнению с приземной. Постоянство высот обеих тропопауз является следствием инерции зональных потоков. В результате локальные изменения температуры, включая не только суточные колебания, но и сезонные, усредняются.

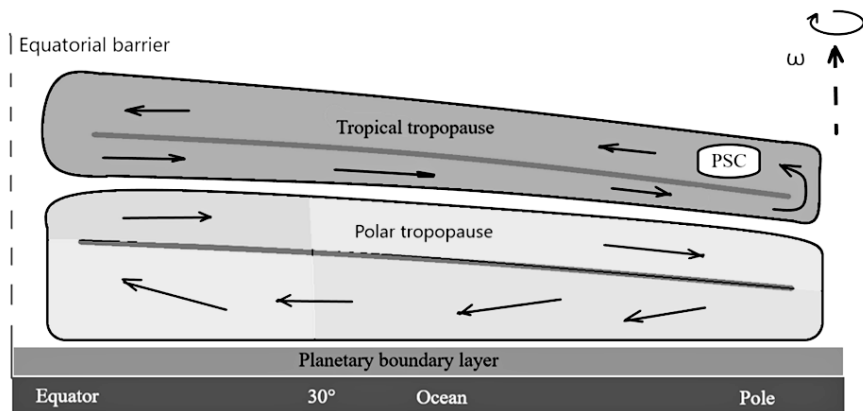


Рис.1. Структура потоков в глобальной циркуляции атмосферы. Стрелками показано движение воздуха. Показаны темно-серыми линиями тропическая тропопауза (Tropical tropopause) и полярная тропопауза (Polar tropopause), а также планетарный пограничный слой (Planetary boundary layer). Область с нисходящим потоком и движением воздуха от полюса к экватору ниже тропической тропопаузы выделена более темным оттенком серого. Область с восходящим потоком и движением воздуха от полюса к экватору — более светлым оттенком. Также показана область потока от экватора к полюсу выше тропической тропопаузы. Циркуляция вокруг тропической тропопаузы показана более темным оттенком серого. Полярные стратосферные облака (PSC) выделены белым цветом.

Литература

1. Kochin A. et al. Examination of Optical Processes in The Atmosphere During Upper Air Soundings. JAOT. 2021. DOI: 10.1175/JTECH-D-20-0158.1 2.
2. Кочин А. Тропопауза как поверхность раздела меридианальных потоков в глобальной циркуляции атмосферы // Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова. 10–12 ноября 2020 года. Сборник тезисов докладов. / М.: Физматкнига, 2020. С. 77.
3. Kochin A. Tropopause occurs due to the general circulation of the atmosphere. 2023. <http://arxiv.org/abs/2307.10259>
4. Holton J. An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. / Elsevier. 2004.

Возможные причины уменьшения грозовой активности над океанами

А. В. Кочин

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный

Актуальность проблемы учета обратных связей между молниевой активностью, химическими и климатическими процессами определяется важностью корректного учета влияния молниевых источников окислов азота на глобальные и региональные изменения состава и структуры атмосферы. Молниевая активность является одним из основных источников окислов азота в атмосфере. Окислы азота (NO_x) оказывают значительное влияние на содержание озона (O_3), гидроксильных радикалов (HO_x) и других газов атмосферы.

Грозовая активность над материками на порядок и более выше, чем над водной поверхностью, хотя интенсивность осадков выше над океанами. Предполагается, что твердая поверхность нагревается быстрее, чем вода. Формируется сильная конвекция, приводящая к образованию грозовых облаков. Однако зимой ситуация должна быть обратной, но этого не наблюдается. Альтернативной гипотезой является увеличенное содержание пыли над сушей. Проверка этой гипотезы не подтвердила влияние концентрации пыли.

Количественная модель генерации зарядов в слоисто-дождевых облаках была разработана в начале 90-х и достаточно хорошо описывает наблюдаемые эффекты [1]. На основе этой модели предложен механизм образования электрического заряда, способного обеспечить грозовую активность, на периферии кучево-дождевого облака. Гидрометеоры, которые имеют скорость оседания меньше скорости восходящего потока, выносятся на периферию. Превращение в капли происходит в области слабых нисходящих потоков, что создает необходимые для генерации заряда условия. Объяснить процессы образования зарядов в верхней части кучево-дождевых облаков оказалось возможным при учете таяния града. Мелкие фрагменты растаявших градин воздушным потоком уносятся на периферию облака. Крупные фрагменты накапливаются в верхней части облака, где они «зависают» в восходящем потоке. Знак заряда крупных фрагментов соответствует знаку заряда нижней части тающих частиц. Тем самым создается электрическое поле требуемого знака, которое вызывает образования зарядов [2] в центральной части облака. Анализ предложенной модели позволяет определить причины снижения грозовой активности над океанами.

Интегральная влажность воздуха над океанами выше, чем над сушей. Интенсивность осадков там будет выше, но вертикальный градиент температуры будет ближе к влажно-адиабатическому. Уменьшение градиента температуры препятствует образованию интенсивных вертикальных пото-

ков в облаке за счет уменьшения энергии неустойчивости, что не дает образоваться граду [3]. Таким образом, грозовая ячейка в центре облака не формируется.

Также влажно-адиабатический градиент температуры вокруг облака тормозит нисходящий поток вокруг облака. Обычно для прогнозирования конвекции анализируется энергия неустойчивости и конвективное торможение (конвективная доступная потенциальная энергия (Convective available potential energy (CAPE) и конвективное торможение (convective inhibition (CIN) [3]. Считается, что условия опускания воздуха не влияют на процесс облакообразования. Однако уменьшение вертикального градиента температуры в атмосфере по сравнению с сухоадиабатическим тормозит нисходящий поток, потому что воздух опускается по сухой адиабате и становится теплее окружающего. В результате нисходящий поток отклоняется от облака, а на периферии формируется зона с восходящим потоком. Образование электрического заряда в слое таяния на периферии останавливается. Торможение нисходящего потока уменьшает горизонтальный градиент вертикальной скорости, что приводит к наблюдаемому уменьшению турбулентности в тропических облаках.

Низкая грозовая активность слоисто-дождевых облаков может быть вызвана их большой протяженностью над океанами, поэтому положение зон с нисходящим потоком и зон выпадения осадков не пересекаются.

Литература

1. *Кочин А.В.* Механизм образования электрического заряда в слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаках. Метеорология и гидрология. 1995 г., № 10, с. 35–41.
2. *Кочин А.В.* Индукционный механизм электризации кучево-дождевых облаков. Борок. ГЭК 2017
3. *Мучник В.М.* Физика грозы. Гидрометгиздат. Л. 1974. 351 с.

Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов

А. А. Сысоев^{1,2}, Д. И. Иудин^{1,2}, В. Ю. Климашов¹, А. А. Емельянов¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

² Приволжский исследовательский медицинский университет, Н.Новгород

В работе представлена модель сильноточного молниевых разряда, основанная на подходе [1]. К сильноточным атмосферным разрядам можно отнести компактные внутриоблачные разряды (КВР) и начальные импульсы пробоя (НИП) (см. [2] и ссылки там). КВР представляет собой изолированный во времени и пространстве одиночный разряд продолжительностью 10–30 мкс, импульсный ток которого имеет длительность порядка нескольких микросекунд и амплитуду 15–65 кА (в редких случаях до 150–200 кА). НИП являются сериями биполярных импульсов электрического поля микросекундного масштаба. Полная серия импульсов, разделенных интервалами в десятки – сотни микросекунд, длится в среднем около 1 мс. Как и в случае КВР, импульсы тока НИП имеют чрезвычайно большие амплитуды, составляющие 1–165 кА. Отличительной особенностью данных разрядов является очень мощное (на порядок большее, чем у «обычной» молнии) ВЧ–ОВЧ излучение (3–300 МГц), наложенное на биполярный импульс меньшей частоты.

В настоящее время остается загадкой, каким образом внутри грозового облака формируются кратковременные импульсы тока КВР и НИП, разделяющие заряд порядка 0,1–1 Кл. Для сравнения, во время первого компонента возвратного удара молнии типа облако-земля, при котором происходит разрядка многокилометрового канала молнии, формирующегося на протяжении десятков миллисекунд, в землю уходит около 5 Кл заряда при среднем значении амплитуды импульса тока обратного удара порядка 30 кА. Это обстоятельство делает вопрос о механизмах инициации и развития сильноточных атмосферных разрядов одной из самых интригующих проблем атмосферного электричества.

Представленная в работе модель обладает рядом прогрессивных особенностей, позволяющих воспроизвести не только колоссальные импульсы тока КВР и НИП, но и производимое ими излучение. Она учитывает асимметрию характерных электрических полей поддержания роста и скоростей распространения положительных и отрицательных стримеров, временную эволюцию основных параметров (продольное электрическое поле, температура, проводимость, радиус проводимости и ток) разрядных каналов и возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа. Модель воспроизводит самосогласованную динамику изменения структуры разряда и пространственного распределения электрического поля. Одной из основных инновационных особенностей разрабатываемого

го подхода является включение блока, отвечающего за описание термодинамики разрядных каналов. Его наличие позволяет отделить холодные стримерные каналы от горячих лидерных и использовать приближение равновесной плазмы, чтобы связать проводимость и токнесущий радиус лидерного канала с его температурой. Описание динамики температуры разрядных каналов опирается на решение уравнения теплопроводности с источником в виде джоулева энерговыделения и стоком в виде радиационных потерь. Входящие в него термодинамические величины рассматриваются как функции давления и температуры воздуха.

Разработанная модель позволяет детально воспроизвести эволюцию сильноточных атмосферных разрядов, которая, в соответствии со сценарием [3], начинается с появления нежизнеспособных стримерных систем, впоследствии объединяющихся в объемную иерархическую сеть плазменных каналов, и приводит к формированию горячего хорошо проводящего лидерного каркаса. Показано, что в момент возникновения лидерного канала по нему протекает характерный для КВР и НИП кратковременный импульс тока поляризации с амплитудой в несколько десятков тысяч ампер. Дополнительным методом верификации результатов моделирования является расчет излучения моделируемой системы токов в дальней зоне, который проводится в соответствии с методикой [4]. При этом учитывается положение и пространственная ориентация каждого канала (и его отражения в идеально проводящей плоской земной поверхности). Результаты моделирования позволяют лучше понять механизмы зарождения и развития сильноточных молниевых разрядов, что необходимо для совершенствования методов молниезащиты.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-21-00057.

Литература

1. *Iudin D.I., Rakov V.A., Mareev E.A., Iudin F.D., Syssoev A.A., Davydenko S.S.* Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. V. 122, No. 12. P. 6416–6430.
2. *Dwyer J.R., Uman M.A.* The physics of lightning // *Phys. Rep.* 2014. V. 534, P. 147–241.
3. *Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M.* From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation // *Sci. Rep.* 2021. V. 11, P. 18016.
4. *Syssoev A.A., Iudin D.I., Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V.* Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2021. V. 221, P. 105686.

**ФИЗИКА АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО
СЛОЯ И ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

Электричество невозмущённого атмосферного пограничного слоя средних широт в глобальной электрической цепи

*С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, А. А. Прохорчук,
Е. В. Климанова, А. С. Козьмина, А. В. Гурьев*
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Глобальная электрическая цепь (ГЭЦ) рассматривается как электродинамическая система, образованная проводящими слоями ионосферы, верхними слоями океана и земной коры, с грозowymi генераторами в качестве основных источников электродвижущей силы и невозмущёнными областями свободной атмосферы в качестве зон возвратных токов [1]. По существу, ГЭЦ — реальный природный объект солнечно-земных связей и возможных взаимодействий гелио- и геофизических явлений. Атмосферный пограничный слой (АПС) представляет собой нижний атмосферный участок ГЭЦ, электродинамика которого определяется сложной организацией процессов в диссипативной среде с поступлением энергии от многих источников. Невозмущённые грозовой активностью и осадками области атмосферы характеризуются электрическими процессами с низкой энергией, для исследования которых требуется проведение натурных полевых и обсерваторских наблюдений с развитой приборной базой. Наблюдения совокупности геофизических и аэрофизических величин выполняются методами синхронных разнесённых высокоточных измерений. В докладе приводятся результаты современных исследований электричества невозмущённого атмосферного пограничного слоя средних широт, проводимых в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН методами натурных наблюдений и численного моделирования [2–4]. Выполнены количественные оценки средних значений и вариабельности напряжённости атмосферного электрического поля, плотности вертикального электрического поля, концентраций лёгких атмосферных ионов, электрической проводимости воздуха. Приведены результаты высотных аэроэлектрических наблюдений с использованием гелиевого привязного аэростата [5]. Результаты наблюдений формируют базу данных входных параметров численных моделей электрического состояния АПС.

Благодарности: работа выполняется при поддержке РФФ грант № 22-17-00053 (численное моделирование, теоретические оценки, полевые наблюдения) и государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0025 (обсерваторские наблюдения).

Литература

1. *Анисимов С.В., Мареев Е.А.* Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. № 10. С. 8–18. 2008.
2. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of

- the atmospheric boundary-layer electrical variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167. P. 327–348.
3. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Prokhorchuk A.A., Aphinogenov K.V.* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // *Atmos. Res.* 2020. V. 244. 105035.
 4. *Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Гурьев А.В.* Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт // *Физика атмосферы и океана.* 2023. Т. 59, №5. С. 595–1611, DOI: 10.31857/S0002351523050024.
 5. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A.S., Guriev A.V.* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // *Atmos. Res.* 2021. V. 250. 105355.

Наблюдение спектров подвижности легких аэроионов: аппаратное обеспечение и результаты

К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, А. А. Прохорчук
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Результаты натуральных наблюдений электричества атмосферы составляют экспериментальную основу изучения глобальной электрической цепи. Одной из важных характеристик исследуемой среды является электрическая проводимость, формируемая атмосферными ионами. Обладая различной подвижностью, аэроионы вносят различный вклад в суммарную электрическую проводимость атмосферы. Следует подчеркнуть, что для достоверного определения атмосферной электрической проводимости недостаточно знать концентрацию легких аэроионов — частиц, формирующих основной вклад в электропроводность атмосферы. Задача определения атмосферной электрической проводимости сводится к наблюдению спектра распределения аэроионов по подвижностям [1].

Цель данной работы — изготовление аппаратного и программного обеспечения для натуральных наблюдений спектра подвижности аэроионов в полевых условиях. В ходе данной работы разработаны и изготовлены опытные образцы датчиков спектра подвижности аэроионов. Разработано программное обеспечение для автономного управления датчиками. Разработана методика и программное обеспечение для восстановления спектра распределения легких аэроионов по подвижностям из данных, полученных при работе датчика.

Датчик подвижностного спектра аэроионов выполнен в виде автономного модуля, предназначенного для длительной работы в полевых условиях [1]. Позволяет одновременно измерять количество аэроионов положительного и отрицательного знака заряда от $2 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^9$ ионов в куб. м при изменяемых параметрах отклоняющего напряжения аспирационного конденсатора и объемного расхода воздуха. Модуль управляется с помощью персонального компьютера посредством протокола RS-232 по кабельной линии. Сбор данных осуществляется автономной системой сбора, построенной на одноплатном компьютере Raspberry Pi. Программное обеспечение для управления датчиком и обработки результатов измерений разработано под операционной системой GNU Linux.

Методика наблюдения спектров подвижности аэроионов подразумевает либо применение нескольких идентичных приборов, работающих синхронно при разных параметрах регистрирующей системы, либо работу одного прибора, но с изменением параметров регистрирующей системы во времени. Число датчиков, используемых при синхронных наблюдениях, или число ступеней параметров регистрирующей системы в одной итерации наблюдений с помощью одного прибора задают детализацию результата распределения аэроионов по подвижностям.

На рис. 1 представлены результаты наблюдения спектров распределения легких аэроионов по подвижностям за 04 августа 2024 года на среднеширотной Геофизической обсерватории «Борок». Наблюдения проведены с помощью одного датчика с интервалом итерации 1 час. Графики (а), (б), (в), (г) соответствуют периодам времени 07:00 — 08:00 UT, 09:00 — 10:00 UT, 12:00 — 13:00 UT и 15:00 — 16:00 UT.

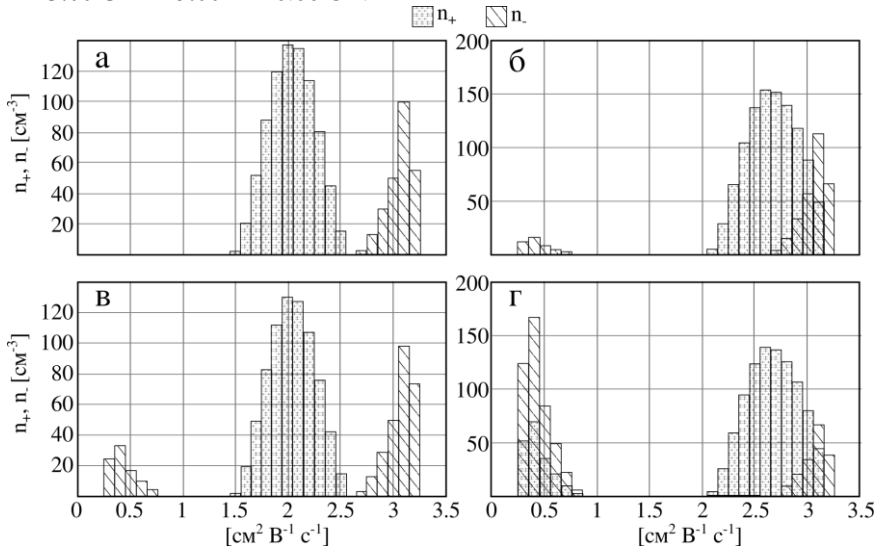


Рис. 1. Спектр распределения легких аэроионов по подвижностям по данным наблюдений ГО «Борок» ИФЗ РАН 04 августа 2022 года.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда — проект РНФ № 22-17-00053.

Литература

1. Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А. Датчик концентрации легких атмосферных ионов для полевых натуральных геофизических наблюдений // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 3. С. 43–60.
DOI: 10.21455/si2022.3-3

Пассивная радиолокация как способ обнаружения радиации в приземной атмосфере

А. В. Карелин^{1,2}, К. А. Молодцов¹, В. В. Хегай²

¹ Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Троицк, Москва

Рассмотрены методы и средства дистанционного мониторинга из космоса радиоактивного загрязнения территорий. Предложено создание специализированной космической системы оперативного мониторинга территории на базе орбитальной группировки малых космических аппаратов (КА), оснащенных комплексами специальной целевой аппаратуры.

Под действием ионизирующего излучения в приземном слое в зоне радиоактивного выброса может происходить резкое падение влажности воздуха, а поступление радионуклидов в верхние слои тропосферы будет приводить к образованию облаков и выпадению радиоактивных осадков. Контроль соответствующих параметров атмосферы следует включать в общий комплекс мониторинга радиоактивных выбросов.

Для организации мониторинга перспективно использовать малые КА, позволяющие проводить измерения вертикальных и горизонтальных профилей температуры и влажности приземной атмосферы. Такие КА целесообразно оснащать радиометрами, позволяющими проводить измерения излучения в СВЧ диапазоне спектра.

Ключевые параметры целевых характеристик космической системы радиолокационного наблюдения:

- перспективный бортовой пассивный СВЧ радиометрический комплекс (СВЧ зондировщик) среднего разрешения (1–3 км) с целью измерения высотных профилей температуры и влажности атмосферы с особым вниманием к нижним слоям;
- анализ характеристик исследуемого объекта диктует необходимость реализации следующих технических параметров СВЧ зондировщика:
 - пространственное разрешение по горизонтали 1–3 км;
 - возможность получения информации о температуре и влажности атмосферы, включая нижние (1–3 км) ее слои, для чего проводить спектральные измерения в следующих диапазонах:
 - 15–22 ГГц,
 - 50–60 ГГц,
 - 80–100 ГГц,
 - 170–196 ГГц.

Рассмотрение взаимодействия аэроэлектрического и метеорологического полей нижней атмосферы на основе данных синхронных аэростатных и приземных измерений

*Е. В. Климанова, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов,
А. В. Гурьев*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Процессы образования и переноса заряженных частиц в атмосфере играют значимую роль в глобальной электрической цепи (ГЭЦ), определяя динамику электромагнитных полей и токов, связанных с метеорологическими полями и динамикой аэрозолей. Ярким примером указанной связи является процесс формирования грозового облака, в котором ускорение роста концентрации аэрозольных частиц индуцируется процессами ионизации [1].

Исследование влияния метеорологических полей на формирование электрического состояния нижней атмосферы проводилось с применением методов совместного статистического анализа данных синхронных наземных и аэростатных наблюдений, полученных с помощью измерительного комплекса ГО «Борок» ИФЗ РАН за несколько лет наблюдений. Синхронные разнесенные наблюдения обеспечивались наземным комплексом аппаратуры, включающим приборы, установленные на метеомачте, и измерительным оборудованием, размещенным на платформе [2], которая поднималась с помощью привязного аэростата на высоту от 5 до 500 метров [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053).

Литература

1. *Svensmark J., Shaviv N.J., Enghoff M.B., Svensmark H. The Ion and Charged Aerosol Growth Enhancement (ION-CAGE) code: A numerical model for the growth of charged and neutral aerosols // Earth and Space Science. 2020. V. 7(9). DOI: 10.1029/2020EA001142.*
2. *Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В. Аппаратная платформа аэростатных аэроэлектрических наблюдений // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 1, С. 24– 8.*
3. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A. S., Guriev A.V. Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // Atmos. Res. 2020. V. 250, 105355.*

Результаты одновременных наблюдений объёмной активности радона и интенсивности гамма-излучения в приземном слое атмосферы

А. С. Козьмина, Е. В. Климанова, С. В. Галиченко

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

В начале 20-го века была установлена связь между электропроводностью воздуха и радиоактивным излучением. Ионы в атмосфере образуются в результате взаимодействия молекул с энергичными частицами космических лучей, α - и β -частицами, возникающими в результате распада радиоактивных ядер, а также фотонной компонентой — гамма-квантами, испускаемыми при распаде мюонов и при стабилизации возбуждённых состояний ядер радионуклидов. В нижней части тропосферы радон и его производные являются основным источником ионизирующего излучения [1]. Эмиссия радона в атмосферу зависит от концентрации радия в верхнем слое почвы, пористости и проницаемости содержащих радий пород, а также от множества процессов, влияющих на скорость диффузионного и адвективного переноса радона к поверхности [2]. Таким образом, плотность потока радона в атмосферу в значительной степени зависит от сильно изменяющихся метеорологических условий, включая распределение температуры и влажности почвы. Радон, выделяемый с поверхности, может распространяться на высоту до нескольких километров в зависимости от сложного взаимодействия местных атмосферных условий, в частности, высоты слоя конвективного перемешивания [3]. Цель данной работы — получение оценок связи объёмной активности радона и интенсивности гамма-излучения в приземном слое атмосферы в зависимости от метеорологических условий, влажности почвы и времени суток. Наблюдения проводились на измерительном полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E] летом 2023 г., по результатам которых выполнены оценки плотности потока радона в атмосферу, вклада гамма-излучения в суммарную ионизацию приземного слоя атмосферы радионуклидами земной коры, радиоактивными газами и их производными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-17-00053).

Литература

1. *Zhang K., Feichter J., Kazil J. et al.* Radon activity in the lower troposphere and its impact on ionization rate: a global estimate using different radon emissions // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 7817–7838.
2. *Яковлева В.С.* Моделирование влияния состояния и изменчивости атмосферы и литосферы на плотность потоков радона и торона с поверхности земли // *Известия Томского политехнического университета.* 2010. Т. 317. № 2. С. 162–166.
3. *Williams A.G Williams A.G., Zahorowski W. et al.* The vertical distribution of radon in clear and cloudy daytime terrestrial boundary layers // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68. P. 155–174.

Влияние аэрозольного состояния приземной атмосферы на перенос заряда при различных термодинамических условиях

*И. Н. Панчишкина, Г. Г. Петрова, А. И. Петров, С. А. Маслов,
Э. Р. Кондратьева*

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Объемный заряд вблизи земной поверхности формируется в результате действия электродного эффекта, дивергенции плотности тока проводимости, процессов электризации аэрозолей, а также переносится с воздушными массами с других территорий. При наличии неравномерно распределенного по высоте объемного заряда в результате конвекции и турбулентного перемешивания в атмосфере будет иметь место вертикальный ток, который является по природе током механического переноса.

Как показывают наблюдения в пунктах Ростовской области и на плато Шаджатмаз в летний период, плотность объемного заряда, дислоцированного на аэрозолях, как правило, на порядок выше плотности объемного заряда легких ионов [1]. Таким образом, концентрация аэрозоля является одним из существенных факторов, влияющих на динамику процессов переноса заряда по вертикали под действием механических сил. В свою очередь, аэрозольное состояние приземной атмосферы определяется термодинамическими условиями в пункте наблюдений. При увеличении относительной влажности происходит обводнение аэрозолей, растет их концентрация и меняется избирательность аэрозолей по отношению к легким ионам разных знаков, что и определяет знак объемного заряда. В частности, обнаружено, что на плато Шаджатмаз в периоды, когда в результате механического переноса на земную поверхность приносился положительный заряд, относительная влажность воздуха составляла в среднем 95%. В часы, когда плотность тока механического переноса была положительна, среднее значение относительной влажности воздуха была равна 82%, что согласуется с результатами лабораторных экспериментов Смирнова В.В. [2].

Литература

1. *Петрова Г.Г., Петров А.И., Панчишкина И.Н.* Процессы формирования электрической структуры нижних слоев атмосферы: экспериментальные исследования и обобщение данных. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. Т.56, № 11–12. 2013. С.803–819.
2. *Смирнов В.В.* Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярно ионизированном воздухе // Изв. РАН. ФАО, 2010, т. 46, с. 321–331.

Экспериментальные исследования пространственно-временных вариаций характеристик электрического поля в приземном слое: методы и подходы

*Г. Г. Петрова, А. И. Петров, И. Н. Панчишкина, В. А. Петрова,
Е. Ю. Веселова*

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Электрические процессы в приземном слое протекают вблизи границы двух разнородных сред, что усложняет их теоретическое описание. В этой ситуации актуальна роль экспериментальных исследований, результаты которых могут быть использованы для эмпирической параметризации уравнений при решении проблем моделирования нижнего участка ГЭЦ. Из-за близости подстилающей поверхности в приземном слое формируются значительные вертикальные градиенты исследуемых величин. Это требует организации градиентных измерений при планировании эксперимента. Измерение вертикального профиля потенциала наряду с регистрацией поля на уровне земли флюксметром позволяет получать представление о вертикальном распределении градиента потенциала и формировании слоев объемного заряда [1]. Обнаруживается значимая связь градиента потенциала с содержанием аэрозолей, но в зависимости от влаготерморежима увеличение концентрации аэрозольных частиц сопровождается либо усилением поля вблизи земли, либо его ослаблением [2]. Полагаем, что влажность и физико-химические свойства аэрозолей влияют на процессы электризации частиц и знак объемного заряда в атмосфере [3]. Третий сезон апробируется метод автоматической регистрации потенциала атмосферы на основе измерения тока радиоактивного коллектора. Известный в атмосферном электричестве метод радиоактивного коллектора для измерения потенциала в настоящее время распространен мало, главным образом, из-за сложностей автоматизации измерений. Современная элементная база позволяет справиться с этими сложностями. Во время полевого эксперимента традиционный комплекс приборов дополняют измерители слабых токов, которые являются оригинальной современной разработкой. Предварительные результаты автоматической регистрации потенциала атмосферы анализируются.

Литература

1. *Петрова Г.Г., Петров А.И., Панчишкина И.Н.* Процессы формирования электрической структуры нижних слоев атмосферы: экспериментальные исследования и обобщение данных // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. Т. 56, № 11–12. 2013. С.803–819.
2. *Petrova et al.* 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 840 012012
3. *Смирнов В.В.* Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярно ионизированном воздухе // Изв. РАН. ФАО. 2010. Т. 46. С. 321–331.

Оценка вклада земной и космической составляющих спектра гамма-излучения в ионизацию приземной атмосферы

А. А. Прохорчук, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов
Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Одним из значимых процессов в ионизации атмосферного пограничного слоя (АПС), влияющем на его электродинамику, является взаимодействие электронных оболочек атомов с квантами электромагнитного излучения высоких энергий, испускаемых при распадах мюонов вторичных космических лучей и стабилизации возбужденных состояний ядер радионуклидов, содержащихся в верхнем слое земной коры [1, 2]. Пространственное распределение поглощенной дозы формируется энергетическим спектром излучения, пространственным распределением и интенсивностью источников, характером взаимодействия излучения с веществом.

При разработке методики определения интенсивности космического гамма-излучения в диапазоне энергий 0.1–3 МэВ был применен программный инструментарий «Geant4» [3], реализующий метод Монте-Карло. С помощью численной модели с привлечением данных измерений гамма-спектрометра рассчитано поле интенсивности ионизации АПС гамма-квантами почвенных радионуклидов. Дана оценка вклада почвенных радионуклидов цепочек распадов ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K и космического гамма-излучения в интенсивность образования ионных пар. Показана нечувствительность рассчитанного отклика спектрометра в диапазоне энергий 0.1–2.9 МэВ на изменение типа верхнего слоя почвы при учете излучения только почвенных радионуклидов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-17-00053).

Литература

1. Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Климанова Е.В., Козьмина А.С., Гурьев А.В. Электричество невозмущенного атмосферного пограничного слоя средних широт // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 5. С. 595–611.
2. Анисимов С.В., Галиченко С.В., Климанова Е.В., Прохорчук А.А., Афиногенов К.В. Вклад фотонной компоненты в ионизацию атмосферы радионуклидами земной коры и радиоактивными эманациями // Физика Земли. 2023. № 6. С. 245–258.
3. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. Geant4—a simulation toolkit // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. V. 506. Iss. 3. P. 250–303.

Предварительные результаты анализа суточных вариаций напряженности электрического поля и массовой концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы в 2023 г. по данным Центра геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН

С. А. Рябова^{1,2}, А. В. Крашенинников¹, С. П. Соловьев¹

¹ Институт динамики геосфер им. ак. М.А.Садовского РАН, Москва

² Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва

Важными характеристиками состояния приземного слоя атмосферы являются напряженность электрического поля [1, 2] и массовые концентрации взвешенных в воздухе твердых частиц мелкодисперсных фракций с размерами менее 2.5 мкм (PM2.5) и менее 10 мкм (PM10) [3, 4].

В настоящей работе выполняется анализ суточного хода вариаций напряженности электрического поля и массовой концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы, зарегистрированных в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН (г. Москва, ул. Ленинский проспект, д. 38, корпус 1) с января по июнь 2023 г.

Регистрация вертикальной компоненты напряженности электрического поля в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН выполняется с помощью нового измерителя напряженности электрического поля VOLTEK EFM-100, который был установлен вместо ИНЭП при модернизации обсерватории Центра геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН. С целью определения состава мелкодисперсных частиц в воздухе и его изменений во времени Центр геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН дооснащен лазерным датчиком Sensirion SPS30, позволяющим определять концентрацию частиц в разных диапазонах размеров. Данные регистрации в цифровом и графическом виде представлены на сайте ИДГ РАН.

В ходе обработки и анализа данных построены кривые среднего суточного хода напряженности электрического поля и массовой концентрации частиц с размерами менее 2.5 мкм (PM2.5). Обнаружена сильная положительная корреляция между среднесуточной вариацией атмосферного электрического поля в условиях «хорошей погоды». Время возникновения максимумов напряженности электрического поля и максимумов массовой концентрации частиц с размерами менее 2.5 мкм (PM2.5) коррелируют с временем восхода и захода Солнца.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 122032900185-5 «Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях» и государственного задания ИФЗ РАН.

Литература

1. *Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электрические поля техногенных и природных процессов– М.: ГЕОС, 2014. – 360 с.
2. Спивак А.А., Рябова С.А. Электрическое поле в приземной атмосфере московского мегаполиса // Геомagnetизм и аэрономия. 2019. Т. 59, № 4. С. 501–513.
3. *Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е.* Изменчивость приземной концентрации аэрозолей PM2.5 в г. Москве по наблюдениям в метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042.
4. *Li Y., Chen Q., Zhao H., Wang L., Tao R.* Variations in PM10, PM2.5 and PM1.0 in an urban area of the Sichuan basin and their relation to meteorological factors // Atmosphere. 2015. V. 6. P. 150–163.

**ПРОЯВЛЕНИЕ МЕЖГЕОСФЕРНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ
СВЯЗЕЙ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Исследование динамики молниевых разрядов и параметров ионосферы в Восточной Сибири 2012–2018 гг.

*Р. В. Васильев, К. Г. Ратовский, Ю. В. Ясюкевич, В. И. Куркин,
С. В. Подлесный, Н. О. Молчанова, М. В. Цеорик*
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Развитие сложных электрических разрядов в мезосфере, т. н. спрайтов [1, 2], сопровождается нагревом среды и изменением концентрации свободных электронов, что в свою очередь должно сказываться на условиях распространения коротких радиоволн и радиосигналов систем ГНСС. Нагрев среды на высотах 60–80 км приводит к тому, что часть свободных электронов «прилипает» к молекулярному кислороду, снижая свою концентрацию [3]. Этот процесс должен приводить к увеличению амплитуды отражённых от высоких слоёв ионосферы (200–500 км) коротких радиоволн в диапазоне от 2–3 МГц и выше, поскольку поглощение таких радиоволн в разогретой области мезосферы, обеднённой свободными электронами, снижается, вследствие уменьшения числа соударений электронов с нейтралами. Длительность периода восстановления концентрации к исходному уровню при этом может изменяться от единиц до сотен секунд, в зависимости от мощности разряда в мезосфере и его типа [4]. Увеличение концентрации электронов в области мезопаузы (~90 км) в связи с большим временем жизни свободных электронов по сравнению с нижележащей мезосферой, будет приводить к увеличению поглощения отражённых от ионосферы коротких радиоволн указанного диапазона, уже вследствие увеличения числа соударений электронов и нейтралов. Этот эффект отчётливо наблюдается под действием электромагнитного поля тропосферных молниевых разрядов [5].

Обзор [6] достаточно детально разбирает ряд работ, посвящённых исследованиям взаимосвязи тропосферной грозовой активности и динамики ионосферного спорадического слоя Es (95–130 км). Основной вывод заключается в том, что высокая проводимость E-области ионосферы делает невозможным развитие электрического разряда в ней. Зелёное свечение, возникающее на вершине спрайта [7], говорит о том, что часть энергичных электронов мезосферного разряда всё же проникает до высот выше 90 км, где, по всей видимости, происходит возбуждение уровня 1S атомарного кислорода посредством электронного удара. Энергетический спектр электронов разряда зависит от величины поля поляризации ионосферной плазмы, поэтому в некоторых случаях, при разрядке крупных тропосферных объёмных зарядов в промежутке облако-земля помимо ударного возбуждения (порог ~5 эВ) возможно появление дополнительной электронной концентрации вследствие ударной ионизации атомарного кислорода (порог ~14 эВ). Появившиеся вследствие ударной ионизации электроны гипотетически способны сформировать Es, увеличить полное электронное содержа-

ние. Влияние молниевых разрядов во всей толще атмосферы Земли на вертикальное распространение коротких радиоволн в диапазоне 1–10 МГц неоднозначное и требует комплексного изучения для полного понимания степени влияния взаимоисключающих факторов.

В докладе приводятся предварительные результаты исследования совместной динамики молниевых разрядов, зарегистрированных грозопеленгационной сетью «Веря-МР», и параметров ионосферы над Восточной Сибирью полученных цифровым ионозондом DPS-4, сетью ЛЧМ ионозондов наклонного зондирования и сетью ГНСС приёмников ИСЗФ СО РАН.

Литература

1. *Neubert T., Rycroft M., Farges T. et al.* Recent Results from Studies of Electric Discharges in the Mesosphere. *Surv Geophys* 29, 71–137 (2008). DOI: 10.1007/s10712-008-9043-1
2. *Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R., Luque A.* (2020 a). Optical spectra of small-scale sprite features observed at 10,000 fps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD033170. DOI: 10.1029/2020JD033170
3. *Shao X.-M., Lay E., Jacobson A.* Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm. *Nature Geosci* 6, 29–33 (2013). DOI: 10.1038/ngeo1668
4. *Haldoupis C., Cohen M., Arnone E., Cotts B., Dietrich S.* (2013), The VLF fingerprint of elves: Step-like and long-recovery early VLF perturbations caused by powerful \pm CG lightning EM pulses, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 5392–5402, DOI: 10.1002/jgra.50489
5. *Farges T., Blanc E.* Lightning and TLE electric fields and their impact on the ionosphere *Comptes Rendus Physique* Volume 12, Issue 2, 2011, Pages 171–179, ISSN 1631-0705, DOI: 10.1016/j.crhy.2011.01.013.
6. *Haldoupis C.* Is there a conclusive evidence on lightning-related effects on sporadic E layers? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 172, 2018, Pages 117–121, ISSN 1364-6826, DOI: 10.1016/j.jastp.2018.03.024.
7. *Stenbaek-Nielsen H., Ashcraft T., McHarg M. et al.* Analysis and modeling of sprite green ghosts. *Authorea*. November 24, 2020. DOI: 10.1002/essoar.10504953.1

Влияние гор с крутыми склонами на электрические поля и токи хорошей погоды

В. В. Денисенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Если измерения электрического поля хорошей погоды проводятся в горной местности, они подвержены влиянию рельефа, и поэтому нуждаются в дополнительной калибровке для включения в глобальную картину поля.

Для этого предлагается решить трехмерную (3-D) задачу электропроводности атмосферы в области между поверхностью земли и ионосферой, потенциал которой относительно земли задан. Землю во многих случаях можно рассматривать как идеальный проводник с нулевым потенциалом. Из-за быстрого роста проводимости с высотой верхнюю границу можно опустить до 50 км над уровнем моря. За неимением реального 3-D распределения проводимости воздуха приходится использовать одну из эмпирических моделей, наша модель описана в [1] с исправленными в [2] опечатками.

В качестве примера нами рассмотрено поле хорошей погоды в окрестности Ключевской сопки. Упрощенный модельный рельеф задан в виде пяти прямых круговых конусов, примерно переданы высоты пиков и углы наклона склонов. Сечение этого горного массива вдоль параллели, проходящей через вершину сопки – заштрихованная область на Рис. 1.

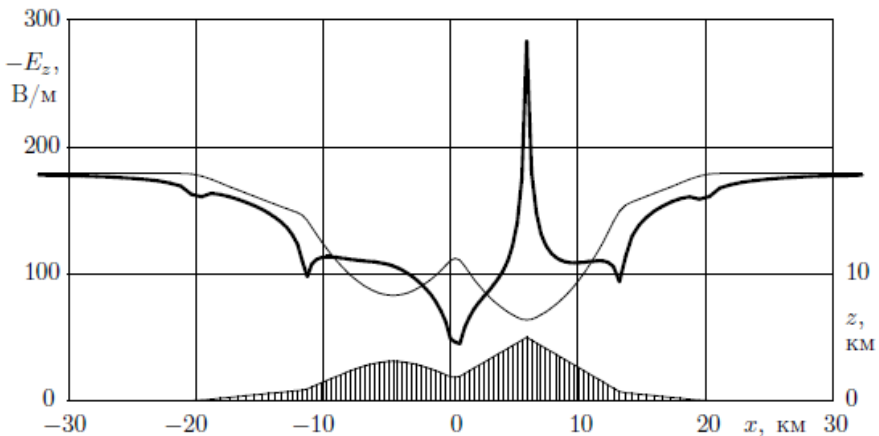


Рис. 1. Распределение вертикальной компоненты электрического поля над землей вдоль параллели, проходящей через вершину Ключевской сопки. Жирная кривая — результат 3-D расчета, тонкая кривая — 1-D модель. Сечение модельного горного массива — заштрихованная область со шкалой справа.

Жирной кривой показано распределение вертикальной компоненты электрического поля над поверхностью земли вдоль параллели, проходящей через вершину Ключевской сопки, полученное в результате численного решения 3-D задачи электропроводности атмосферы.

Тонкой кривой показан результат 1-D модели атмосферного проводника, в рамках которой поверхность земли полагается горизонтальной на высоте рассматриваемой точки. Ввиду предполагаемой горизонтальной однородности проводимости воздуха плотность тока и электрическое поле тоже не зависят от горизонтальных координат. Ток вертикален, его плотность j_z не меняется с высотой и определяются двумя параметрами, напряжением земля – ионосфера V и сопротивлением атмосферного столба между землей и ионосферой R , $j_z = V/R$.

Электрическое поле в такой модели тоже вертикально, а его напряженность $E(z) = j_z/\sigma(z)$, где σ — проводимость, z — высота.

Как демонстрирует Рис. 1, одномерная модель для рельефа с крутыми склонами неприменима. Например, напряженность поля убывает во впадинах и возрастает до бесконечности с приближением к пику идеального конуса. На Рис. 1 поле не достигает 300 В/м из-за конечности шага сетки (шаг по горизонтали соответствует штриховке сечения, шаг по вертикали в основной части области втрое меньше). В 1-D модели таких различий нет, есть только высота рассматриваемой точки поверхности над уровнем моря. Тот же рисунок показывает, что при выполаживании поверхности ($|x| > 15$ км) адекватность 1-D модели улучшается, а при выходе на горизонтальные поверхности достаточно далеко от гор ($|x| > 30$ км) модель становится точной.

По Рис. 1 видно, что если измерения провести на склоне сопки при $x = 10$ км, получим напряженность поля хорошей погоды 109 В/м вместо 178 В/м на равнине на уровне моря при том же потенциале ионосферы и том же высотном ходе проводимости воздуха. Для такой обсерватории калибровка на основании 1-D модели оказывается достаточно точной, в отличие от измерений вблизи впадин или пиков, например, ошибка вдвое около $x = 0$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00006.

Литература

1. *Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G.* Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit // *Surveys in Geophys.* 2019. V. 40, № 1. P. 1–35.
2. *Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G.* Correction to: Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit // *Surveys in Geophys.* 2019. V. 40, № 1. P. 37.

Вариации экваториальных электроструй, порождаемых грозами

В. В. Денисенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

При рассмотрении атмосферной части глобальной электрической цепи (ГЭЦ) поверхность Земли и ионосферу в первом приближении рассматривают как идеальные проводники с разностью потенциалов, образующейся за счет грозовой активности. Основной поправкой является распределение потенциала в ионосфере, порождаемое магнитосферными и ионосферными генераторами.

Токи из грозовых областей попадают в лежащие над ними части ионосферы, а возвращаются на землю, как токи хорошей погоды, глобально. Необходимый для этого перенос заряда по ионосфере происходит за счет внутриионосферных электрических токов. Как и во всякой глобальной токовой системе происходит концентрация токов в областях с высокой проводимостью: в дневной ионосфере, в авроральных зонах и в окрестности геомагнитного экватора. В последнем случае интересующая нас интегральная проводимость поперек магнитного поля велика, поскольку длинные участки магнитных силовых линий расположены внутри E и F слоев, где велики локальные Педерсеновская и Холловская проводимости. Сила тока электроструи пропорциональна проводимости области электроструи A_{jet} , которая равна интегралу по магнитным силовым линиям, лежащим в этой области, от интегральной Каулинговской проводимости.

Мы сосредоточились на экваториальных электроструях, поскольку видим шанс именно в них наблюдать ионосферную часть ГЭЦ.

Первая версия нашей модели ионосферных электрических полей и токов, порождаемых грозами, описана в [3]. Позднее мы усовершенствовали модель грозового генератора, используя данные о распределении молний по Земле [1]. На Рис. 1 из [2] представлены результаты расчета для 18:00 UT в январе, когда в соответствии с диаграммой Карнеги электрическое поле хорошей погоды имеет максимальную напряженность. Горизонтальные стрелки показывают направления экваториальных электроструй.

Поскольку грозовая активность варьируется в течение суток и зависит от сезона, соответствующие вариации происходят в ионосферных токах, включая положение и интенсивность электроструй. Изучение последних позволяет выделить место и время измерений, позволяющие отстроиться от других генераторов. Это должна быть ночь, поскольку другие экваториальные электроструи ночью почти отсутствуют, и вблизи меридианов, ограничивающих основные грозовые области, поскольку именно через такие сечения окрестности геомагнитного экватора текут струи с максимальной силой тока.

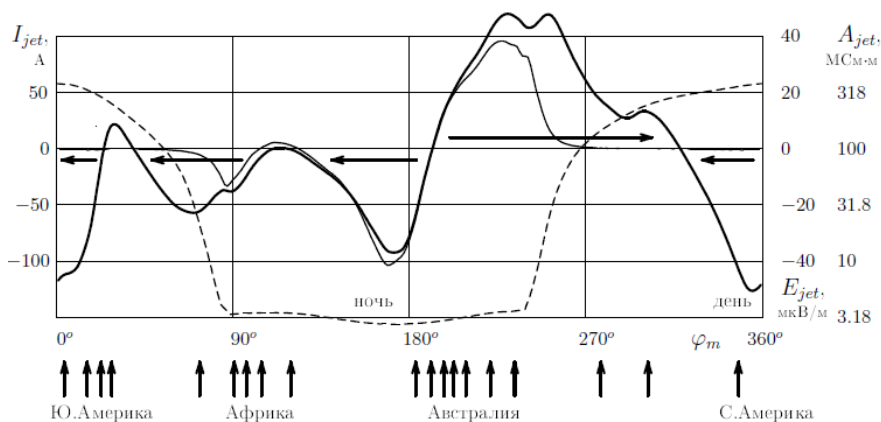


Рис. 1. Ток электроструй I_{jet} (жирная линия), проводимость области электроструи A_{jet} (штриховая линия) и азимутальная компонента электрического поля E_{jet} (тонкая линия), в зависимости от геомагнитной долготы. Вертикальные стрелки характеризуют токи, поступающие в ионосферу из грозовых областей; каждая стрелка соответствует 100 А вблизи этого меридиана.

Рассчитаны магнитные возмущения, которые такие электроструи создают на поверхности Земли. Они могут достигать 0.3 нТ, то есть, в принципе, могут быть измерены с помощью меридиональной цепочки высокочувствительных магнитометров.

Литература

1. Денисенко В.В., Ляхов А.Н. Сравнение наземных и спутниковых данных о пространственно-временном распределении грозовых разрядов при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, вып. 4. С. 111–119.
2. Денисенко В.В., Райкрофт М.Дж., Харрисон Р.Дж. Математическая модель глобального ионосферного электрического поля, создаваемого грозами // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2023. Т. 87, вып. 1. С. 141–147.
3. Denisenko V.V., Rycroft M.J., Harrison R.G. Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit // Surveys in Geophys. 2019. V. 40, № 1. P. 1–35.

Особенности молниевой активности при извержении вулкана Тонга

Ю. В. Поклад, И. А. Ряховский, Б. Г. Гаврилов, В. М. Ермак
Институт динамики геосфер им. ак. М.А.Садовского РАН, Москва

Вулкан Хунга Тонга–Хунга Хаапай ($20^{\circ}34' S$, $175^{\circ}22' W$) расположен в юго-западной части Тихого океана. Значительная вулканическая активность началась с декабря 2021 года. Основное извержение произошло 15 января 2022 года в 04:14:45 UT. Подъем вулканического облака сопровождался сильной грозовой активностью. Максимум разрядной активности был достигнут примерно через 45 минут после начала извержения (в 05:00 UT) и количество молний превышало значение в 2500 разрядов в минуту. Это сопоставимо со средней грозовой активностью по всей Земле. В ГФО «Михнево» с 2011 года ведется непрерывная регистрация вариаций магнитного поля в КНЧ диапазоне — от 0.001 до 120 Гц. В режиме постобработки рассчитываются параметры Шумановского резонатора (ШР) [2].

Считается, что основным источником накачки ШР являются грозовые разряды. Поэтому, мощная грозовая активность в вулканическом облаке привела к увеличению амплитуды ШР. На рис. 1 приведены амплитуды первых трех мод ШР и количество грозовых разрядов по данным [1]. Амплитуды рассчитывались по методике [2], которая позволяет получать параметры ШР с разрешением 3 минуты.

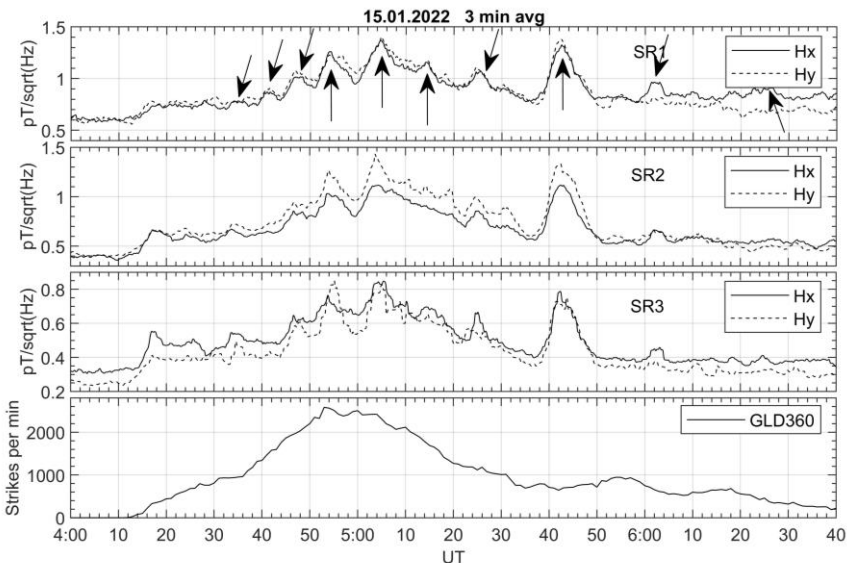


Рис. 1. Амплитуда первых трех мод ШР и грозовая активность в облаке (нижняя панель).

На вариациях амплитуды мы наблюдаем периодические максимумы, отмеченные стрелками. Они никак не коррелируют с грозовой активностью. Время возникновения этих максимумов приведено в таблице.

Таблица. Время максимумов амплитуды ШП

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, UT	4:35	4:41	4:47	4:54	5:05	5:14	5:25	5:42	6:02	6:24

Это может свидетельствовать о возникновении в эти времена разрядов с большим токовым моментом. Высота вулканического облака при этом составляла 35–55 км, что, в свою очередь, могло привести к возникновению разрядов между облаком и нижней ионосферой типа Эльфов, Спрайтов и Джетов. Такие разряды обладают большим токовым моментом.

На рис. 2 показана зависимость периода между максимумами от квадрата диаметра вулканического облака. Мы можем наблюдать линейную зависимость.

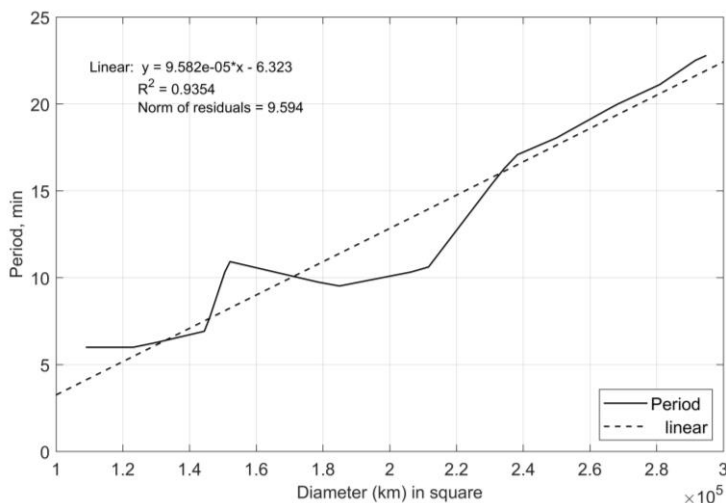


Рис. 2. Зависимость периода между максимумами ШП от квадрата диаметра вулканического облака.

Литература

1. Van Eaton A. R., Lapierre J., Behnke S. A., Vagasky C., Schultz C. J., Pavolonis M. et al. (2023). Lightning rings and gravity waves: Insights into the giant eruption plume from Tonga's Hunga Volcano on 15 January 2022. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102341. DOI: 10.1029/2022GL102341
2. Poklad Yu. V., Ryakhovsky I. A., Gavrilov B. G., Ermak V. M., Kozakova E. N., Achkasov N. S. Investigation of the Reaction of Schumann Resonances to Short Transient Geophysical Events Under the Influence of Atmospheric Electromagnetic Noise. *JGR Atmosphere*, Volume127, Issue16, e2022JD036820. DOI: 10.1029/2022JD036820

Реакция напряженности электрического поля приземной атмосферы на солнечные протонные события

А. А. Черкесов

Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик

Солнечно-земные связи оказывают несомненное влияние на погоду и климат Земли. Механизмы этих связей изучены не полностью. Так, последствия действия солнечно-земных связей могут оказать вспомогательное, а иногда, и решающее влияние на формирование электрического поля приземной атмосферы Земли. Данный вывод в работе сделан на основе анализа значений показателей, которые отражают изменения активности на Солнце и как следствие формируют свойства солнечного ветра, ударяющего по Земле — солнечных протонных событий (СПС), и суточных вариаций напряженности электрического поля приземной атмосферы.

В работе использованы суточные данные регистраций вариаций напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы на высокогорной станции «пик Чегет», высота 3100 м и каталог солнечных протонных событий [1].

В работе рассматриваются суточные вариации напряженности электрического поля приземной атмосферы во время СПС (рис. 1). Как видим из рис. 1, наблюдаются резкие короткопериодные скачки до -10 кВ/м 13.05.2013 г. и 15.05.2013 г. В эти же дни согласно [1] были зарегистрированы и СПС. Аналогичные данные получены при сравнении и других дней, когда наблюдались СПС.



Рис. 1. Вариация напряженности электрического поля атмосферы с 13 по 15 мая 2013 г.

Литература

1. Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А., Гинзбург Е.А. и др. Каталог солнечных протонных событий в 24-м цикле солнечной активности (2009–2019) // Хранилище ESDB, ГК РАН. Москва. DOI: 10.2205/ESDB-SAD-008.

Сейсмичность и пространственное распределение молний

Н. В. Ягова¹, С. Л. Гаранин², А. Ю. Щекотов¹, Н. С. Носикова^{1,3}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва

² Институт геохимии и аналитической химии им В.И.Вернадского РАН, Москва

³ Национальный ядерный исследовательский университет МИФИ, Москва

Эффект пресеismicческой вариации поляризации в диапазоне нескольких герц, наблюдавший перед землетрясениями на Камчатке и в Японии [1], ставит вопрос о возможных источниках этого эффекта. То, что в данном диапазоне частот вклад излучений от региональной грозовой активности является существенным и известны отдельные случаи пространственного перераспределения молний накануне землетрясений [2], позволяет сформулировать гипотезу о возможной связи пространственного распределения молний и сейсмичности. В работе статистически исследуются параметры пространственного распределения молний накануне сильных землетрясений с $M > 7$ в Тихоокеанском регионе и Латинской Америке для разных временных и пространственных сеток. В качестве базы для сравнения используются те же регионы в периоды без сильных землетрясений. Для исключения сезонного хода рассматриваются одинаковые периоды года, и для них сравниваются средние значения и дисперсии параметров пространственных распределений. Среди параметров пространственных распределений используются как моменты распределений на масштабах сотен километров, так и уровень их кластеризации и характерный размер кластера в зависимости от направления. Для катастрофического землетрясения Тохоку 11 марта 2011 г. обнаруживается перегруппировка молний относительно направления разлома в период за 6–18 дней до главного удара.

Работа поддержана грантом РФФ 22-17-00125

Литература

1. *Schekotov A.Y., Molchanov O.A., Hayakawa M., Fedorov E.N., Chebrov V.N., Sinitzin V.I., Gordeev E.E., Belyaev G.G., Yagova N.V.* ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity // *Radio Sci.* 2007. V. 42. RS6S90. DOI: 10.1029/2005RS003441
2. *Yagova N.V., Sinha A.K., Pilipenko V.A., Fedorov E.N., Holzworth R., Vichare G.* ULF electromagnetic noise from regional lightning activity: Model and observations // *Journ. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2019. V. 182, P. 223–228. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.12.005

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

**Исследование связи градиента потенциала
электрического поля с метеоусловиями
в интересах идентификации ресурсных облаков
и организации активных воздействий на погоду**

В. И. Акселевич, Г. И. Мазуров

Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова Росгидромета, С.-Петербург

При рассмотрении возможности создания дождевых облаков и рассеяния низких облаков и туманов было выявлено, что именно электрическое и электромагнитное воздействие могут оказаться полезными для решения перечисленных проблем. Существует несколько авантюристическое направление сторонников электрического и электромагнитного воздействия на погоду. К его авторам можно отнести Л.С. Ивлева (СПбГУ, ГГО), профессора ЦАО С.П. Перова, В.И. Уйбо, Л.В. Сорокина (РУДН) и ряд других ученых.

Так В.И. Уйбо провел ряд экспериментов по вызыванию осадков, рассеиванию тумана и дымки, улучшению видимости в пылевой буре и ее рассеиванию, изменению положения оси струйного течения, активным воздействиям на процессы атмосферной циркуляции [1].

Известно, что увеличение интенсивности электрического поля вызывает увеличение скорости роста капелек воды в облаке и интенсивности осадков [2].

Электрическое поле в нижней атмосфере характеризуется чрезвычайно большой изменчивостью в зависимости от метеорологических условий, а также от высоты слоя над поверхностью Земли.

Измерения характеристик атмосферного электричества в приземном слое проводятся уже более 150 лет и дают информацию как о локальном электрическом состоянии, так и о функционировании всей Глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [3]. Осредненная суточная вариация градиента потенциала электрического поля известна как кривая Карнеги или унитарная вариация. Она соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения. Унитарная вариация представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды (нижняя облачность, осадки, грозы и др.) [4]. Однако, вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на суточные вариации приземного электрического поля в различных регионах земного шара [5]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости указанных полей в различных регионах Земли [6].

С другой стороны, высокая чувствительность приземного электрического поля к локальным условиям может быть использована для решения обратной задачи – получения информации о различных процессах и явлениях на основе их отклика в электрическом поле, для реализации которой также необходимо получение надежных оценок невозмущенных (фоновых) значений электрического поля в конкретном пункте. К настоящему времени подробный анализ вариаций электрического поля в условиях хорошей погоды, а также влияющих на них факторов выполнен для ряда регионов земного шара.

В связи с вышесказанным, целью данного исследования является оценка изменчивости градиента потенциала электрического поля в условиях хорошей погоды и ее связи с изменчивостью основных геофизических (в основном, метеорологических) величин в районе поселка Воейково и в условиях текущей погоды по наблюдениям за период с 1967 по 2023 год на территории РФ.

Для характеристики термического режима на территории России использовались 702 станции (из них 577 расположено на территории РФ), для анализа информации о количестве выпавших осадков — данные 455 станций (из них 315 расположено в РФ), для анализа температуры почвы — 460 станций. При измерении мощности сезонно-талого слоя (СТС) учитывали данные с 41 площадки. Для анализа таких видов радиации как прямая солнечная радиация на горизонтальной поверхности, рассеянная и суммарная радиация были использованы данные 74 станций.

По электричеству в РФ проводят наблюдения 9 станций.

Литература

1. *Ивлев Л.С., Уйбо В.И., Перов С.П., Челибанов В.П.* Электромагнитные методы воздействия на природную среду/СПб., Изд-во ВВМ, 2016. 502 с.
2. *Клинго В.В.* Ионы естественной атмосферы как электростатические системы//В сб. Трудов Второй международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли», СПб.: 2000. С.232–238.
3. *Чалмерс Дж.А.* Атмосферное электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. 420 с.
4. *Mezuman K., Price C., Galanti E.* On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells // Environmental Research Letters. 2014. Vol. 9 (12). P. 124023.
5. The Electric Field of the Undisturbed Atmosphere in the South of Western Siberia: A Case Study on Tomsk / K.N. Pustovalov [et al.] // Atmosphere. 2022. Vol. 13. P. 614.
6. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research / K.A. Nicoll [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2019. V. 184. P. 18–29.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. – Москва, 2023. – 104 с. http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2022_s_podpisiyu_compressed_with_cover.pdf

Предварительные результаты лабораторных экспериментов по взаимодействию ионного ветра и влажного воздуха

А. В. Алексеева, А. А. Палей

Институт прикладной геофизики им. ак. Е.К.Федорова, Москва

Мы изучаем влияние ионного ветра на влажность воздуха. Палей и др. [1] показали, что электрические заряды увеличивают активность и формируют новые центры конденсации на всех частицах потока ионного ветра. Аэрозольные частицы, которые по своим параметрам (размеру и лиофильности) в естественных условиях не могли бы стать активными центрами конденсации, после их заряжения электрическими зарядами превращаются в дополнительные центры конденсации. Процесс конденсации на них происходит не только за счет диффузии молекул воды из газовой смеси, а также и за счет движения дипольных молекул воды в неоднородном электрическом поле. Образуются силы, притягивающие пары воды к аэрозольным частицам из окружающей парогазовой смеси, вследствие чего рост капель на дополнительных центрах конденсации происходит практически мгновенно.

Для оценки эффективности влияния ионного ветра на влажность воздуха в Институте прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова создана специальная лабораторная установка. Подробное описание установки представлено в [2]. Результаты предварительных экспериментов показывают, что ионный ветер оказывает влияние на состояние воздушно-капельной смеси.

Литература

1. *Палей А.А., Лапшин В.Б., Бальшиев А.В., Матвеева И.С., Жохова Н.В.* Метод очистки газовых потоков от природных и техногенных аэрозолей, включающих субмикронные составляющие. Эл. журнал «Исследовано в России», 2007, 28, С. 275–280.
2. *Алексеева А.В., Давыдов В.Е., Зинкина М.Д., Палей А.А., Писанко Ю.В.* Лабораторный эксперимент по исследованию ионного ветра коронного разряда на тёплый туман в замкнутом объёме // Метеорология и гидрология, 2022, № 8, С. 120–124.

Система мониторинга геоиндуцированных токов в нейтрали силового трансформатора

В. В. Вахнина, А. Н. Черненко, А. А. Кувшинов, А. В. Бычков, О. В. Федяй
Тольяттинский государственный университет, Тольятти

Негативное воздействие геоиндуцированных токов (ГИТ) на функционирование электроэнергетических систем (ЭЭС) известно достаточно давно [1, 2]. Быстрые вариации геомагнитного поля при геомагнитных бурях (ГМБ) генерируют геоэлектрическое поле напряженностью до десятков В/км, создающее между заземленными нейтралью силовых трансформаторов разность потенциалов, под воздействием которой по фазным проводам линий электропередачи и обмоткам высокого напряжения протекают ГИТ. Частота ГИТ (не более 0.1 Гц) определяется частотой вариаций геомагнитного поля и во много раз меньше номинальной частоты (50 Гц) напряжения ЭЭС, а величина ГИТ может составлять от единиц до сотен ампер. Для режима функционирования ЭЭС опасность представляют ГИТ, величина которых достаточна для насыщения магнитной системы силовых трансформаторов.

Своевременное обнаружение опасных по величине ГИТ является необходимым условием принятия адекватных диспетчерских решений для сохранения устойчивости режима функционирования ЭЭС в условиях ГМБ и может быть обеспечено путем мониторинга тока в заземленных нейтральных блочных трансформаторов электростанций, сетевых трансформаторов тупиковых подстанций, узловых и проходных подстанций с различной пространственной ориентацией примыкающих линий электропередачи. Необходимо также учитывать, что наиболее чувствительны к воздействию ГИТ силовые трансформаторы с номинальной мощностью свыше 80–100 МВА, номинальным напряжением обмоток высокого напряжения 220 кВ и выше, с магнитной системой броневое и бронестержневого типа.

За рубежом серийно выпускаются специализированные средства для непосредственного измерения ГИТ. В качестве примера можно привести простой датчик типа GIC-4 (Dynamic Ratings), позволяющий измерять ГИТ величиной до 360 А и выполненный в виде трансформатора тока с разъемным сердечником и элементом Холла, а также более совершенное устройство типа ECLIPSE HECT (Advanced Power Technologies), которое кроме измерения ГИТ определяет уровень гармоник в токе силового трансформатора, появляющихся из-за насыщения магнитной системы. Отечественные аналоги не выпускаются, поэтому актуальной является задача создания технических средств для мониторинга ГИТ. В данной работе предлагается локальная система мониторинга и регистрации опасных для силового трансформатора ГИТ, в состав которой входят:

- блок измерения тока нейтрали, эксплуатируемый в условиях открытого распределительного устройства подстанции (электростанции) и содержащий измерительный преобразователь тока с датчиком Холла и разъемным корпусом для установки на токовую шину без демонтажа и системы микроклимата;
- блок обработки и регистрации, размещаемый на общеподстанционном пульте управления и содержащий блок фильтров для обнаружения ГИТ в составе тока нейтрали и аварийного процесса насыщения магнитной системы силового трансформатора, блок формирования сигнала запуска регистрации параметров аварийного процесса, регистратор аварийных событий.

Основные технические характеристики локальной системы мониторинга ГИТ:

- величина измеряемого ГИТ до 1000 А;
- ток однофазного короткого замыкания на стороне высокого напряжения силового трансформатора до 5000 А;
- частота измеряемого ГИТ от 0 Гц до 0.1 Гц;
- режим измерения ГИТ — непрерывный;
- режим регистрации ГИТ — по сигналу запуска при насыщении магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ;
- возможность сохранения информации и передачи по протоколу МЭК 61850 для объединения локальных систем мониторинга ГИТ отдельных силовых трансформаторов в глобальную систему мониторинга ГИТ в критических узлах ЭЭС;
- дополнительная визуальная индикация «светофорного» вида для быстрого принятия диспетчерского решения по снижению нагрузки для защиты от повреждения силового трансформатора: «зеленый» — ГИТ отсутствует, «желтый» — ГИТ недостаточно большой для насыщения магнитной системы; «красный» — ГИТ вызывает насыщение магнитной системы.

Литература

1. *Wik M., Viljanen A., Pirjola R., Pulkkinen A., Wintoft P., Lundsted H.* Calculation of geomagnetically induced currents in 400 kV power grid in southern Sweden // *Space weather*. 2008. Vol. 6. S07005. DOI: 10.1029/2007 SW000343.
2. Report of the Commission to Assess the Threat to the United States from Electromagnetic Pulse (EMP) Attack. Critical National Infrastructures, 2008. Угрозы космической погоды: социальные и экономические последствия: доклад американской Академии наук (NAS) и НАСА (NASA), 2008. 125 с.

Влияние моды Эль-Ниньо – Южное колебание на молниевую активность в средних широтах

А. В. Волкова¹, Н. Н. Слюняев¹, Ф. Г. Сарафанов^{1,2}, Н. В. Ильин¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

Явление Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК) представляет собой крупномасштабную климатическую моду, возникающую в результате взаимодействия тропического Тихого океана и атмосферы [1]. Две противоположных фазы Эль-Ниньо – Южное колебание — Эль-Ниньо и Ла-Нинья — относятся к числу наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на погоду и климат в различных районах Земли [2, 3].

Для исследования влияния Эль-Ниньо – Южное колебание на молниевую активность использовались данные World Wide Lightning Location Network (WWLLN) о количестве молниевых вспышек на пространственной сетке $1^\circ \times 1^\circ$ для периода с 1 января 2010 г. по 31 декабря 2021 г.

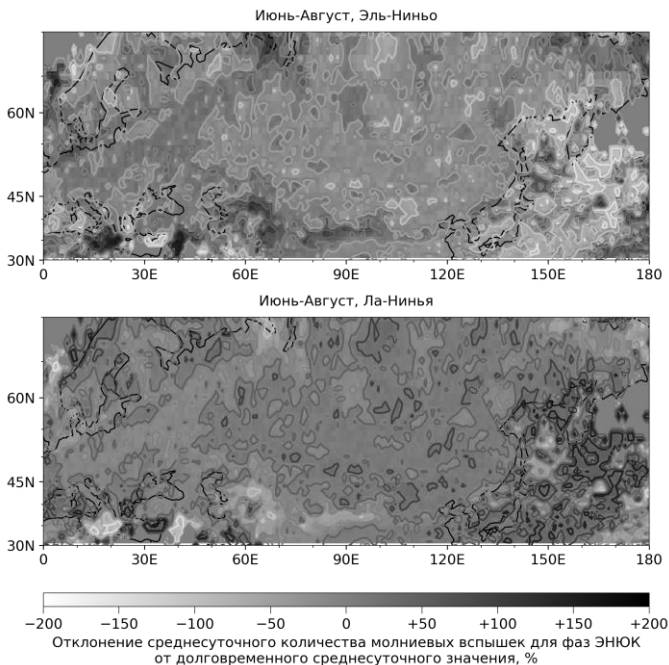


Рис. 1. Аномалии среднесуточного количества молниевых вспышек (в %) на территории России в летнее время для сезонов Эль-Ниньо и Ла-Нинья (относительно долговременных суточных значений для выбранного периода). На основе данных WWLLN за 2010–2021 годы.

На Рис. 1. показаны аномалии количества молниевых вспышек в летнее время Северного полушария (с июня по август) в сезоны Эль-Ниньо и Ла-Нинья относительно средних значений для данного периода. На территории России наблюдается преимущественно отрицательный отклик на события Эль-Ниньо и положительные на события Ла-Нинья. Однако на Европейской части России наблюдается противоположный отклик: положительный на события Эль-Ниньо и отрицательный на события Ла-Нинья.

Работа выполнена при поддержке программы развития ННГУ «Приоритет-2030» в рамках стратегического проекта «Комфортная окружающая среда».

Литература

1. *Yang S., Li Z., Yu J., Hu X.* El Niño-Southern Oscillation and Its Impact in the Changing Climate // National Science Review. 2018. V. 5, P. 840–857.
2. *Philander S.G.* El Niño and La Niña / Journal of the Atmospheric Sciences. 1985. V. 42, P. 2652–2662.
3. *Rasmusson E.M., Carpenter T.H.* Variations in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño // Monthly Weather Review. 1982. V. 110, P. 354–384.

Лабораторные эксперименты по исследованию влияния ГЭЦ переменного тока на живые системы

Н. В. Ильин, М. А. Гринберг, Е. А. Мареев

Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

Глобальная электрическая цепь переменного тока является природным генератором электромагнитного шума на нашей планете. Особый интерес для исследования представляют шумановские резонансы — колебания в резонаторе Земля – ионосфера, возбуждаемые естественными источниками электромагнитного излучения — токами молниевых разрядов. Несмотря на значительный интерес к теоретическому и экспериментальному изучению шумановских резонансов, глобальному теоретическому моделированию в литературе уделяется не так много внимания. При этом попытки рассматривать ГЭЦ постоянного тока и шумановские резонансы совместно являются одной из тенденций последних лет.

Не следует забывать, что биосфера Земли эволюционировала в присутствии низкочастотного электромагнитного шума, и, по-видимому, живые организмы сформировали способность его воспринимать. В современной литературе представлено большое количество примеров феноменологического описания биоэффектов, вызываемых низкочастотными полями, равными или близкими к базовой частоте и гармоникам резонанса Шумана.

В данной работе представлено описание лабораторных экспериментов по изучению влияния магнитных полей на частотах шумановских резонансов на физиологические и сигнальные процессы в высших растениях.

Одним из наиболее значимых результатов экспериментов является увеличение амплитуды светоиндуцированных электрических реакций при воздействии слабым магнитным поля на частоте второго шумановского резонанса и его окрестностях.

Работа выполнена при поддержке проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

Исследование продолжительности гроз и поражаемости поверхности земли наземными молниями на Северном Кавказе.

А. Х. Аджиев, З. М. Керефова

Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик

Исследование гроз на Северном Кавказе особенно актуально, поскольку в регионе наблюдается большое количество дней с грозой. Грозы поражают, как наземные объекты, так и летательные аппараты, поэтому важна точная информация о параметрах молний. Оперативное определение характеристик гроз может решить некоторые проблемы метеорологии, авиации, молниезащиты.

В настоящей работе приводится исследование физико-статистических характеристик грозовой деятельности и поражаемости территории и объектов молниями, характерных для Северного Кавказа. Неоднородное распределение среднегодовой продолжительности гроз на территории Северного Кавказа исследовался инструментальными и визуально-слуховыми способами.

Выполненный анализ данных основан на данных грозопеленгационной сети ФГБУ «ВГИ» и данных метеостанций. Проводилось исследование взаимосвязи между числом грозовых дней и продолжительностью гроз в часах за 2008–2019 гг. наблюдений. На их основе для различных территорий сгруппированы для анализа: число дней с грозой в месяц, в год, а также продолжительность грозы в месяц и в год.

В результате исследований были построены карты районирования территории России по среднегодовой продолжительности гроз в часах. Также построена карта среднегодовой поражаемости поверхности земли наземными молниями на Северном Кавказе.

Оценка относительных вариаций аэрозольных частиц мегаполиса на основе данных натуральных наблюдений

А. В. Крашенинников, Д. Н. Локтев, С. П. Соловьев

Институт динамики геосфер им. ак. М.А.Садовского РАН, Москва

Различные факторы влияют на электрическое поле атмосферы в приземном слое [3]. Одним из таких факторов являются аэрозольные частицы от пожаров и других источников, которые могут оказывать сильное влияние на электрические параметры атмосферы [1]. Повышение концентрации аэрозольных частиц может приводить к снижению электропроводности и, как следствие, повышению напряжённости электрического поля [2]. Таким образом, электропроводность и напряжённость электрического поля могут служить для мониторинга загрязнения атмосферы [4, 5].

Оценка вариаций аэрозольных частиц проводилась на основе модели, построенной на уравнениях Максвелла в одномерном стационарном приближении в отсутствии локальных генераторов электрического поля, и уравнениях ионно-рекомбинационного равновесия для монодисперсного однозарядного аэрозоля. Рассматривались две точки — одна, расположенная в загрязнённой аэрозолем местности мегаполиса, а другая — на удалении от неё, где отсутствуют вызванные им возмущения. В зоне, где присутствует аэрозоль, считалось, что он распределён в горизонтально-однородном слое с убывающей по степенному закону концентрацией.

В работе использовались данные натуральных измерений в геофизической обсерватории «Михнево» и Центре геофизического мониторинга Москвы ИДГ РАН, расстояние между которыми составляет около 80 км. Первый находится внутри мегаполиса, а другой — вне зоны его влияния, в местности, удалённой от промышленных предприятий, городов, автомагистралей и других возможных источников техногенных возмущений. В каждой из точек наблюдений расположены датчики Voltek EFM-100 для измерения напряжённости электрического поля и датчики Sensirion SPS-30 для измерения концентраций взвешенных частиц. Для наблюдений за метеопараметрами используется автоматическая станция Davis Vantage Pro2.

Отношения получасовых усреднений получаемых данных напряжённости электрического поля в каждом из пунктов наблюдения в условиях хорошей погоды использовались как входные данные модели. По ним проводился расчёт относительного изменения концентрации частиц в мегаполисе.

На рисунке 1 представлен график рассчитанного по модели изменения концентраций частиц и отношение измеренных концентраций PM_{1,0} в городе к концентрации вне его влияния. Видно совпадение общего хода указанных величин.

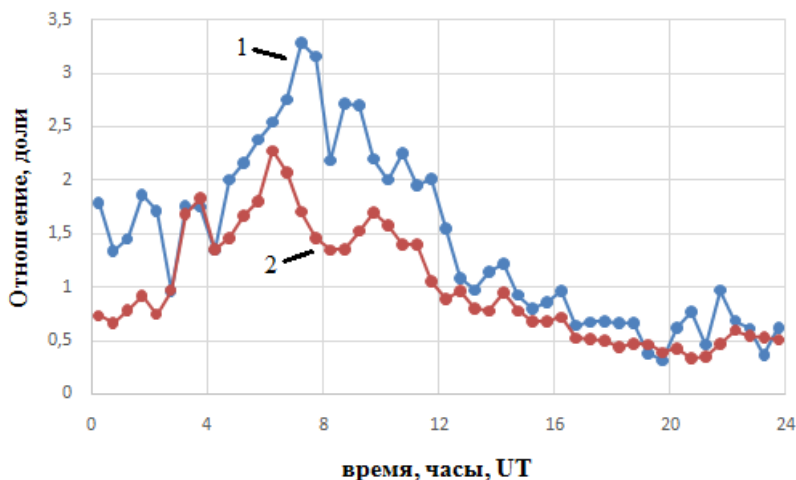


Рис. 1. Вариации рассчитанных по модели относительных изменений концентраций частиц (1) и измеренных относительных концентраций PM1.0 (2). 14 ноября 2022 г.

Литература

1. Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В. Дымовые шлейфы от природных пожаров и электрическое состояние приземного слоя атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 2. С. 155–162.
2. Морозов В.Н., Зайнетдинов Б.Г., Занюков В.В. Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь // Системный синтез и прикладная синергетика. Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции. Ростов-на-Дону – Таганрог. 2022. С. 304–309.
3. Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Шихова Н.М. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI, № 11–12. С. 787–802.
4. Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров А.И., Егоров Е.В., Купинская А.И. Возможность использования результатов атмосферно-электрических измерений для мониторинга аэрозольного загрязнения воздуха // Глобальная электрическая цепь. Материалы четвертой всероссийской конференции. Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. 2019. С. 60.
5. Редин А.А., Куповых Г.В., Кудринская Т.В., Гривцов В.В. Атмосферно-электрические наблюдения как метод контроля техногенного воздействия на атмосферу // Технологии техносферной безопасности. 2017. Т. 71, № 1. С. 271–277.

Экспериментальные наблюдения за аэроионами на различных ландшафтах на юге Сибири

*М. В. Оглезнева¹, П. М. Нагорский¹, К. Н. Пустовалов^{1,2}, А. А. Сам¹,
С. В. Смирнов^{1,2}*

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

В настоящее время ионизационному состоянию приземного слоя атмосферы посвящено много работ. Наблюдения за концентрацией ионов и их динамикой в полевых условиях необходимы для лучшего понимания образования и роста ионов и новых частиц [1–3]. При этом концентрации положительных и отрицательных ионов различаются по всему миру, но основные причины до сих пор в значительной степени остаются неизвестны [3]. В данной работе проведён анализ вариаций концентраций ионов в условиях «хорошей погоды» в типичных природных ландшафтах на юге Сибири в тёплый период года.

Исследование основано на данных измерений атмосферно-электрических и метеорологических величин в пунктах экспедиционных измерений на юге Сибири. Экспедиционные работы проводились в июле–августе 2022 г. в 3 пунктах наблюдений на территориях Хакасии и Тывы, расположенных на разных высотах и в различных формах рельефа и ландшафтах (таблица): урочище Красная сопка — участок в Июско-Ширинской степи на водоразделе озёр Белё и Тус (Республика Хакасия); урочище Шоль — полупустыня в середине Центрально-Тувинской котловины (Республика Тыва); высокогорное плато с горной тундрой и альпийскими лугами вблизи массива Монгун-Тайга и оз. Хиндиктиг-Холь (Республика Тыва).

Таблица. Описание пунктов наблюдений

№	Район наблюдений	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Абсолютная высота, м	Периоды наблюдений
1.	Красная Сопка (Хакасия)	54.69	90.00	540	11–14.08.2022
2.	Шоль (Тыва)	51.49	94.40	910	01–06.08.2022
3.	Монгун-Тайга (Тыва)	50.35	89.95	2490	24–29.07.2022

Нами предварительно выбирались открытые однородные участки, репрезентативные для значительной территории и не подверженные антропогенному влиянию. Для исключения воздействия атмосферных явлений экспедиционные измерения в описанных выше пунктах проводились, главным образом, при антициклональных синоптических условиях над регионом исследования, с которыми была связана ясная или малооблачная погода.

Регистрацию концентраций положительных (n_+) и отрицательных (n_-) аэроионов проводили с помощью двух счетчиков аэроионов AIC2 (Alpha

Lab, Inc.). Счетчики размещались на штативах на высоте 1 м. Для интерпретации полученных результатов проводились синхронные измерения за градиентом потенциала электрического поля, метеорологическими величинами, солнечной радиацией, а также аэрозолем. Градиент потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) измеряли с помощью портативного флюксметра EFS-2/50 (NTTCR), установленного на заземленной треноге, на высоте 2 м. Автоматическая метеорологическая станция AW003 (Amtast, Inc.) регистрировала основные метеорологические величины. Концентрации PM_{2,5} и PM₁₀ измерялись на уровне 1 м датчиком пыли SDS011 (Shandong Nova Technology Co., Ltd). Солнечная радиация в УФ и видимой областях спектра измерялась на уровне 3 м с помощью многоканального радиометра NILU-UV-6T (Geminali AS).

Проведён анализ динамики аэроионов в условиях «хорошей погоды» в типичных природных ландшафтах на юге Сибири в тёплый период года на примере пунктов экспедиционных наблюдений.

Среди рассматриваемых пунктов наблюдений наибольшая средняя концентрация отрицательных ионов наблюдалась в урочище Шоль и составляла $1.4 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, в урочище Красная сопка — $0.99 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, а вблизи горного массива Монгун-Тайга — $0.6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$. Для положительных ионов наибольшая средняя концентрация была зарегистрирована в урочище Красная сопка — $1.76 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, вблизи горного массива Монгун-Тайга — $3.5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$, а в урочище Шоль — $2.31 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, № 22-27-00482 (<https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>).

Литература

1. *Suni T. et. al.* Formation and characteristics of ions and charged aerosol particles in a native Australian Eucalypt forest // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2008. V. 8, P. 129–139.
2. *Boulo. J.* New particle formation and ultrafine charged aerosol climatology at a high altitude site in the Alps (Jungfrauoch, 3580 m a.s.l., Switzerland) // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. P. 9333–9349.
3. *Junninen H. et. al.* Terpene emissions from boreal wetlands can initiate stronger atmospheric new particle formation than boreal forests // Communications Earth and Environment. 2022. V. 3, 93.

Вариации аэроионов в Томске

М. В. Оглезнева¹, П. М. Нагорский¹, К. Н. Пустовалов^{1,2}

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

В настоящее время признано, что атмосферные ионы не только играют важную роль в определении электрического состояния атмосферы, но также могут влиять на свойства аэрозоля и облаков и, в конечном счете, на климат [1]. В работе [2] подробно рассмотрено влияние заряженных частиц в атмосфере на аэрозоли и микрофизические процессы в облаках. Однако, мало работ посвящено влиянию атмосферных явлений на концентрацию легких ионов, особенно в континентальных районах. Цель данного исследования: оценка характеристик временной изменчивости концентрации лёгких ионов, связанной с наличием атмосферных явлений конвективного происхождения, а также в условиях «хорошей погоды» в Томске.

На геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (г. Томск) с 2006 г. ведётся мониторинг метеорологических и атмосферно-электрических величин, в том числе содержания лёгких ионов в воздухе. Для регистрации концентрации легких ионов в 2014–2016 гг. использовался счетчик «Sapphire-3М» (НПФ «Янтарь»). Прибор измеряет концентрацию лёгких ионов с подвижностью не менее $0.4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. С 2021 г. в обсерватории начали функционировать счетчики аэроионов АИС (AlphaLab, Inc.) с подвижностью не менее $1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Поскольку рабочие условия «Sapphire-3М» ограничены температурой от 15 до 25°C, а АИС — 0°C, то измерения этим приборами осуществлялись только в тёплое время года.

Проведён анализ изменчивости концентрации положительных и отрицательных лёгких ионов (n_{\pm}) во время прохождения конвективной облачности, генерирующей опасные атмосферные явления (гроза, ливни), а также в условиях «хорошей погоды». Получены оценки суточной и внутрисезонной изменчивости концентрации лёгких ионов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СОРАН, проект FWRG-2021-0001 (номер госрегистрации 121031300154-1).

Литература

1. *Harrison R.* Cloud Formation and the Possible Significance of Charge for Atmospheric Condensation and Ice Nuclei // *Space Science Reviews.* – 2000. – V. 94. – P. 381–396.
2. *Harrison R.G., Carslaw K.S.* Ion–aerosol–cloud processes in the lower atmosphere // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41. P. 1012–1037.
3. *Wang Y., et. al.* Temporal Variation of Atmospheric Static Electric Field and Air Ions and their Relationships to Pollution in Shanghai // *Aerosol Air Qual. Res.* 2018. V. 18. P. 1631–1641.

Экстремальная молниевая активность в Арктическом регионе

А. П. Попыкина, Н. В. Ильин, Ф. Г. Сарафанов

Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

В последние годы многими авторами отмечается усиление грозовой активности в северных широтах. Так, например, в работах [1, 2] указывают на возможную связь глобальной климатической изменчивости и молниевой активности. Авторы отмечают рост количества молниевых вспышек севернее 80° с.ш. на протяжении нескольких сезонов.

В данной работе проанализированы молниевые вспышки по данным грозопеленгационной сети WWLLN в области севернее 80° с.ш. На рисунке 1 показано количество молний за 2016–2021 годы. Показательно, что статистику сезонов определяют отдельные мощные грозовые события, происходящие по одному за сезон.

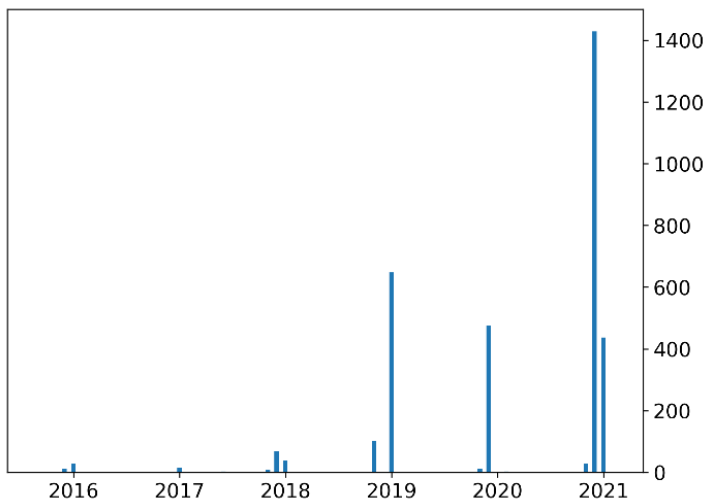


Рис. 1. Количество молний по месяцам 2016–2021 гг. севернее 80° с.ш.

В 2019–2021 годах выявлены три грозы с рекордным количеством молний в северных широтах: 10.08.2019, 01.07.2020, 29.07.2021. В рамках исследования особое внимание было уделено природе и характеру развития мощных конвективных событий, наблюдавшихся в арктическом регионе. Для детального анализа событий было проведено численное моделирование с помощью Weather Research and Forecasting (WRF) model. Моделирование проводилось на двух вложенных доменах с шагом 27 км на внешней сетке и 9 км на внутренней. Начальные данные GFS 0.25. Исследование показало,

что рассматриваемые грозовые события происходили на фоне сильного прогрева поверхности на северном побережье Евразии (до 30–32°C). Области высокой радиолокационной отражаемости по данным модели зарождались на достаточном удалении от берега Северного Ледовитого океана, над материком, и по мере развития перемещались в северные регионы.

Можно сделать вывод, что сильная конвективная система могла формироваться над прогретым материком, а затем перемещаться к полюсу, что и обеспечило экстремальную, нехарактерную молниевую активность над холодным океаном.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы развития НГТУ им. П.Е. Алексеева «Приоритет-2030».

Литература

1. *Price C.G.* Lightning Applications in Weather and Climate Research // *Surv Geophys* 2013, V.34, P. 755–767. DOI: 10.1007/s10712-012-9218-7
2. *Chen Y., Romps D.M., Seeley J.T., Veraverbeke S., Riley W.J., Mekonnen Z.A., Randerson J.T.* Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon // *Nature Climate Change*. 2021 V. 11, P. 404–410.

Согласованность вариаций приземного электрического поля и геофизических величин для типичных ландшафтов на юге Сибири

*К. Н. Пустовалов^{1,2}, П. М. Нагорский¹, М. В. Оглезнева¹, А. А. Сам¹,
С. В. Смирнов^{1,2}*

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Измерения основных атмосферно-электрических величин в приземном слое дают информацию как о локальном состоянии и изменчивости электродного слоя в конкретном пункте, так и о функционировании всей глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1, 2]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости электрических величин в различных регионах Земли [3]. С другой стороны, высокая чувствительность приземного электрического поля к локальным условиям может быть использована для получения информации о различных процессах и явлениях на основе их отклика в электродном слое. Однако, для этого необходимо получение надёжных оценок как фоновой изменчивости атмосферно-электрических величин на конкретной территории, так и влияния на неё различных факторов. К настоящему времени исследования вариаций этих величин как в условиях «хорошей погоды», так и под влиянием различных факторов выполнены для ряда регионов [4–7]. При этом изменчивость атмосферно-электрических величин на территории юга Сибири, имеющей сложный рельеф и ландшафтное районирование, остаётся слабо изученной. Цель исследования – оценка согласованности вариаций электрического поля и основных геофизических величин для типичных ландшафтов на юге Сибири.

Исследование основано на данных измерений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) и основных геофизических величин (температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, характеристики солнечного излучения, радиационного фона и аэрозольного содержания и др.) в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) в 2006–2023 гг., а также в пунктах экспедиционных измерений на территории Томской и Кемеровской областей, Республики Алтай, Алтайского края, Хакасии, Тывы и Бурятии в тёплые периоды 2020–2023 гг.

Получены оценки внутригодовой изменчивости электрического поля и её связи с изменчивостью геофизических величин по данным ГО ИМКЭС. Отмечено, что внутригодовую изменчивость среднемесячных значений $\nabla\varphi$ в Томске можно приближённо описать простой волной с минимумом летом и максимумом зимой. При этом она, преимущественно, определяется из-

менчивостью радиационного фона и содержания аэрозоля, которые тесно связаны с изменениями температуры воздуха, ветра и снежного покрова.

Проведён анализ вариаций $\nabla\varphi$ в условиях «хорошей погоды» в тёплый период года на территориях с парковым городским селитебным ландшафтом (в Томске) и с естественными ландшафтами на юге Сибири на (в ходе экспедиционных исследований). Получены оценки суточной изменчивости $\nabla\varphi$ для селитебного и природных ландшафтов на юге Сибири, а также её связи с изменчивостью геофизических величин. Суточные вариации $\nabla\varphi$ на территории с селитебным ландшафтом характеризуются колебаниями континентального типа с двойным максимумом и минимумом. Суточные вариации $\nabla\varphi$ на территориях с природными ландшафтами с относительно сухим микроклиматом в центральных частях котловин, на плоскогорье и в гольцовой зоне горных хребтов также имеют вид двойной волны. Суточную изменчивость $\nabla\varphi$ на этих ландшафтах, преимущественно, определяется изменением солнечной радиации и температуры воздуха, с которыми связаны изменения интенсивности конвективных потоков и турбулентности, обуславливающих перераспределение радионуклидов и аэрозольных частиц. В ландшафтах вблизи озёр и рек, в горных долинах и у подножий горных хребтов отмечается более сложный суточный ход $\nabla\varphi$, обусловленный как влиянием описанных выше факторов, так и влиянием местной циркуляции (бризовой и горно-долинной) и местных явлений (радиационных туманов и туманов испарения).

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда, № 22-27-00482 (<https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>).

Литература

1. *Красногорская Н.В.* Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. 323 с.
2. *Harrison R.G.* The Carnegie Curve // *Surv. Geophys.* 2013. V. 34. P. 209–232.
3. *Nicoll K.A., Harrison R.G., Barta V. et al.* A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V.184. P. 18–29.
4. *Bennett A.J., Harrison R.G.* Atmospheric electricity in different weather conditions // *Weather.* 2007. V. 62. P. 277–283.
5. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Shikhova N.M. et al.* Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation / S.V. Anisimov // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2014. V. 50. P. 390–398.
6. *Adzhiev A.K., Kupovykh G.V.* Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2015. V. 51. P. 633–638.
7. *Yaniv R., Yair Y., Price C. et al.* Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // *Atmospheric Research.* 2016. V. 172–173. P. 119–125.

Атмосферно-электрические процессы, обусловленные мезомасштабными конвективными системами на юге Западной Сибири

*К. Н. Пустовалов^{1,2}, Д. Ф. Жуков², М. С. Картавых², П. М. Нагорский¹,
М. В. Оглезнева¹, С. В. Смирнов^{1,2}*

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Известно, что облачность (особенно конвективная) и различные атмосферные явления приводят к возмущению электрического состояния приземного слоя, характерного для условий «хорошей погоды». Наиболее сильное возмущение электродного слоя отмечается при прохождении кучево-дождевых (грозовых) облаков и связанных с ними явлений [1–4]. При этом наиболее экстремальными проявлениями кучево-дождевых облаков в умеренных широтах являются мезомасштабные конвективные системы (МКС), характеризующиеся большими размерами и длительностью существования [5]. МКС встречаются во многих регионах земного шара и в том числе в Сибири [6]. Атмосферно-электрические процессы, обусловленные МКС, в особенности на территории Сибири, остаются слабо изученными. Цель данного исследования – оценка характеристик пространственной изменчивости грозовой деятельности, связанной с МКС на юге Западной Сибири, а также её временной изменчивости и вариаций приземного электрического поля в пункте наблюдения (на примере г. Томска) при прохождении МКС в его окрестностях.

Дешифрирование случаев прохождения МКС над югом Западной Сибири в целом и в окрестностях пункта наблюдения выполнялось на основе спутниковых изображений, полученных по данным полярно-орбитальных (Terra, Aqua, Suomi NPP и NOAA-20) и геостационарных (Электро-Л, Himawari-8 и Meteosat-8) спутников. Для оценки характеристик пространственной изменчивости грозовой активности на территории исследования, связанной с отобранными случаями МКС, а также характеристик её временной изменчивости в ближней зоне пункта наблюдения были использованы данные о локализации разрядов молний, полученные мировой грозопеленгационной сетью — WWLLN [<https://wwlln.net/>]. Для оценки изменчивости приземного электрического поля в пункте наблюдения при прохождении МКС в его окрестностях были использованы данные мониторинга градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$) в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, полученные за период с 2006–2023 гг. с помощью флюксметров «Поле-2» (2006 – 2017 гг.) и CS110 (2017 г. – н. в.).

Во всех отобранных случаях МКС сопровождалась интенсивной грозовой активностью. Отмечено, что общая длительность грозовой активности,

обусловленной МКС за период их существования, составляла 4–12 ч (в диапазоне от 5- до 95-процентиля) и в среднем была равна ~8 ч. Количество молний из МКС, зарегистрированных WWLLN, изменялось в диапазоне 170–2400, а его среднее значение было равно ~900. Площадь, на которой регистрировались обусловленные МКС разряды молний составляла $7\text{--}38 \times 10^3 \text{ км}^2$ (в среднем $\sim 10^4 \text{ км}^2$). При этом грозовые очаги в течение периодов существования МКС перемещались на расстояние ~160–1000 км (в среднем ~500 км), как правило, в северо-восточном направлении.

При прохождении МКС в окрестностях пункта наблюдения в его ближней зоне (радиусом 16 км) отмечалась грозовая деятельность, интенсивность которой по данным WWLLN достигала 10 разрядов/мин и более, а длительность — 1 ч и более. В эти периоды в пункте наблюдения регистрировались «медленные» вариации $\nabla\varphi$ [1–4], обусловленные объёмными зарядами МКС, которые, как правило, состояли из одного продолжительного отрицательного возмущения (более 1 ч) и одного или нескольких непродолжительных положительных и отрицательных возмущений $\nabla\varphi$. Длительность «медленных» вариации $\nabla\varphi$ в среднем составляла ~2.3 ч (максимум более 5 ч), а их размах — 13 кВ/м (максимум более 20 кВ/м). На «медленные» вариации $\nabla\varphi$ накладывались высокочастотные всплески («быстрые» вариации [1]), вызванные откликом близких разрядов молний.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2021-0001 (номер госрегистрации 121031300154-1).

Литература

1. *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects / Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003. 687 p.
2. *Klimenko V.V., Mareev E.A., Shatalina M.V. et al.* On Statistical Characteristics of Electric Fields of the Thunderstorm Clouds in the Atmosphere // Radiophys. Quantum Electron. 2014. V. 56 (11–12). P. 864–874.
3. *Михайловский Ю.П., Зайнетдинов Б.Г., Синькевич А.А., Pawar S.D. и др.* Об эффективности контроля электрического состояния облаков дистанционными радиофизическими средствами в ближней зоне // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 3. С. 205–211.
4. *Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M.* Comparative Analysis of Electric State of Surface Air Layer during Passage of Cumulonimbus Clouds in Warm and Cold Seasons // Atmos. Ocean. Opt., 2018. V. 31, №6. P. 685–689.
5. *Houze R.A.* Mesoscale convective systems // Rev. Geophys. 2004. V. 42, P. RG4003.
6. *Nagorskiy P.M., Zhukov D.F., Kartavykh M.S. et al.* Properties and Structure of Mesoscale Convective Systems over Western Siberia According to Remote Observations // Russ. Meteor. Hydrol. 2022. V.47 (12). P. 938–945.

О механизме формирования аэроионов в тропосфере

*Н. П. Романов, А. Е. Вязилов, В. Н. Иванов, О. И. Озол, Д. Г. Сахибгареев,
П. Н. Свиркунов, В. Н. Яхрюшин*

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск

Механизму формирования легких аэроионов, отвечающих за проводимость атмосферы и зарядку аэрозольных частиц, посвящается большое количество работ. Однако, по мнению автора монографии [1], «до настоящего времени нет общего мнения не только по поводу количественной стороны их формирования и эволюции». Анализ последующих работ показывает, что решение этой проблемы с тех пор не сильно продвинулось (см. [2]). Объективным обстоятельством этой ситуации является изменчивость природных условий, не позволяющая экспериментально проследить процессы формирования аэроионов. В настоящей работе представляются результаты исследования процессов формирования легких аэроионов в Большой Аэрозольной Камере НПО «Тайфун» (БАК), в которой имеется возможность создавать концентрации атмосферных аэрозолей в диапазоне от уличной до практически нулевых значений [3]. Ионообразующая радиация (ИР) в БАК состоит из формируемой на высотах 20–10 км вторичной компоненты галактических космических лучей (ГКЛ) в виде потока мюонов и генерируемых при их распаде электронной, позитронной и гамма составляющих. При этом интенсивность ИР в БАК имеет постоянную величину $J = 0.07 \pm 0,001$ (мкГр/ч), что всего лишь на $\approx 13\%$ меньше среднего для внешней (уличной) среды значения, регистрируемого в течение последних трех лет вблизи БАК. Отметим, что приведенная выше величина J соответствует скорости образования ионных пар (и.п.) в воздухе при нормальных условиях $q = 3.7$ и.п./($\text{см}^3 \cdot \text{с}$).

По указанному выше направлению к настоящему времени было проведено всего лишь два эвристических эксперимента, что объясняется загруженностью БАК для плановых работ. В качестве измерительных инструментов для концентрации аэроионов n_+ и n_- использовался прибор «Сапфир-3М» с диапазоном подвижностей «легких» ионов более $0.4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а для измерения концентрации аэрозоля N_a — диффузионный счетчик фирмы TSI с диапазоном 15–1000 нм по диаметру.

В первом эксперименте, который был проведен в октябре 2019 года, исследовалась временная зависимость концентрации аэроионов при варьировании значения N_a от 7400 до ≈ 50 $1/\text{см}^3$. Результаты этих измерений без их подробного анализа приводятся в работе [3]. В ней показано, что при указанном выше изменении N_a асимптотическое значение n_+ увеличилось с 400 до 4200 $1/\text{см}^3$ при постоянном значении отношения $k = n_+/n_- = 1.32$. При этом время установления асимптотического значения концентрации аэроионов составляло несколько часов. Во втором эксперименте в январе 2023 года исследовалось влияние влагосодержания на концентрацию аэроионов. При этом

для случая предельно низкой концентрации $N_a \approx 50 \text{ см}^{-3}$ величина n_+ оставалась практически постоянной на уровне 1700 см^{-3} при изменении влагосодержания от 3.5 до 11 г/м^3 . Отметим зависимость от сезона асимптотического значения концентрации аэроионов при «нулевых» значениях N_a .

Для сопоставления результатов первого эксперимента с теорией было использовано решение повсеместно используемого интегро-дифференциального уравнение для таких процессов, которое для положительных ионов записывается в виде

$$dn/dt = q - (\alpha/k)n^2 - \beta n N_a, \quad (1)$$

где α и β — коэффициенты рекомбинации и захвата.

Решение этого уравнения имеет вид

$$n(t) = \left[(R - B)e^{Rt} + (R + B)F \right] / \left[2\alpha(e^{Rt} - F)/k \right], \quad R = (4q\alpha/k + B^2)^{1/2}, \quad (2)$$

$$B = \beta N_a, \quad F = (U - R)/(U + R), \quad U = (2\alpha/k)n(0) + B.$$

При сопоставлении решения (2) с данными первого эксперимента для случая $N_a \approx 50 \text{ см}^{-3}$ по условию совпадения измеренной и расчетной временной зависимости $n_+(t)$ получены следующие значения параметров: $q = 0.26$ вместо указанной выше величины 3.7 и.п./($\text{см}^3 \cdot \text{с}$) и $\alpha = 1.8 \cdot 10^{-8}$ вместо приведенной в [1, 2] величины $1.6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$. Значение коэффициента B принималось равным нулю, т. к. его влияние было несущественным.

Отметим, что для «нулевых» значений N_a использование уравнения (1) с условием $dn/dt = 0$ для экспериментально измеренных значениях q и k при использовании общепринятого значения α [1, 2] приводит к значению асимптотической величины $n_+ = 1.7 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, которое в $\approx 2,5$ ниже экспериментальной. При этих же параметрах полученное по решению (2) время установления асимптотического значения составляет $\approx 0,5$ ч при экспериментальном значении ≈ 6 ч.

Основные выводы

- Интенсивность образования легких аэроионов примерно на порядок меньше интенсивности образования ионных пар.
- Коэффициент рекомбинации α для аэроионов примерно на два порядка меньше такового для обычных ионов.
- Молекулы водяного пара не являются основным материалом для формирования аэроионов.

Литература

1. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. Гидрометеоздат, СПб, 1992, 312 с.
2. Шаталина М.В. Квазистационарные электрические поля и структуры в атмосфере. Канд. дисс. 2019. 127 с. Н. Новгород. Рук. чл.-кор. РАН Марсеев Е.А.
3. Романов Н.П. и др. Образование новых аэрозольных частиц и их эволюция в атмосферном воздухе: результаты экспериментов в Большой аэрозольной камере ФГБУ НПО «Тайфун». Оптика Атмосферы и Океана. (в печати).

**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

Измерения магнитного поля шумановского диапазона длин волн

А. А. Долинин¹, Н. В. Ильин¹, Ф. Г. Сарафанов^{1,2}, Ю. В. Шлюгаев¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, Н.Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Н.Новгород

Резонансы Шумана — собственные моды резонатора «Земля–ионосфера», возбуждаемые, в основном, глобальной молниевой активностью [1–3]. Для исследования связей характеристик шумановских резонансов с крупномасштабными процессами, происходящими в атмосфере Земли, необходимо развивать и совершенствовать непрерывный мониторинг характерных параметров шумановских резонансов.

Для регистрации сигналов в электромагнитном фоне диапазона крайне низких частот (КНЧ) были выбраны позиции расположения магнетометров по минимальному уровню помех на гармониках промышленной частоты (50 Гц) на полигоне гидрометцентра г. Городец

Регистрация горизонтальных компонент низкочастотных магнитных полей осуществляется с помощью компьютерной системы сбора данных с двух магнетометров, расположенных перпендикулярно друг другу в направлениях Север-Юг и Запад-Восток, соответственно. Для анализа были набраны данные за период с 19.10.2022 г. по 05.11.2022 г. (17 дней). Продолжительный непрерывный сбор данных позволяет исследовать месячные, сезонные, полугодовые и годовые вариации геомагнитного поля в диапазоне КНЧ.

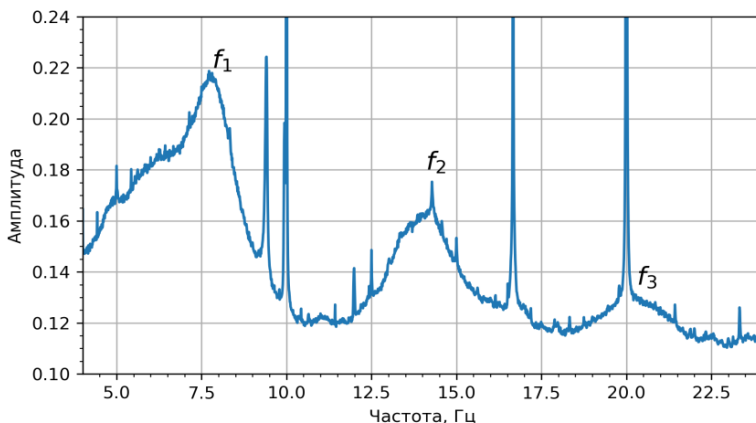


Рис. 1. Экспериментальный усредненный за 17 дней частотный спектр шумановского диапазона длин волн.

Проведен спектральный анализ полученных данных в широкой полосе частот. На Рис. 1 показан частотный спектр геомагнитного поля в полосе частот от 4 до 24 Гц, построенный с часовыми интервалами по данным, полученным в период с 19.10.2022 г. по 05.11.2022г.

Полученные частотные характеристики показывают ярко выраженные первые три резонанса Шумана на частотах: 7.83 Гц, 14.1 Гц и 20.4 Гц. По результатам эксперимента было выяснено, что добротности шумановских резонансов, наблюдаемых в месте расположения приёмной системы КНЧ диапазона, соответствуют модельным расчётам.

Оборудование для измерений приобретено при поддержке гранта правительства Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1892). Обработка данных измерений осуществлена при поддержке программы развития ННГУ «Приоритет-2030» в рамках стратегического проекта «Комфортная окружающая среда».

Литература

1. *Schumann W.O.* Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist // *Zeitschrift für Naturforschung A.* 1952. V. 7, № 2. P. 149–154.
2. *Williams E.R.* The Schumann resonance: a global tropical thermometer // *Science.* 1992. V. 256, P. 1184–1187.
3. *Nickolaenko A., Hayakawa M.* Schumann Resonance for Tyros // *Springer Geophysics.* Tokyo: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-4-431-54358-9
4. *Bozóki T., Sători G., Williams E., Guha A., Liu Y., Steinbach P., Leal A., Herein M., Atkinson M., Beggan C.D., DiGangi E., Koloskov A., Kulak A., LaPierre J., Milling D.K., Mlynarczyk J., Neska A., Potapov A., Raita T., Rawat R., Said R., Sinha A.K., Yampolski Y.* Day-to-day quantification of changes in global lightning activity based on Schumann resonances // *J. Geophys. Res. Atmos.* V. 128, no. 11. e2023JD038557. 2023. DOI: 10.1029/2023JD03855

Возмущение атмосферного электрического поля и ионосферы нестационарным подземным источником

В. А. Пилипенко, Н. Г. Мазур, Е. Н. Федоров

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва

Построен теоретический формализм для расчета электромагнитных полей в системе земля-атмосфера-ионосфера, создаваемых подземным горизонтальным токовым источником конечной длины. На основании этой теории разработана численная модель с реалистичным профилем атмосферной проводимости и параметров ионосферы. Представленные результаты численного моделирования позволяют связать возмущения электромагнитных полей разных частот в приземном слое и в ионосфере, создаваемые нестационарным крупномасштабным подземным источником. На основании этих модельных расчетов, оценено ослабление приземного электрического поля на частотах от 0.01 Гц до 10 Гц при прохождении в ионосферу.

Работа поддержана грантом РФФ 22-17-00125.

Вертикальный акустический резонанс между землёй и термосферой как одна из причин Pc5 пульсаций в ионосфере

В. В. Сурков^{1,2}, В. А. Пилипенко¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Троицк, Москва

В работе построена теоретическая модель вертикального акустического резонанса с между термосферой и поверхностью земли. Резонанс частотой 3,5–4,0 мГц может возникать при распространении атмосферной волны, связанной с акустической ветвью акустико-гравитационной волны, которая образуется из-за сейсмических вибраций земной поверхности. В рамках плоско-слоистой модели атмосферы и ионосферы рассчитываются геомагнитные возмущения (ГМВ), обусловленные влиянием акустической волны (АВ) на ионосферные поля и токи. Рассматривается два случая распространения АВ, когда горизонтальный волновой вектор направлен вдоль и поперёк геомагнитного меридиана. Исследуется зависимость резонансной частоты основной фундаментальной моды от высоты отражающего атмосферного слоя и горизонтального волнового числа АВ. Для расчёта ГМВ используется модель, в которой область E ионосферы рассматривается в приближении тонкого слоя с наклонным геомагнитным полем, а в области выше этого слоя находится холодная бесстолкновительная плазма. Формулы, полученные в рамках данной модели, показывают, что в спектрах ГМВ имеются максимумы на частотах, близких к частоте вертикального акустического резонанса. Исследуется зависимость спектральной мощности ГМВ от направления распространения АВ вдоль атмосферы и волнового акустического числа. Проведены расчёты спектральной мощности резонансных пиков ГМВ на земле и в ионосфере на основе барометрических данных, измеренных во время землетрясения Iwate-Miyagi Nairik в Японии в 2008 г. [1]. Показано, что альвеновские волны, возникающие при вхождении АВ в ионосферу, могут переносить низкочастотные резонансные возмущения в магнитно-сопряжённые области. Такие явления наблюдались иногда на больших расстояниях от эпицентра землетрясений.

Работа поддержана грантом РФФ 22-17-00125.

Литература

1. *Iyemori T., Tanaka Y., Odagi Y. et al.* Barometric and magnetic observations of vertical acoustic resonance and resultant generation of field-aligned current associated with earthquakes // *Earth Planets Space*. 2013. V. 65. P. 901–909.

Могут ли сейсмогенные токи быть причиной ионосферных аномалий?

В. В. Сурков^{1,2}, В. А. Пилипенко¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН, Троицк, Москва

Большой интерес в геофизике вызывает проблема сейсмо-ионосферных связей. В частности, продолжает широко дискутироваться вопрос о том существуют ли ионосферные предвестники землетрясений и каковы возможные механизмы этого явления. Одна из известных гипотез предполагает, что перед сильными землетрясениями возникает вертикальный сейсмогенный ток, способный переносить аномальные электрические поля из нижней атмосферы в ионосферу. Этот ток может обусловлен ионизацией воздуха вследствие увеличения эмиссии радиоактивного газа радона из почвы, либо заряженными атмосферными аэрозолями, увлекаемыми турбулентными потоками воздуха, или какими-то другими причинами.

В данном докладе проводится теоретический анализ этой гипотезы для достаточно общей модели вертикального сейсмогенного тока в нижней атмосфере. При выводе формул для электрических возмущений в атмосфере и ионосфере, вызванных стационарным сторонним током, используется приближение «тонкого» E-слоя ионосферы. Получены простые аналитические оценки, связывающие электрические возмущения на земле и в ионосфере с параметрами стороннего тока. Эти оценки использовались для интерпретации аномальных вариаций электрических полей в ионосфере, которые иногда наблюдались над эпицентрами готовящихся землетрясений на борту низко орбитальных спутников. Проведённый анализ показал, что для того, чтобы объяснить связь этих ионосферных аномалий с вертикальным сейсмогенным током, необходимо предположить столь большие значения этого тока и электрического поля у поверхности земли, которые не наблюдаются перед землетрясениями. Таким образом, данная гипотеза о происхождении ионосферных предвестников землетрясений выглядит скорее нереалистично, независимо от происхождения сторонних токов.

Можно, конечно, гипотетически предположить наличие сторонних токов в верхней атмосфере и ионосфере, создаваемых, например, акустогравитационными волнами. Однако объяснить причину возникновения таких волн перед землетрясениями достаточно трудно. Вопрос, поставленный в заголовке доклада, остаётся, по-видимому, открытым, поскольку нет убедительных количественных оценок и теорий, объясняющих ионосферные предвестники землетрясений, если таковые действительно существуют.

Работа поддержана грантом РФФ 22-17-00125.

Медленные вариации градиента потенциала приземного электрического поля на ст. Восток

А. В. Франк-Каменецкий

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, С.-Петербург

В околоземном пространстве постоянно происходят волновые процессы с различными периодами. Атмосферные волны могут быть ответственными за передачу энергии солнечно-земных взаимодействий в нижние слои атмосферы, а также за перераспределение энергии между различными областями атмосферы. Все это позволяет предположить, что спектры вариаций приземного атмосферного электрического поля должны содержать гармоники как внутренних (атмосферных), так и внешних (ионосферно-магнитосферных) источников.

В работе проанализированы среднесуточные значения градиента потенциала в периоды с «хорошей» погодой на ст. Восток в Антарктиде за длительный период (2008–2012 гг.). Приведены результаты сравнения вариаций E_z с магнитной активностью, метеорологическими параметрами и климатом. Рассчитаны спектры мощности градиента потенциала, приземной температуры, атмосферного давления и РС индекса. Выделены периоды 9–15, 27–30 и 45–60 суток. Первый интервал лежит в диапазоне хорошо известных периодов планетарных волн, второй — солнечная активность, а третий, скорее всего, Мадден-Джулиан климатические колебания [1].

Литература

1. *Kozlov A.V., Slyunyaev N.N., V.N. Ilin, Sarafanov F.G., Frank-Kamenetsky A.V.* The effect of the Madden–Julian Oscillation on the global electric circuit // *Atmospheric Research*, 2023, Volume 284, article id. 106585.

**МОНИТОРИНГ
ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ —
НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И БАЗЫ ДАННЫХ**

Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной в приземном слое: теоретический анализ и численное моделирование

*С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, А. А. Прохорчук, Е. В. Климанова,
К. В. Афиногенов*

Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Атмосферно-электрические наблюдения позволяют получать важную информацию о физических процессах, формирующих электромагнитное окружение Земли и обеспечивающих функционирование глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Несмотря на стремительное развитие методов спутникового зондирования и заметные успехи, достигнутые с применением самолетов, радиозондов и других аппаратов, предназначенных для проведения высотных наблюдений, основным средством исследования атмосферного электричества остаются наземные обсерваторские и полевые наблюдения. Одним из наиболее информативных параметров ГЭЦ считается плотность вертикального электрического тока, протекающего через атмосферу в невозмущенных грозовой активностью, осадками или интенсивной облачностью областях. Наблюдаемые в невозмущенной атмосфере вариации напряженности электрического поля и плотности тока проводимости отражают динамику глобальной разности потенциалов между приблизительно эквипотенциальными ионосферой и земной поверхностью на фоне инициируемых местными метеорологическими эффектами электрических процессов в атмосферном пограничном слое, вклад которых сопоставим по величине с вкладом глобальных вариаций [1].

В докладе представлены результаты исследования аналитических соотношений для горизонтальной кольцевой пассивной антенны, применяемой в качестве коллектора для длительных обсерваторских наблюдений плотности атмосферного электрического тока на измерительном полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E]. В электростатическом приближении определены пространственные распределения потенциала и электрического поля в зависимости от геометрических характеристик антенны, находящейся в однородном атмосферном электрическом поле, и рассчитаны параметры движения атмосферных ионов в окрестности антенны [2]. На основе вихреразрешающей модели турбулентности выполнены оценки пространственных корреляционных функций и спектральной плотности флуктуаций компонент плотности атмосферного тока, а также отклика тока в коллекторе на локальные турбулентные возмущения плотности тока проводимости и мгновенное изменение глобальной разности потенциалов между ионосферой и земной поверхностью. На основе результатов численного моделиро-

вания турбулентной электродинамики нижней атмосферы получена оценка отношения плотности полного вертикального атмосферного электрического тока и плотности тока проводимости на высоте установки антенны, которая может быть использована для экстраполяции результатов наземных измерений за пределы атмосферного пограничного слоя [3]. Результаты прямых наблюдений плотности атмосферного электрического тока коллектором сравниваются с результатами синхронных наблюдений напряженности атмосферного электрического поля и электрической проводимости в приземном слое.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-17-00053).

Литература

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Prokhorchuk A.A.* Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167. P. 327–348.
2. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Афиногенов К.В.* Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной: электростатическое приближение // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2022. Т. 65, № 10. С. 801–819.
3. *Анисимов С.В., Галиченко С.В., Прохорчук А.А., Афиногенов К.В., Климанова Е.В.* Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной: квазистационарное приближение // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2022. Т. 65, № 11. С. 893–913.

Программное обеспечение базы данных среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН

С. В. Анисимов, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев, Э. М. Дмитриев
 Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

В данной работе рассмотрено программное обеспечение базы данных среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» (ГО «Борок» ИФЗ РАН), включая программы сбора, обработки, хранения, визуализации результатов геофизических обсерваторских и полевых наблюдений, а также программы управления данными и обеспечения доступа к ним (Рис. 1).

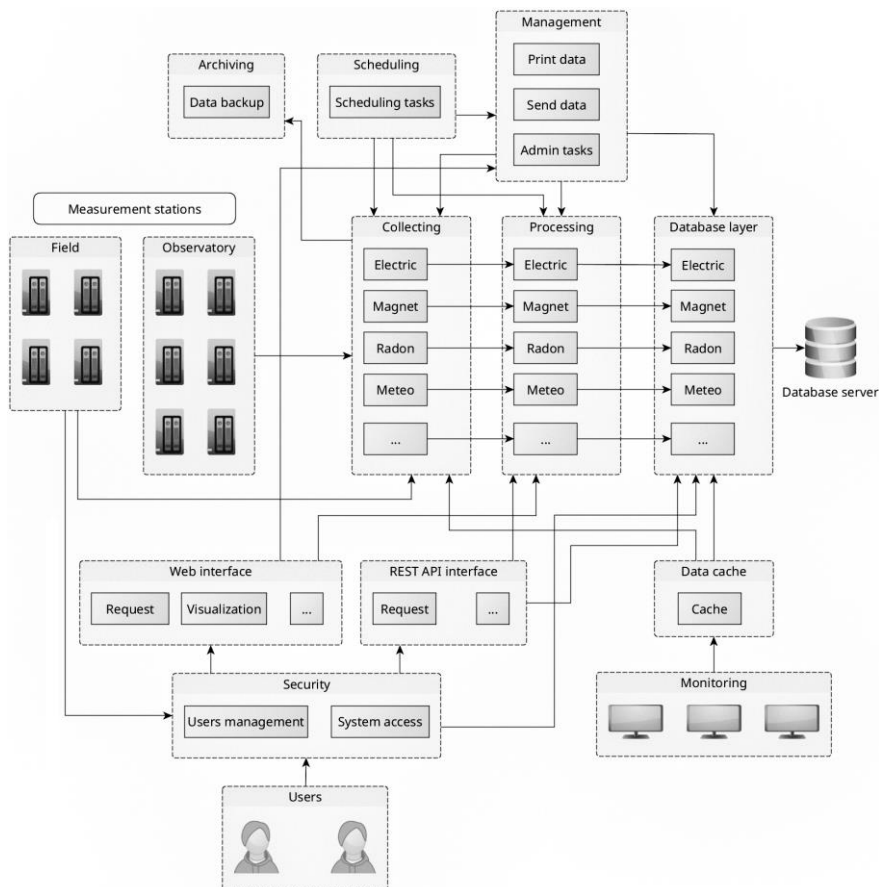


Рис. 1. Функциональная схема программного обеспечения базы данных среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН.

На ГО «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E] ведутся непрерывные геомагнитные, аэроэлектрические, аэрофизические и метеорологические обсерваторские наблюдения, а также сезонные аэроэлектрические, аэрофизические и метеорологические полевые наблюдения, включая измерения высотных профилей аэрофизических и аэроэлектрических параметров с использованием привязного аэростата с измерительной платформой [1]. Результаты всех измерений в цифровом виде с измерительной аппаратуры и компьютеров сбора данных поступают через локальную сеть сбора данных в базу данных обсерватории. Доступ к базе данных осуществляется через локальную сеть и интернет-ресурс по направлению глобальной электрической цепи, аэроэлектричества и геомагнетизма (geodata.borok.ru).

Низкий уровень электромагнитных шумов, отсутствие источников техногенных загрязнений атмосферы и комплексный характер получаемых данных позволяют использовать их для изучения различных естественных геофизических процессов в их взаимосвязи и взаимовлиянии [2, 3]. В то же время, разнообразие параметров и форматов исходных данных регистрации геофизических полей, а также разнообразие методов, применяемых для их первичной обработки и визуализации, предъявляют повышенные требования к программному обеспечению базы данных.

Оригинальное программное обеспечение разработано с учетом особенностей базы данных среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» и использует современные технологии: высокопроизводительный сервер баз данных PostgreSQL, язык программирования Java и многокомпонентный фреймворк Spring, разделение прав пользователей с помощью системы контроля доступа. В качестве операционной системы используется Debian GNU/Linux.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект FMWU-2022-0025.

Литература

1. *Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Дмитриев Э.М.* Информационно-измерительный комплекс ГО «Борок» ИФЗ РАН: состояние и перспективы // Среднеширотные геофизические обсерваторские наблюдения: материалы научно-практической конференции / ГО «Борок» ИФЗ РАН. Ярославль: Филигрань, 2017. С. 14–15.
2. *Анисимов С.В., Афиногенов К.В., Гурьев А.В., Дмитриев Э.М., Прохорчук А.А.* База данных Геофизической обсерватории «Борок» для аэроэлектрических исследований // Материалы Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь», Борок 28 октября – 01 ноября 2013 / ГО «Борок» ИФЗ РАН Ярославль: Филигрань, 2013. С. 82–83.
3. *Anisimov S.V., Aphinogenov K.V., Guriev A.V., Dmitriev E.M.* The Borok Geophysical Observatory database for atmosphere electricity researches / in proc. of 14-th International Conference on Atmospheric Electricity. Rio de Janeiro. Brazil. 2011, 4p (electronic publishing, flash ROM).

Построение карт плотности молниевых разрядов на основе взвешивания с делимитацией плотностных ареалов методом диаграмм Вороного

А. В. Каранин, И. Н. Фролов

Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск

Традиционными элементами исследования грозовой активности является построение и анализ карт плотности молниевых разрядов. Стандартная методика картирования основывается на использовании регулярной модели данных (как правило растровой), при этом вес ячейки определяется количеством зарегистрированных в ее пределах грозовых разрядов.

При всей простоте, рассматриваемый метод не лишен недостатков. Положение молниевых разрядов фиксируются датчиками с определенной степенью погрешности. Ошибка регистрации может составлять несколько километров [1], поэтому размер ячейки нецелесообразно делать слишком маленьким. Типичное пространственное разрешение раstra плотности грозовых явлений составляет 10 км, однако это не является строгим правилом, встречаются растры как большего, так и меньшего разрешений. Крупный размер ячейки снижает вероятность неправильной локализации молниевых разрядов, однако приводит к закруглению территориальной конфигурации молниевых вспышек, важной для понимания локальных факторов формирования гроз.

Другим методом картирования плотности точечных событий, менее распространенным, но лучше передающим особенности распределения явления по территории, является способ теплокарт [2]. Этот способ относится к растровым моделям представления данных и обладает присущим им недостатками — жесткой привязкой местоположения явлений к прямоугольной или квадратной сетке. Между тем, молниевые разряды имеют нерегулярный характер распространения по территории. Ввиду этого, картирование этих явлений лучше осуществлять нерегулярными способами.

Одним из подходов, способных точно передать форму ареалов грозовой активности является метод диаграмм Вороного [3]. Указанный способ позволяет создавать полигоны путём делимитации по среднему расстоянию между соседними точками, при этом вокруг каждой исходной точки создаётся один полигон, центром которого она является. Недостатком подхода является плохая сопоставимость значений плотностей молниевых разрядов на единицу площади, полученных на основе диаграмм Вороного, с результатами исследований выполненными стандартными методами. Особенно это касается маленьких участков, площадью менее одного квадратного километра, где величины плотности могут оказаться «зашкаливающими».

Выход видится в предварительном взвешивании разрядов по их количеству в определённом радиусе (мы предлагаем принять его равным 5642 метрам, в этом случае площадь круга составит 100 кв. км.) и расчету плотности событий на основе взвешенных значений:

$$P = \frac{L}{S},$$

где P — плотность молниевых разрядов; L — количество молниевых разрядов в определённом радиусе; S — площадь буфера (круга) взвешивания

В дальнейшем полученные величины плотности следует присвоить диаграммам Вороного, а также выполнить операцию отсечения частей диаграмм, выходящих за пределы радиуса взвешивания. В этом случае конфигурация картируемого явления будет отображена наиболее точно, а значения плотности разрядов окажутся сопоставимы с большинством исследованных плотности молниевой активности.

К минусам предлагаемого метода относится медленная обработка большого количества векторных объектов по сравнению с растровыми данными, которая требует производительного компьютера. Диаграммы Вороного хорошо подходят для отображения нескольких десятков и сотен тысяч объектов, но работа с миллионами разрядов окажется времязатратной.

В отношении территориального охвата карт плотности молниевой активности можем рекомендовать использование предложенного метода для масштабов карт крупнее 1:10 000 000, на более мелких масштабах визуальные различия между стандартной методикой и предлагаемой становятся не столь существенными.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Алтай в рамках научного проекта № 20-45-040012.

Литература

1. *Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarnau Jr. T.J.* An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // *J. Geophys. Res.*, 2010. V. 115, D18206. URL: DOI: 10.1029/2009JD013411 (дата обращения: 20.05.2023).
2. *DeBoer M.* Understanding the Heat Map // *Cartographic Perspectives*, 2015. №80, P. 39–43. DOI: 10.14714/CP80.1314 (дата обращения: 20.05.2023).
3. *Aurenhammer F.* Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure // *ACM Comput. Surveys*. 1991. V. 23. P. 345—405.

О результатах электромагнитного и акустического мониторинга локальной грозовой активности в Республике Алтай

Н. Г. Кудрявцев¹, Д. В. Кудин^{1,2}, И. Н. Фролов¹, В. Ю. Сафонова¹

¹ Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск

² Геофизический центр РАН, Москва

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) и Министерства образования и науки Республики Алтай № 23-21-10087.

Грозовая активность помимо научного интереса, связанного с исследованием одного из аспектов модели глобальной электрической цепи, интересна и для изучения с практической точки зрения. Так сильные грозы могут влиять на работу многочисленного электронного оборудования вплоть до вывода его из строя. Лесные пожары часто становятся результатом так называемых сухих гроз. Линии электропередач между силовыми подстанциями, железнодорожный транспорт — все те объекты инфраструктуры, имеющие протяженные системы проводников, в которых во время грозы могут индуцироваться существенные токи, требуют пристального внимания и должны размещаться в таких региональных локациях, в которых наблюдается статистически минимальная грозовая активность. Кроме того, грозовые разряды (атмосферики) являются природным источником мощного КНЧ (крайне низкочастотного) излучения (электромагнитных волн в сверхдлинноволновом диапазоне) интересном для исследователей сверхдальней радиосвязи.

Изучению гроз посвящено большое количество опубликованных работ, часть из которых описывает методы и программно-технические средства, позволяющие обнаруживать грозовую активность в электромагнитном диапазоне, подсчитывать количество атмосфериков, и оценивать их местоположение как по пеленгу, так и по задержке распространения волновых пакетов, порождаемых молниевыми разрядами изучаемого грозового события [1–5].

Мы считаем, что, используя гибридный способ мониторинга локальных грозовых событий можно получить интересные, в плане содержательного наполнения, результаты. Данный подход решает скорее не задачу обнаружения и локализации атмосфериков, а позволяет изучать различные возможности решения проблемы классификации грозовых событий. Чем более дифференцированный набор описательных признаков таких событий мы будем иметь, тем более точной может стать классификационная модель. Цель настоящего исследования заключается в отслеживании и фиксации электрической, магнитной и акустической составляющих грозового события

с использованием широкодоступного оборудования. Электрическую составляющую наблюдаемого грозового события предлагается отслеживать при помощи простого флюксметра [6, 7], магнитную составляющую — фиксировать посредством датчиков, использующих компактные магнитные антенны, настроенные на диапазон 9–11 кГц [2, 3]. Для исследования акустической составляющей грозового события используются датчики низкочастотных (инфразвуковых пульсаций) на основе чувствительных альтиметров для БПЛА, простые инфразвуковые датчики на базе электретных микрофонов [8, 9] и обычные акустические широкополосные малошумящие микрофоны с автоматической регулировкой.

Литература

1. *Кашировский В.Е.* Определение местоположения гроз радиотехническими методами / Отв. ред. А.Н. Попов. Изд. 2-е. М.: ЛЕНАНД, 2021. 250 с.
2. *Friese W.* Sfericsempfang Band 1 / Wilhelm Herbst Verlag, Dessau 2004.
3. *Friese W.* Sfericsempfang Band 2 / Wilhelm Herbst Verlag, Dessau 2006.
4. *Кудрявцев Н.Г., Беликова М.Ю., Кречетова С.Ю., Гейман Т.Н., Кочеева Н.А., Кудин Д.В.* Построение кластеров молниевых разрядов на основе данных глобальной сети гронопеленгации WWLLN и определение их параметров // В сборнике: Новые информационные технологии в исследовании сложных структур. Материалы Десятой российской конференции с международным участием. 2014. С. 21.
5. *Kudryavtsev N.G., Kudin D.V., Uchaikin E.O.* An approach to finding an integral characteristic of ionospheric and lightning activity from WWLLN observational data // Russian Journal of Earth Sciences. 2018. Т. 18. № 6. С. ES6003.
6. *Кудрявцев Н.Г., Кудин Д.В., Учайкин Е.О., Гвоздарев А.Ю.* О программно-техническом обеспечении измерительного эксперимента по оценке вертикальных атмосферных токов // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 272–274.
7. *Кудин Д.В., Кудрявцев Н.Г., Учайкин Е.О.* Об эффекте измерений атмосферного электрического поля похожем на унитарную суточную вариацию // Глобальная электрическая цепь. Материалы Всероссийской конференции / Ярославль, 2013. С. 33–34.
8. *Kudin D.V., Uchaikin E.O., Soloviev A.V., Kudryavtsev N.G., Gvozdarov A.Yu.* An approach to develop autonomous module of local infrasound measurement network // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. 2016. Т. 4. № 2. С. 80.
9. *Kudryavtsev N.G., Gozdarev A.Yu., Kudin D.V., Uchaikin E.O., Temerbekova A.A.* On the use of the project interface method when organizing instrumental observations irregular natural phenomena // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series. – 13. Сер. «Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics». 2020. 012030.

Развитие геофизических наблюдений в Архангельской области: комплексная геомагнитная обсерватория «Климовская» ГЦ РАН и научный стационар ИЗМИРАН в Карпогорах

*Д. В. Кудин¹, А. Н. Зайцев^{1,2}, Р. И. Красноперов¹, А. И. Маневич¹,
К. Х. Канониди²*

¹ Геофизический центр РАН, Москва

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В.Пушкова РАН, Москва, Троицк

В 2011 г. Геофизическим центром РАН (ГЦ РАН) были начаты работы по развёртыванию геомагнитной обсерватории «Климовская» на юге Архангельской области на территории Института физиологии природных адаптаций УрО РАН. Строительным работам предшествовал комплекс подготовительных мер с целью подтверждения пригодности территории для строительства обсерватории и выбора оптимальной конфигурации обсерваторских конструкций. Непрерывные наблюдения вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) были начаты в 2011 году, а с 2014 года стали проводиться регулярные абсолютные наблюдения [1]. В настоящее время геомагнитные данные, получаемые на обсерватории полностью удовлетворяют 1-секундному стандарту INTERMAGNET [2].

Ценность обсерватории «Климовская» для мониторинга и оценки геомагнитной активности обусловлена не только ее высокоширотным расположением, но и оперативностью предоставления данных научному сообществу через сайт Аналитического центра геомагнитных данных ГЦ РАН (<http://mag.gcras.ru>).

В 2021 году Геофизическим центром РАН была создана постоянно действующая ГНСС станция как часть комплексной геомагнитной обсерватории «Климовская». После закладки пункта для исследования стабильности геодезического центра были организованы тестовые ГНСС-измерения с использованием антенны типа choke-ring [3].

В 1964 году в Архангельской области в Карпогорах по инициативе ИЗМИРАН был создан экспедиционный пункт. С этого момента в Карпогорах эпизодически и под определённые программы (ОМЕГА, САМБО, АРАКС) осуществлялась регистрация вариаций магнитного поля Земли трехкомпонентной станцией на фотобумаге. В декабре 1967 года по постановлению правительства СССР и решению Академии наук СССР ИЗМИРАН организовал комплексную магнитно-ионосферную обсерваторию Вознесенье в Архангельской области.

В 1996 году из-за ограничения финансирования Академии наук пришлось закрыть Архангельскую комплексную магнитно-ионосферную об-

серваторию и законсервировать работу пункта в Карпогорах. С 1998 года работы по измерению вариаций магнитного поля Земли возобновились в Карпогорах [4]. Для измерений стали использовать вычислительную технику, установили цифровую магнитовариационную станцию системы Боброва, которая продолжает работать в настоящее время. В дополнение к магнитовариационной станции производится запись модуля полного вектора МПЗ на оверхаузеровского протонном магнитометре POS-1, а также запись двухкомпонентного регистратора земных токов. В 2021 году был установлен оверхаузеровский скалярно-векторный магнитометр POS-4 измеряющих компоненты МПЗ методом дополнительного поля.

Роль наземных обсерваторий, таких как «Климовская» и «Карпогоры», остается критической как для долгосрочных наблюдений векового хода [5], так и для комплексного мониторинга магнитного поля Земли в комбинации с данными низкоорбитальных спутников.

Литература

1. Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Красноперов Р.И., Груднев А.А., Хохлов А.В. Новая геомагнитная обсерватория «Климовская» // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 3. С. 365–379. 2016.
2. *St-Louis B.* INTERMAGNET Technical Reference Manual, version 5.0.0; INTERMAGNET Operations Committee and Executive Council: Ottawa, ON, Canada, 2020; P. 146.2.
3. Кафтан В.И., Татиринов В.Н., Побединский М.Г., Шаяхметов Р.Ф., Маневич А.И., Шевчук Р.В., Лосев И.В. ГНСС наблюдения на комплексной геомагнитной обсерватории «Климовская» // Геофизические процессы и биосфера. (в печати).
4. Канониди К. Х., Канониди Х. Д., Петров В. Г. Развитие сети геомагнитных наблюдений ИЗМИРАН / в сб. Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до недр Земли. Юбилейный сборник ИЗМИРАН, 2015 г. С. 77–87.
5. Соловьев А.А., Кудин Д.В., Сидоров Р.В., Котиков А.Л. Детектирование геомагнитного джерка 2020 г. по оперативным данным магнитных обсерваторий «Санкт-Петербург» и «Климовская» // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507 № 1 С. 85–90. DOI:10.31857/S2686739722601375

На пути к созданию датчика для измерения вертикального профиля электрического поля атмосферы

Ф. Г. Сарафанов, Н. В. Ильин

Институт прикладной физики РАН им. А.В.Гапонова-Грехова, Н. Новгород

Ключевым способом изучения разномасштабных квазистатических электрических процессов в атмосфере является анализ измерений напряжённости атмосферного электрического поля. Данные измерений после исключения периодов возмущённой погоды пригодны для анализа вариации ионосферного потенциала и изучения крупномасштабных процессов в глобальной электрической цепи.

Наиболее распространено измерение приземного электрического поля с помощью расположенных на зданиях, мачтах и непосредственно на поверхности Земли электростатических флюксометров. В таких наблюдениях проявляется изменчивость электрического поля, связанная с турбулентным перемешиванием, с локальным возмущением атмосферной проводимости и с проявлением электридного эффекта.

Решение проблемы высокой вариативности приземных измерений возможно при переходе к высотным измерениям. Работы по измерениям с помощью симметрично установленных флюксометров типа «мельница» на платформе привязного аэростата проводились в ГО «Борок» [1]; несколько перспективных легковесных датчиков, запускаемых на метеозондах – электрометр и двухдисковый миниатюрный флюксометр – разработаны в университете Рединга [2, 3].

Для организации измерений высотного профиля квазистатического атмосферного электрического поля в ИПФ РАН изобретена, модульно протестирована и запатентована структура легковесного, малогабаритного датчика типа «вращающийся диполь», предназначенного для запуска на метеозонде [4].

Измерительная часть датчика представляет собой полусферу диаметром 40 мм, на которой металлизированы поверхности двух электродов («диполь»). Внутри полусферы размещён элемент питания, микроконтроллер, АЦП, инструментальный усилитель и ИК-приёмопередатчик. Полусфера размещена на оси электромотора, работающего на скоростях 50 и выше оборотов в секунду. Базовая часть датчика представляет собой пластиковый модуль с установленными элементами питания, микроконтроллером, ИК-приёмопередатчиком и бесколлекторным электромотором.

Определение положения полусферы для детектирования, а также передача измеренных данных производится с помощью ИК-канала. Это позволяет гальванически развязать чувствительную измерительную схему и цепи питания базы датчика, избежать использования щёток для организации питания схемы или съёма полезного сигнала. Использование щёток не только

вносит шум в сигнал, но и повышает нагрузку на ось электромотора. Отказ от их использования снизил требования к электромотору и элементам питания.

В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию чувствительной части датчика и подготовке к различным полевым испытаниям. 25 апреля 2023 года был совершен первый испытательный полёт нового датчика. Постоянно вращающийся чувствительный элемент отработал всё время полета, включая прохождение нулевой изотермы, плотной облачности, максимальной высоты 32 000 метров, температуры минус 60 градусов Цельсия и скорости падения более 30 м/с.

По результатам первого испытательного полета нового датчика можно сделать вывод, что предложенные технические решения оказались состоятельными. Можно надеяться, что после окончательной доработки датчик позволит осуществлять регулярное измерение вертикального профиля электрического поля и расчёт ионосферного потенциала.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства Российской Федерации (соглашение № 075-15-2019-1892).

Литература

1. *Anisimov S.V., Galichenko S.V., Aphinogenov K.V., Klimanova E.V., Prokhorchuk A.A., Kozmina A.S., Guriev A.V.* Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // *Atmospheric Research*. 2021. V. 250. P. 105355.
2. *Harrison R.G.* A balloon-carried electrometer for high-resolution atmospheric electric field measurements in clouds // *Rev. Sci. Instrum.* 2001. V. 72, № 6. P. 2738–2741.
3. *Harrison R.G., Marlton G.J.* Fair weather electric field meter for atmospheric science platforms // *Journal of Electrostatic*. 2022. V. 107. P. 103489.
4. *Ильин Н.В., Сарафанов Ф.Г.* Устройство для измерения высотного профиля квазистатического электрического поля атмосферы // Патент России № 2799385. 2023. Бюл. № 19.

Мониторинг высокоэнергичных процессов в верхней атмосфере с помощью группировки нано-спутников Московского университета

*С. И. Свртилов^{1,2}, В. В. Богомолов^{1,2}, А. Ф. Июдин¹, П. А. Климов¹,
В. И. Оседло¹*

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына, Москва

² Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва

В последнее время стало активно развиваться новое направление в физике, связанное с изучением процессов при высоких энергиях в атмосфере Земли. Наряду с традиционными исследованиями взаимодействий космических лучей в атмосфере, происходящих при высоких и сверхвысоких энергиях, изучается возможность ускорения частиц до высоких энергий в атмосферных электромагнитных (ЭМ) разрядах. Свидетельством того, что такие процессы возможны, стало обнаружение таких явлений, как атмосферные вспышки гамма-излучения (Terrestrial Gamma Ray Flashes, TGF), возрастание потоков гамма-квантов во время гроз (Thunderstorm Gamma Ray Enhancement, TGE), пучки электронов из атмосферы Земли (Terrestrial Electron Beams, ТЕВ). Возможно, что с указанными явлениями могут быть связаны открытые недавно высотные атмосферные разряды, проявляющиеся, как, так называемые спрайты, голубые струи, эльфы и вспышки ультрафиолетового излучения. Этот круг явлений принято называть транзитными молниевыми или световыми событиями (Transient Lightning Events, TLE). Указанные явления сами по себе могут оказывать существенное влияние на глобальную электрическую цепь. С другой стороны, они также воздействуют на условия в околоземном пространстве (ОКП), в частности, вследствие ЭМ разрядов могут происходить, так называемые, высыпания магнитосферных электронов суб-релятивистских и релятивистских энергий, которые могут вносить в атмосферу Земли достаточно большой электрический заряд, и тем самым, создавать условия для возникновения электрических разрядов. Также события типа ТЕВ могут менять потоки энергичных электронов в ОКП, то есть как бы возникает система токов и ЭМ излучений, посредством которых реализуется взаимное влияние атмосферно-ионосферных и магнитосферных процессов.

Изучение вышеперечисленных процессов и явлений ведется как в наземных, так и в орбитальных экспериментах, для чего разрабатывается и создается специальная аппаратура, предназначенная для регистрации разных видов излучений — оптического, ультрафиолетового, рентгеновского, гамма, а также заряженных частиц и нейтронов.

В частности, в рамках космического проекта Московского университета «Созвездие-270» осуществляется развертывание группировки нано-спутников формата кубсат с комплексом приборов, обеспечивающих, в том числе, мониторинг радиационного состояния ОКП и наблюдения высокоэнергичных процессов атмосфере Земли [1]. В ходе реализации проекта на сегодняшний день осуществлен запуск 11 КА формата кубсат. В настоящее время на околоземной орбите функционируют 6 таких КА, которые передают научную и телеметрическую информацию. В течение 2023–2024 гг. предполагается запуск еще, по крайней мере, 8 подобных спутников на низкие круговые полярные орбиты.

Мульти-спутниковая группировка позволяет проводить одновременные измерения потоков частиц и квантов с помощью однотипной аппаратуры в разных точках околоземного пространства. Предполагается координация этих наблюдений с измерениями на наземных станциях и установках. Получаемые данные дадут уникальную информацию о физических механизмах высокоэнергичных процессов в атмосфере Земли и динамике потоков электронов суб-релятивистских энергий, в том числе о вариациях потоков, обусловленных высыпаниями, что имеет большое значение для понимания механизмов ускорения и потерь захваченных и квази-захваченных электронов.

Литература

1. *Богомолов В.В., Богомолов А.В., Дементьев Ю.Н., Еремеев В.Е., Зайко Ю.К., Калегаев В.В., Климов П.А., Оседло В.И., Панасюк М.И., Петров В.Л., Перетягко О.Ю., Подзолко М.В., Свертилов С.И.* Первый опыт мониторинга космической радиации в мультиспутниковом эксперименте Московского университета в рамках проекта «Универсат-СОКРАТ» // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2020. Т.74, №6. С. 135–141.
DOI: 10.3103/S0027134920060089.

Измерения атмосферного электричества на Дальнем Востоке

С. Э. Смирнов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Паратунка, Камчатский край

Обсерватория Паратунка Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (географические координаты $\varphi = 52^{\circ} 58.33' \text{ N}$, $\lambda = 158^{\circ} 14.9' \text{ E}$, геомагнитные $\varphi = 45.8^{\circ} \text{ N}$, $\lambda = 221.5^{\circ} \text{ E}$) расположена на Дальнем Востоке России на полуострове Камчатка, Россия. Геофизическими и климатическими особенностями расположения обсерватории являются высокая сейсмическая и вулканическая активность региона и малое количество гроз, обусловленная холодным морским климатом. Поэтому специализацией обсерватории является изучение атмосферного электричества на средних широтах в сейсмоактивном регионе в условиях хорошей погоды.

Основными инструментами для измерений электрических параметров приземной атмосферы на обсерватории Паратунка являются датчики «Поле-2» и «Электропроводность-2», разработанные в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (Россия). Дополнительно ведутся измерения метеорологических параметров. Цифровой архив измерений содержит данные с 1997 г. и по настоящее время. Были получены следующие основные результаты [1].

Экстремальные значения атмосферных шумов, наложенных на суточные вариации напряженности электрического поля, в нормальных метеорологических условиях составляют наиболее вероятные величины в пределах $\pm 20 \text{ В/м}$. При аномалии напряженности поля, сопровождаемой землетрясениями в отсутствие осадков, эти значения достигают величины $\pm 200 \text{ В/м}$, а при осадках — $\pm 1000 \text{ В/м}$ [2].

Максимум суточного хода электрического поля обусловлен утренним конвективным генератором. Для этого был проведен эксперимент с одновременной регистрацией разности температур воздуха на высотах 3 и 25 м и измерением градиента потенциала электрического поля. Была получена высокая корреляция этих измерений [3].

Был проведен статистический анализ появлений отрицательных аномалий перед землетрясениями в условиях хорошей погоды. При заданном классе магнитуд и определённой географической области в период с 1 января 1997 г. по 31 декабря 2002 г. (т. е. за 2189 дней) было обнаружено 103 случая аномального поведения электрического поля. В 37 (36%) случаях происходили землетрясения после аномалии через 1–24 ч [4]. Этот метод прогноза сильно зависит от метеорологической обстановки в пункте наблюдений. По непрерывным наблюдениям электрического поля на Камчатке за

период 1997–2002 гг. была оценена работа этого предвестника. Получилось, что эффективность этого метода прогноза при любых погодных условиях составляет не более 10% [5].

Еще одним предвестником землетрясений является усиление внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере. Такие волны легко проходят от литосферы до высот ионосферы. Непосредственно в вариациях электрического поля усиление ВГВ во время и накануне землетрясений было выделено на обсерватории Паратунка в 2004 г. Было показано, что в дни с землетрясениями интенсивность спектров мощности в диапазоне периодов ВГВ в условиях хорошей погоды увеличивается на порядок. Однако в случае плохой погоды эта интенсивность увеличивается еще на порядок.

Реакция атмосферного электричества в приземном слое атмосферы на магнитные бури в условиях хорошей погоды на средних широтах зависит от многих факторов и бывает весьма разнообразна. Во время магнитной бури 5 апреля 2010 были обнаружены следующие эффекты. Наблюдалось уменьшение величины электропроводности воздуха. Такое уменьшение могло быть обусловлено «выключением» одного из ионизаторов молекул воздуха. Возможным механизмом этого является Форбуш-эффект. Наблюдались большие осцилляции градиента потенциала электрического поля синхронные с осцилляциями Н-компоненты геомагнитного поля. И также проявился эффект увеличения электропроводности воздуха, вызванное положительными ионами на поздних стадиях развития магнитной бури [6].

Литература

1. *Smirnov S.* Atmospheric Electricity Measurements in the Pacific Northwest, Russia // *Appl. Sci.* 2023. 13, 2571.
2. *Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузевич А.В., Смирнов С.Э.* Особенности атмосферных шумов, наложенных на вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки // *Геомагнетизм и аэронаомия.* 2005. Т. 45, № 5. С. 690–705.
3. *Смирнов С.Э.* Влияние конвективного генератора на суточный ход напряженности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // *Геомагнетизм и аэронаомия.* 2013. Т. 53. № 4. С. 546–552.
4. *Smirnov S.* Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. V.8. P. 745–749.
5. *Smirnov S.* Negative Anomalies of the Earth's Electric Field as Earthquake Precursors // *Geosciences.* 2020. 10. 10.
6. *Smirnov S.* Reaction of electric and meteorological states of the near-ground atmosphere during a geomagnetic storm on 5 April 2010 // *Earth Planets Space.* 2014. 66. 154.

Развитие системы комплексных инструментальных наблюдений за геофизическими полями в Центре геофизического мониторинга ИДГ РАН и ГФО «Михнево»

*С. П. Соловьев, А. В. Крашенинников, Д. Н. Локтев, Ю. С. Рыбнов,
С. Ю. Рыбнов, А. А. Спивак*

Институт динамики геосфер им. ак. М.А.Садовского РАН, Москва

С целью определения влияния крупных городских агломераций на окружающую среду в ИДГ РАН систематически выполняются инструментальные наблюдения за геофизическими полями и метеорологическими характеристиками приземной атмосферы. Получаемые в Центре геофизического мониторинга и ГФО «Михнево» данные позволяют оценивать негативное влияние мегаполиса, в частности, выявлять источники возмущения геофизических полей техногенного происхождения. С учетом возникновения новых задач, а также необходимости расширения технических возможностей инструментальных наблюдений в 2021–2022 гг. проведена модернизация, которая позволила расширить перечень регистрирующих средств и обновить методики наблюдений и анализа данных.

Одним из определяющих факторов, характеризующих экологию территории, является состояние воздушной среды в приземном слое атмосферы. При этом мезомасштабные характеристики атмосферы определяются не только ее прямым загрязнением вредными для человека газами, мелкодисперсными частицами, как результата деятельности промышленных предприятий, но также, что в ряде случаев важно, изменением естественных режимов геофизических полей, в частности, электрического поля в приземном слое атмосферы.

Определение уровня загрязненности атмосферы мелкодисперсными частицами является одной из новых задач. В качестве показателей загрязненности атмосферы микрочастицами используются массовые концентрации взвешенных в воздухе твердых частиц с размерами менее 2.5 мкм (PM_{2.5}) и менее 10 мкм (PM₁₀) [1, 2]. С целью определения концентрации микрочастиц в воздухе и ее изменений во времени в 2021 г. комплекс инструментальных наблюдений дооснащен лазерным датчиком Sensirion SPS30, позволяющем определять концентрацию частиц в диапазоне размеров от 0.3 мкм до 10 мкм. Для размещения на открытом воздухе вся измерительная система помещена в защитный корпус обеспечивающий защиту от прямых солнечных лучей и осадков, а также сильных потоков ветра. В корпус встроен дополнительный вентилятор, прокачивающий воздух с низкой скоростью, что позволяет обновлять воздух, не внося искажения в измерения [3].

Вертикальная компонента напряженности электрического поля в течение всего времени функционирования комплекса инструментальных наблюдений регистрировалась с помощью электростатического флюксметра ИНЭП разработки ОКБ ИФЗ РАН [4]. Прибор хорошо зарекомендовал себя в результате многолетнего использования. При модернизации в 2021 г., комплекс инструментальных наблюдений был дополнительно оснащен измерителем напряженности электрического поля BOLTEK EFM-100, который имеет качественную защиту от внешних воздействий.

В настоящее время для регистрации метеорологических параметров используется профессиональная автоматизированная цифровая метеостанция Davis Vantage Pro2. В 2022 г. комплекс инструментальных наблюдений дополнен измерителем метеорологических величин «АМК-04» с функцией определения не только метеорологических, но и турбулентных параметров атмосферы.

Исследования выполнены в рамках Госзадания № 122032900185-5.

Литература

1. *Li Y., Chen Q., Zhao H., Wang L., Tao R.* Variations in PM10, PM2.5 and PM1.0 in an urban area of the Sichuan basin and their relation to meteorological factors // *Atmosphere*. 2015. V. 6. P. 150–163.
2. *Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е.* Изменчивость приземной концентрации аэрозолей PM2.5 в г. Москве по наблюдениям в метеорологической обсерватории МГУ // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042.
3. *Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Компактные лазерные датчики концентрации микрочастиц в воздухе и их применение в центре геофизического мониторинга ИДГ РАН // *Наука и технологические разработки*. 2021. Т. 100. № 3. С. 5–18.
4. *Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А.* Электрические поля техногенных и природных процессов / М: ГЕОС, 2018. 464 с.

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

А.Х.Аджиев	65	В.Ю.Климашов	30
В.И.Акселевич	57	П.А.Климов	17, 99
Н.Л.Александров	13	А.С.Козьмина	33, 39
А.В.Алексеева	59	Н.Ю.Колбнева	24
С.В.Анисимов	33, 35, 38, 42, 87, 89	Э.Р.Кондратьева	40
В.П.Антонова	15	А.В.Кочин	26, 28
К.В.Афиногенов	33, 35, 38, 87, 89	Р.И.Красноперов	95
А.А.Белов	17	А.В.Крашенинников	43, 66, 103
В.В.Богомолов	17, 99	С.В.Крюков	15
А.В.Бычков	60	А.А.Кувшинов	60
Р.В.Васильев	46	Д.В.Кудин	93, 95
В.В.Вахнина	60	Н.Г.Кудрявцев	93
Е.Ю.Веселова	41	В.И.Куркин	46
А.В.Волкова	62	Д.Н.Локтев	66, 103
А.Е.Вязилов	77	В.Ю.Луценко	15
Б.Г.Гаврилов	52	Н.Г.Мазур	82
С.В.Галиченко	33, 35, 38, 39, 42, 87	Г.И.Мазуров	57
С.Л.Гаранин	55	А.И.Маневич	95
Г.И.Гордиенко	15	Е.А.Мареев	6, 17, 64
М.А.Гринберг	64	С.А.Маслов	40
А.В.Гурьев	33, 38, 89	К.А.Молодцов	37
В.В.Денисенко	48, 50	Н.О.Молчанова	46
Э.М.Дмитриев	89	В.Н.Морозов	8
А.А.Долинин	80	П.М.Нагорский	68, 70, 73, 75
А.А.Евтушенко	19	Н.С.Носикова	55
А.А.Емельянов	30	М.В.Оглезнева	68, 70, 73, 75
В.М.Ермак	52	О.И.Озолс	77
Д.Ф.Жуков	75	В.И.Оседло	99
А.Н.Зайцев	95	А.А.Палей	59
В.Н.Иванов	77	И.Н.Панчишкина	40, 41
Н.В.Ильин	6, 62, 64, 71, 80, 97	А.И.Петров	40, 41
Д.И.Иудин	13, 20, 30	Г.Г.Петрова	40, 41
А.Ф.Июдин	17, 99	В.А.Петрова	41
К.Х.Канониди	95	В.А.Пилипенко	82, 83, 84
А.В.Каранин	91	С.В.Подлесный	46
А.Н.Караштин	22, 23	Ю.В.Поклад	52
А.В.Карелин	37	А.А.Пономарев	13
М.С.Картавых	75	А.П.Попыкина	71
З.М.Керефова	65	А.А.Прохорчук	33, 35, 42, 87
Е.В.Климанова	33, 38, 39, 87	К.Н.Пустовалов	68, 70, 73, 75

К.Г.Ратовский	46	В.В.Сурков	83, 84
Н.П.Романов	77	А.А.Сысоев	13, 20, 30
Ю.С.Рыбнов	103	Е.Н.Федоров	82
С.Ю.Рыбнов	103	О.В.Федяй	60
С.А.Рябова	43	А.В.Франк-Каменецкий	85
И.А.Ряховский	52	И.Н.Фролов	91, 93
Р.Е.Сараев	17	В.В.Хегай	37
Ф.Г.Сарафанов	10, 17, 62, 71, 80, 97	М.В.Цедрик	46
А.А.Сат	68, 73	А.А.Черкесов	54
В.Ю.Сафонова	93	А.Н.Черненко	60
Д.Г.Сахибгареев	77	М.В.Шаталина	17
С.И.Свертилов	17, 99	Ю.В.Шлюгаев	17, 22, 23, 80
П.Н.Свиркунов	77	А.Ю.Щекотов	55
Н.Н.Слюняев	6, 10, 62	Н.В.Ягова	55
С.В.Смирнов	68, 73, 75	Ю.В.Ясюкевич	46
С.Э.Смирнов	101	В.Н.Яхрюшин	77
С.П.Соловьев	43, 66, 103	И.В.Яшин	17
А.А.Спивак	103		

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ЗЕМЛИ	5
<i>Е. А. Мареев, Н. Н. Слюняев, Н. В. Ильин</i> Современное состояние исследований глобальной электрической цепи постоянного тока	6
<i>В. Н. Морозов</i> Стационарная модель токовой цепи с учетом аэрозольной составляющей атмосферы	8
<i>Н. Н. Слюняев, Ф. Г. Сарафанов</i> Моделирование глобальной электрической цепи переменного тока на основе данных о глобальной молниевой активности	10
ФОРМИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ — ГРОЗОВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МОЛНИЕВЫЕ РАЗРЯДЫ И ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ, ИОНОСФЕРНЫЕ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ	12
<i>Н. Л. Александров, А. А. Пономарев, А. А. Сысоев, Д. И. Иудин</i> Динамика изменения состава отрицательных ионов вокруг гидрометеоров в грозовом облаке	13
<i>В. П. Антонова, Г. И. Гордиенко, В. Ю. Луценко, С. В. Крюков</i> Экспериментальное исследование влияния грозовой активности на структуру ионосферы	15
<i>В. В. Богомолов, Е. А. Мареев, Ю. В. Шлюгаев, М. В. Шаталина, Ф. Г. Сарафанов, А. А. Белов, А. Ф. Иудин, П. А. Климов, Р. Е. Сараев, С. И. Свертилов, И. В. Яшин</i> Результаты лабораторного моделирования молниевых разрядов на установке «Гроза ГИН-1МВ»	17
<i>А. А. Евтушенко</i> Анализ плотности распределения спрайтов над Россией	19
<i>Д. И. Иудин, А. А. Сысоев</i> Переходные процессы в лидерной сети молнии	20
<i>А. Н. Караштин, Ю. В. Шлюгаев</i> Однопунктовая радиопеленгация развития молниевых разрядов в КВ диапазоне	22
<i>А. Н. Караштин, Ю. В. Шлюгаев</i> О полярности субмикросекундных импульсов радиоизлучения молниевых разрядов	23
<i>Н. Ю. Колбнева</i> Влияние релаксации поверхностного натяжения на капиллярные осцилляции заряженной капли	24

А. В. Кочин

Влияние глобальной циркуляции атмосферы на вертикальное распределение концентрации аэрозоля _____ 26

А. В. Кочин

Возможные причины уменьшения грозовой активности над океанами _____ 28

А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, В. Ю. Климашов, А. А. Емельянов

Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов _____ 30

**ФИЗИКА АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
И ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

32

*С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, А. А. Прохорчук,
Е. В. Климанова, А. С. Козьмина, А. В. Гурьев*

Электричество невозмущённого атмосферного пограничного слоя средних широт в глобальной электрической цепи _____ 33

К. В. Афиногенов, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, А. А. Прохорчук

Наблюдение спектров подвижности легких аэроионов: аппаратное обеспечение и результаты _____ 35

А. В. Карелин, К. А. Молодцов, В. В. Хегай

Пассивная радиолокация как способ обнаружения радиации в приземной атмосфере _____ 37

*Е. В. Климанова, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов,
А. В. Гурьев*

Рассмотрение взаимодействия аэроэлектрического и метеорологического полей нижней атмосферы на основе данных синхронных аэростатных и приземных измерений _____ 38

А. С. Козьмина, Е. В. Климанова, С. В. Галиченко

Результаты одновременных наблюдений объёмной активности радона и интенсивности гамма-излучения в приземном слое атмосферы _____ 39

*И. Н. Панчишкина, Г. Г. Петрова, А. И. Петров, С. А. Маслов,
Э. Р. Кондратьева*

Влияние аэрозольного состояния приземной атмосферы на перенос заряда при различных термодинамических условиях _____ 40

*Г. Г. Петрова, А. И. Петров, И. Н. Панчишкина, В. А. Петрова,
Е. Ю. Веселова*

Экспериментальные исследования пространственно-временных вариаций характеристик электрического поля в приземном слое: методы и подходы _____ 41

А. А. Прохорчук, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов

Оценка вклада земной и космической составляющих спектра гамма-излучения в ионизацию приземной атмосферы _____ 42

С. А. Рябова, А. В. Крашенинников, С. П. Соловьев

Предварительные результаты анализа суточных вариаций напряженности электрического поля и массовой концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы в 2023 г. по данным Центра геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН _____ 43

**ПРОЯВЛЕНИЕ МЕЖГЕОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ
В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ 45**

*Р. В. Васильев, К. Г. Ратовский, Ю. В. Ясюкевич, В. И. Куркин,
С. В. Подлесный, Н. О. Молчанова, М. В. Цедрик*
Исследование динамики молниевых разрядов и параметров ионосферы
в Восточной Сибири 2012–2018 гг. _____ 46

В. В. Денисенко
Влияние гор с крутыми склонами на электрические поля
и токи хорошей погоды _____ 48

В. В. Денисенко
Вариации экваториальных электроструй, порождаемых грозами _____ 50

Ю. В. Поклад, И. А. Ряховский, Б. Г. Гаврилов, В. М. Ермак
Особенности молниевой активности при извержении вулкана Тонга _____ 52

А. А. Черкесов
Реакция напряженности электрического поля приземной атмосферы
на солнечные протонные события _____ 54

Н. В. Ягова, С. Л. Гаранин, А. Ю. Шекотов, Н. С. Носикова
Сейсмичность и пространственное распределение молний _____ 55

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ 56**

В. И. Акселевич, Г. И. Мазуров
Исследование связи градиента потенциала электрического поля
с метеоусловиями в интересах идентификации ресурсных облаков
и организации активных воздействий на погоду _____ 57

А. В. Алексеева, А. А. Палей
Предварительные результаты лабораторных экспериментов
по взаимодействию ионного ветра и влажного воздуха _____ 59

В. В. Вахнина, А. Н. Черненко, А. А. Кувшинов, А. В. Бычков, О. В. Федяй
Система мониторинга геоиндуцированных токов в нейтрал
силового трансформатора _____ 60

А. В. Волкова, Н. Н. Слюняев, Ф. Г. Сарафанов, Н. В. Ильин
Влияние моды Эль-Ниньо – Южное колебание на молниевую активность
в средних широтах _____ 62

Н. В. Ильин, М. А. Гринберг, Е. А. Мареев
Лабораторные эксперименты по исследованию влияния ГЭЦ переменного тока
на живые системы _____ 64

А. Х. Аджиев, З. М. Керефова
Исследование продолжительности гроз и поражаемости поверхности земли
наземными молниями на Северном Кавказе _____ 65

А. В. Крашенинников, Д. Н. Локтев, С. П. Соловьев
Оценка относительных вариаций аэрозольных частиц мегаполиса
на основе данных натуральных наблюдений _____ 66

<i>М. В. Оглезнева, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, А. А. Сам, С. В. Смирнов</i> Экспериментальные наблюдения за аэроионами на различных ландшафтах на юге Сибири _____	68
<i>М. В. Оглезнева, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов</i> Вариации аэроионов в Томске _____	70
<i>А. П. Попыкина, Н. В. Ильин, Ф. Г. Сарафанов</i> Экстремальная молниевая активность в Арктическом регионе _____	71
<i>К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский, М. В. Оглезнева, А. А. Сам, С. В. Смирнов</i> Согласованность вариаций приземного электрического поля и геофизических величин для типичных ландшафтов на юге Сибири _____	73
<i>К. Н. Пустовалов, Д. Ф. Жуков, М. С. Картавых, П. М. Нагорский, М. В. Оглезнева, С. В. Смирнов</i> Атмосферно-электрические процессы, обусловленные мезомасштабными конвективными системами на юге Западной Сибири _____	75
<i>Н. П. Романов, А. Е. Вязлов, В. Н. Иванов, О. И. Озол, Д. Г. Сахибгареев, П. Н. Свиркунов, В. Н. Яхрюшин</i> О механизме формирования аэроионов в тропосфере _____	77
ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ	79
<i>А. А. Долнин, Н. В. Ильин, Ф. Г. Сарафанов, Ю. В. Шлюгаев</i> Измерения магнитного поля шумановского диапазона длин волн _____	80
<i>В. А. Пилипенко, Н. Г. Мазур, Е. Н. Федоров</i> Возмущение атмосферного электрического поля и ионосферы нестационарным подземным источником _____	82
<i>В. В. Сурков, В. А. Пилипенко</i> Вертикальный акустический резонанс между землёй и термосферой как одна из причин Pc5 пульсаций в ионосфере _____	83
<i>В. В. Сурков, В. А. Пилипенко</i> Могут ли сейсмогенные токи быть причиной ионосферных аномалий? _____	84
<i>А. В. Франк-Каменецкий</i> Медленные вариации градиента потенциала приземного электрического поля на ст. Восток _____	85
МОНИТОРИНГ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ — НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И БАЗЫ ДАННЫХ	86
<i>С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, А. А. Прохорчук, Е. В. Климанова, К. В. Афиногенов</i> Измерения плотности атмосферного электрического тока горизонтальной кольцевой пассивной антенной в приземном слое: теоретический анализ и численное моделирование _____	87

<i>С. В. Анисимов, К. В. Афиногенов, А. В. Гурьев, Э. М. Дмитриев</i> Программное обеспечение базы данных среднеширотной геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН _____	89
<i>А. В. Каранин, И. Н. Фролов</i> Построение карт плотности молниевых разрядов на основе взвешивания с делимитацией плотностных ареалов методом диаграмм Вороного _____	91
<i>Н. Г. Кудрявцев, Д. В. Кудин, И. Н. Фролов, В. Ю. Сафонова</i> О результатах электромагнитного и акустического мониторинга локальной грозовой активности в Республике Алтай _____	93
<i>Д. В. Кудин, А. Н. Зайцев, Р. И. Красноперов, А. И. Маневич, К. Х. Канониди</i> Развитие геофизических наблюдений в Архангельской области: комплексная геомагнитная обсерватория «Климовская» ГЦ РАН и научный стационар ИЗМИРАН в Карпогорах _____	95
<i>Ф. Г. Сарафанов, Н. В. Ильин</i> На пути к созданию датчика для измерения вертикального профиля электрического поля атмосферы _____	97
<i>С. И. Свертилов, В. В. Богомолов, А. Ф. Июдин, П. А. Климов, В. И. Оседло</i> Мониторинг высокоэнергичных процессов в верхней атмосфере с помощью группировки нано-спутников Московского университета _____	99
<i>С. Э. Смирнов</i> Измерения атмосферного электричества на Дальнем Востоке _____	101
<i>С. П. Соловьев, А. В. Крашенинников, Д. Н. Локтев, Ю. С. Рыбнов, С. Ю. Рыбнов, А. А. Спивак</i> Развитие системы комплексных инструментальных наблюдений за геофизическими полями в Центре геофизического мониторинга ИДГ РАН и ГФО «Михнево» _____	103

Научное издание

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Материалы Шестой Всероссийской конференции

Редактор, корректор
к.ф.-м.н. Э. М. Дмитриев

Оригинал-макет подготовлен в ГО «Борок» ИФЗ РАН
152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 142.

Подписано в печать 14.09.23. Формат 60х90 1/16.
Усл. печ. л. 6,88. Заказ № 23116. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии ООО «Филигрань».
150049 г. Ярославль, ул. Свободы, д. 91.
pechataet@bk.ru