

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

# **ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

**МАТЕРИАЛЫ  
ПЯТОЙ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**БОРОК  
4–8 ОКТЯБРЯ 2021 Г.**

Ярославль

2021

УДК 621.3.01(063)

ББК 31.211я431

Г54

Г54        **Глобальная электрическая цепь** : материалы пятой Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН – Ярославль : Филигрань, 2021. – 107 с.

ISBN 978-5-6046656-9-5

Ответственный редактор:

*д.ф.-м.н. С. В. Анисимов*

В сборнике материалов пятой 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 ИПФ РАН и ГО «Борок» ИФЗ РАН.

ISBN 978-5-6046656-9-5

© ГО «Борок» ИФЗ РАН  
макет, оформление, верстка, 2021  
© 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., академик-секретарь ОНЗ РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва;
3. Гвишиани А. Д. – академик РАН, д.ф.-м.н., Геофизический центр РАН, Москва;
4. Мохов И. И. – академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва;
5. Эпов М. И. – академик РАН, д.т.н., Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск.
6. Тихоцкий С. А. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва;
7. Еланский Н. Ф. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва;
8. Жмур В. В. – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор, Московский физико-технический институт, Москва;
9. Мареев Е. А. – член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород;
10. Медведев А. В. – член-корр. РАН, д.ф.-м.н., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск;
11. Катцов В. М. – д.ф.-м.н., Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург;
12. Лапшин В. Б. – д.ф.-м.н., профессор, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва;
13. Денисенко В. В. – д.ф.-м.н., Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск;
14. Морозов В. Н. – д.ф.-м.н., Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург;
15. Нагорский П. М. – д.ф.-м.н., профессор, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск;
16. Нургалиев Д. К. – д.г.-м.н., профессор, Казанский государственный университет, Казань;
17. Ильин Н. В. – к.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород;
18. Шлюгаев Ю. В. – к.ф.-м.н., Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород.

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

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Пятая Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» (ГЭЦ'2021) организована Геофизической обсерваторией «Борок» — филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ГО «Борок» ИФЗ РАН), совместно с Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), и пройдет с 4 по 8 октября 2021 г. в пос. Борок Ярославской области.

ГЭЦ'2021 планируется как закономерное продолжение Всероссийских конференций «Глобальная электрическая цепь», прошедших в 2013, 2015, 2017 и 2019 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), РГГМУ (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'2021 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 областей теоретической и наблюдательной геофизики. Конференция послужит ревизитию творческих научных связей российских ученых с целью решения актуальных проблем геоэлектромагнитного окружения Земли.

Конференция организована при финансовой поддержке ИПФ РАН 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**

## На пути к новому поколению моделей глобальной электрической цепи

*Е. А. Мареев*

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Актуальность проблемы моделирования глобальной электрической цепи (ГЭЦ) и выяснения роли электромагнитного окружения Земли, и в частности ГЭЦ, в климатической системе за последние три года стала еще более очевидной. Это связано с повышенным вниманием к вопросам экологии и климата в России и в мире. Растет интерес исследователей к опасным явлениям, связанным с атмосферным электричеством (экстремальные грозы и разряды молний, ливни, торнадо, пылевые бури), к изучению роли электрических явлений в климатической системе, обусловленной их возможным влиянием на формирование облаков и на состав атмосферы. Особый интерес вызывают эффекты воздействия атмосферного электричества на живые системы, на процесс фотосинтеза, на биосферу в целом.

Результаты, полученные в последнее время (в широкой кооперации) сотрудниками ИПФ РАН, позволяют сформулировать следующие перспективные направления работ по проблемам изучения электромагнитного окружения Земли и исследования ГЭЦ.

Одной из фундаментальных задач является понимание связей электромагнитного окружения Земли с глобальным изменением климата. 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 (DC-цепь) [1], изучать связь электрических явлений с глобальными климатическими модами, такими как Эль-Ниньо — Южное Колебание, осцилляция Маддена–Джулиана.

Основное направление дальнейшего развития предложенных подходов — переход на более мелкомасштабное моделирование состояния атмосферы и адаптация разработанных параметризаций ионосферного потенциала, более последовательный учет турбулентности в облаках и в пограничном слое [2]. Новые механизмы влияния аэрозолей на электрические процессы в облаках [3] открывают перспективы разработки параметризаций молниевых вспышек из первых принципов, пригодных для использования как над сушей, так и над океаном. Новые данные по баллонному зондированию атмосферы должны послужить дополнительным средством верификации моделирования.

В ближайшее время продолжится изучение биологических и биохимических проявлений электромагнитного окружения Земли с основным вниманием к шумановским резонансам и анализ лежащих в их основе механиз-

мов. С учетом установленного эффекта отклика параметров световой стадии фотосинтеза на увеличение магнитного поля для проростков пшеницы [4] будет детально исследована частотная зависимость отклика. Будет развита модель потока протонов через тилакоидные мембраны, и на ее основе будет определена область действия механизмов, обуславливающих основные эффекты влияния электромагнитного излучения шумановского диапазона на процессы фотосинтеза. Особое внимание в ближайшее время будет уделено связи ГЭЦ с циклом углекислого газа на планете [5, 6].

Результаты, достигнутые за последние три года работы, позволяют поставить новую задачу по разработке такой модели глобальной электрической цепи, которая будет сочетать интерактивные электрический, биогеохимический и аэрозольный блоки. В электрическом блоке должны быть параметризованы молниевые вспышки, сторонние токи глобальной цепи, глобальные электромагнитные резонансы (АС-цепь). В биогеохимическом блоке должны быть учтены источники и стоки парниковых газов для экосистем суши и океана. Аэрозольный блок должен учитывать антропогенные и естественные источники аэрозольных частиц и их роль как ядер конденсации и ядер льдообразования в облаках. Такая модель даст возможность впервые в мире единым образом учитывать эффекты земной и космической погоды, а также давать прогноз различных сценариев динамики системы биосфера — глобальная электрическая цепь с учетом обратных связей в этой системе.

**Благодарности.** Настоящая работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор № 075-15-2019-1892).

### Литература

1. *N.N. Slyunyaev, N.V. Ilin, E.A. Mareev, C.G. Price* The global electric circuit land–ocean response to the El Niño—Southern Oscillation // *Atmos. Res.* 2021. V. 260. P. 105626.
2. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.A. Prokhorchuk, A.S. Kozmina* Turbulent electric current in the marine convective atmospheric boundary layer // *Atmos. Res.* 2019. V. 228. P. 86–94.
3. *Q. Wang, Z. Li, J. Guo, C. Zhao, M. Cribb* The climate impact of aerosols on the lightning flash rate: is it detectable from long-term measurements? // *Atm. Chem. Phys.* 2018. V. 18, № 17. P. 12797–12816.
4. *E. Sukhova, E. Gromova, L. Yudina, A. Kior, Y. Vetrova, N. Ilin, E. Mareev, V. Vodeneev, V. Sukhov* Change in H<sup>+</sup> transport across thylakoid membrane as potential mechanism of 14.3 Hz magnetic field impact on photosynthetic light reactions in wheat seedlings // *Plants* (submitted).
5. *A.B. Елуцев* Глобальный цикл CO<sub>2</sub>: основные процессы и взаимодействие с климатом // *Фундаментальная и прикладная климатология.* 2017. Т. 4. С. 9–31.
6. *C. Price, R. Bekenshtein, E. Mareev* Is Amazon deforestation decreasing the number of thunderstorms over South America? // *Mon. Wea. Rev.* (submitted).

## Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь

*В. Н. Морозов*

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург

Влияние выбросов аэрозольных частиц на параметры глобальной электрической цепи рассматривалось в работах [1–4]. Теоретические оценки изменения потенциала ионосферы можно получить, используя следующее выражение для потенциала ионосферы:

$$\varphi_{\infty} = R_g + \sum_{s=1}^N \frac{R_{1s}}{R_{cs}} I_s, \quad (1)$$

где  $R_g$  — глобальное сопротивление атмосферы,  $R_{1s}$  — внутреннее столбцовое сопротивление  $s$ -го грозового генератора,  $R_{cs}$  — столбцовое сопротивление между земной поверхностью и ионосферой,  $I_s$  — электрический ток, даваемый  $s$ -м грозовым генератором. Плотность электрического тока вдали от гроз (плотность тока «хорошей погоды») определяется соотношением:

$$j = -\frac{\varphi_{\infty}}{\int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)}} = -\frac{\varphi_{\infty}}{R_{g1}}, \quad R_{g1} = \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)}. \quad (2)$$

А для вертикальной составляющей напряженности электрического поля получим выражение:

$$E_z = -\frac{\varphi_{\infty}}{\lambda(z) R_{g1}}, \quad (3)$$

где  $H$  — высота нижней границы ионосферы,  $\lambda(z)$  — электрическая проводимость атмосферы.

Если воздействию аэрозольными частицами подвергается определенная область «хорошей» погоды, а область действия грозовых облаков, как генераторов электрического поля, находится вне зоны аэрозольного загрязнения, то используя выражение (1) для потенциала ионосферы, можно записать для измененного значения потенциала ионосферы выражение:

$$\varphi_{\infty}^a = \frac{R_g^a}{R_g} \varphi_{\infty}, \quad (4)$$

где  $R_g^a$  — глобальное сопротивление атмосферы с учетом областей, загрязненными аэрозольными частицами. Выражение для  $R_g$  представляется в виде:

$$R_g = \frac{1}{4\pi r^2} \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)} = \frac{1}{S} \int_0^H \frac{dz}{\lambda(z)}, \quad (5)$$

где  $S = 4\pi r^2$  — площадь земной поверхности,  $r$  — радиус Земли.

В то же время для  $R_g^a$  можно записать выражение:

$$R_g^a = \left[ \frac{\int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)}}{\gamma S} \times \frac{\int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)}}{(1-\gamma)S} \right] \times \left[ \frac{\int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)}}{\gamma S} + \frac{\int_0^H \frac{dz}{\lambda_1(z)}}{(1-\gamma)S} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $\gamma$  — доля земной поверхности, занимаемая аэрозольными загрязнениями,  $\lambda_1(z)$  — высотный профиль электрической проводимости в области загрязнений. Сопротивления атмосферы  $R_g$  и  $R_g^a$  вычислялись в предположении, что в отсутствии аэрозольных частиц электрическая проводимость атмосферы определяется выражением:

$$\lambda(z) = \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad \alpha = (0,2-0,3) \text{ км}^{-1}. \quad (7)$$

А при наличии аэрозольных частиц:

$$\begin{aligned} \lambda(z) &= \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad z \in [H_0, H]; & \lambda(z) &= \eta \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad z \in [h, H_0]; \\ \lambda(z) &= \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad z \in [0, h] \end{aligned} \quad (8)$$

Величина  $\eta$  определяется из уравнения ионизационно-рекомбинационного равновесия:

$$\eta = \left( \frac{\beta^2 z^2}{4q\alpha} + 1 \right)^{1/2} - \frac{\beta z}{2\sqrt{q\alpha}}$$

и для ядер Айткена она равна 0,21 при их концентрации равной  $10^{10} \text{ м}^{-3}$  и 0,024 при концентрации  $5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ . При  $\gamma = 0,1$ ,  $\eta = 0,01$ ,  $h = 0$ ,  $H_0 = 1 \text{ км}$ ,  $H = 80 \text{ км}$ ,  $\alpha = 0,3 \text{ км}^{-1}$ , получим и  $R_g^a/R_g = 1,106$ ,  $\varphi_\infty^a = 1,106 \varphi_\infty$ . При  $\varphi_\infty = 300 \text{ кВ}$ ,  $\varphi_\infty^a = 331 \text{ кВ}$ . Если положить  $\eta = 0,01$ , получим  $\varphi_\infty^a = 1,075 \varphi_\infty$  и при  $\varphi_\infty = 300 \text{ кВ}$ ,  $\varphi_\infty^a = 322 \text{ кВ}$ .

Таким образом, полученные выше оценки показывают, что присутствие аэрозольных частиц в атмосфере приводит к увеличению потенциала ионосферы на величину 8–10% от исходной величины  $\varphi_\infty = 300 \text{ кВ}$ .

### Литература

1. *В.Н. Морозов* Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учетом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ. СПб.: РГГМУ, 2011, 253 с.
2. *T. Ogawa* Fair-weather electricity // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. N. D4. P. 5951–5960.
3. *M. Makino, T. Ogawa* Quantitative Estimation of Global Circuit // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. N. D4. P. 5961–5966.
4. *B.K. Sapkota, N.C. Varshneva* On the global atmospheric electrical circuit // J. Atm. and Terr. Phys. 1990. V. 52. N 1. P. 1–20.

## **Влияние поглощения электрических зарядов поверхностью Земли на генерацию зарядов в слоисто-дождевых облаках**

*А. В. Кочин*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Одним из возможных механизмов электризации в облаках является индукционный механизм, когда при распаде гидрометеоров фрагменты приобретают заряд, пропорциональный напряженности электрического поля. Заряженные фрагменты создают дополнительное электрическое поле, которое способно увеличивать скорость генерации зарядов [3]. Предполагается, что изменение поля происходит за счет изменения расстояния между зараженными фрагментами и областью генерации заряда [1]. Основным источником распадающихся гидрометеоров в слоисто-дождевых облаках является полоса таяния [2], так как в них отсутствуют интенсивные вертикальные потоки воздуха. Поэтому как положительно, так и отрицательно заряженные фрагменты смещаются за счет гравитационного оседания к поверхности Земли. Изменение электрического поля за счет изменения расстояния при низкой высоте нулевой изотермы будет незначительным. Альтернативой является изменение напряженности электрического поля за счет разной скорости падения фрагментов. Если полоса таяния находится относительно невысоко над поверхностью Земли, то возникает изменение поля за счет поглощения зарядов крупных фрагментов поверхностью Земли. Например, при температуре у поверхности Земли 5°C слой с распадающимися каплями будет расположен на высоте примерно 200 метров. Скорость падения крупных фрагментов 5 м/с, мелких 0,5 м/с. Таким образом, образовавшиеся в некий момент времени крупные фрагменты вносят вклад в поле в течение 40 с, а мелкие — 400 с. Так как проводимость поверхности Земли велика, то заряд от крупных фрагментов растекается и перестает влиять на напряженность поля в полосе таяния. Именно этот процесс является определяющим при формировании грозовой активности в облаках осенне-зимнего периода.

В этом случае задача сводится к плоской одномерной модели. Заряженные фрагменты различных знаков можно представить в виде бесконечных плоскостей, которые создают вертикально направленное электрическое поле. Пока они совместно смещаются от полосы таяния к Земле их суммарное поле в полосе таяния равно нулю. Когда очередная плоскость с крупными фрагментами достигнет поверхности Земли ее вклад в суммарное поле исчезнет. Таким образом, электрическое поле в момент  $t$  создается мелкими фрагментами, образовавшимися между моментом падения крупных фраг-

ментов и моментом падения мелких капель. Для зависимости поверхностной плотности образующегося заряда  $\sigma(t)$  можно записать

$$\sigma(t) = 3\pi\varepsilon_0 N(I)R^2 \left[ E_0 + \frac{1}{2\varepsilon_0} \int_{t-H/V}^{t-H/v} \sigma(t_i) dt_i \right], \quad (1)$$

где  $N(I)$  — число распадающихся капель на единичной площади, зависящее от интенсивности осадков  $I$ ,  $R$  — радиус частиц в момент распада (0,025 м для распада крупных капель),  $E_0$  — начальная напряженность электрического поля,  $H$  — высота слоя таяния над Землей,  $v$  — скорость падения мелких фрагментов ( $\sim 0,5$  м/с),  $V$  — скорость падения крупных фрагментов ( $\sim 5$  м/с).

Уравнение (1) можно применить и для кучево-дождевых облаков. В процессе роста градин их скорость падения увеличивается и в некоторый момент времени они окажутся в области положительных температур. Когда ледяная частица растает, она распадется на мелкие фрагменты, заряженные отрицательным зарядом и на крупные частицы, заряженные положительным зарядом. Мелкие частицы будут унесены воздушным потоком в верхнюю часть облака, крупные фрагменты поднимутся на некоторую высоту над областью таяния, где скорость восходящего потока уравнивает их скорость оседания. В результате над нулевой изотермой образуется область положительного заряда протяженностью в несколько километров, а над ней область с отрицательным зарядом. Этот процесс можно представить в виде взаимного смещения заряженных плоских дисков. Развитие вышеописанного подхода представляется перспективным для численной оценки скорости генерации зарядов.

Также предложенный механизм представляется перспективным для объяснения возникновения молний при напряженности электрического поля много меньше требуемой для пробоя сухого воздуха. Одновременное движение частиц с разным зарядом будет вызывать микрозаряды между ними при их сближении. Следовательно, воздух будет ионизирован и для его пробоя требуется напряженность много меньше, чем для сухого воздуха.

Были проведены расчеты для источников тока и напряжения, сосредоточенных в поясе вблизи земного экватора. При этом источники напряжения моделировались как источники тока с локальным повышением электрической проводимости атмосферы.

### Литература

1. *А.В. Кочин* Механизм образования электрического заряда в слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаках // Метеорология и гидрология. 1995. № 10. с. 35–41.
2. *А.В. Кочин* Радиолокационные исследования микрофизических процессов в полосе таяния // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. с. 34–40.
3. *В.М. Мучник* Физика грозы — Гидрометиздат. Л. 1974. 351 с.

**Модельный учет взаимовлияния  
глобальной электрической цепи и изменчивости  
ионосферной проводимости за счет внутренних процессов  
и внешнего воздействия**

*М. В. Клименко<sup>1</sup>, В. В. Клименко<sup>1</sup>, В. В. Денисенко<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн РАН, Калининград

<sup>2</sup> Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

В настоящее время появляется все больше доказательств того, что электрические поля магнитосферного и ионосферного происхождения, наиболее интенсивные в высоких широтах, являются одним из звеньев глобальной электрической цепи и могут оказывать влияние на атмосферное электричество. И наоборот, регистрируемые в атмосфере вертикальные электрические поля могут влиять на ионосферный потенциал, а значит и на вариации ионосферных параметров. Объединение модели всей атмосферы и глобальной электрической цепи (ГЭЦ) позволит на абсолютно новом уровне исследовать вопрос взаимовлияния глобальной электрической цепи, атмосферных и ионосферных параметров.

Известные в настоящее время модели ионосферной части ГЭЦ построены с чрезмерными упрощениями, например [1], а традиционное рассмотрение ионосферы в виде идеального проводника принципиально не позволяет построить ионосферную токовую систему. Объединение моделей верхней атмосферы (ГСМ ТИП), всей атмосферы (EAGLE) [2] и модели ГЭЦ [3] позволит принципиально уточнить описание ионосферной части ГЭЦ благодаря переходу от сильно усредненных параметров ионосферной среды, которые обычно берутся из эмпирической модели IRI (International Reference Ionosphere), к рассчитываемым в моделях ГСМ ТИП и EAGLE значениям этих параметров для конкретных моментов времени. Тем самым будет получена оценка влияния изменчивости ионосферной проводимости на распределение ионосферного потенциала ГЭЦ и на ионосферную изменчивость.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 21-17-00208.

**Литература**

1. *R.G. Roble, P.B. Hays // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. No. A12. P. 7247–7256.*
2. *M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, F.S. Bessarab, T.V. Sukhodolov, P.A. Vasiliev, I.V. Karpov., Yu.N. Korenkov, I.E. Zakharenkova, B. Funke, E.V. Rozanov // J. Space Weather Space Clim. 2019. V. 9. No A39.*
3. *V.V. Denisenko., S.A. Nesterov, M.Y. Boudjada, H. Lammer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 179. P. 527–537.*

## Метод ортогонального проектирования в моделировании глобальной электрической цепи в атмосфере Земли

*И. Г. Милешин, А. В. Калинин*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Математический центр

В работе рассматривается итерационный метод решения задач об определении электрического потенциала глобальной электрической цепи в атмосфере Земли, основанный на методе ортогонального проектирования. Приводится обоснование метода и обсуждаются основные аспекты его численной реализации.

При моделировании квазистационарных электромагнитных процессов в атмосфере Земли часто используется система уравнений Максвелла в нерелятивистском электрическом приближении [1], [2], [3], [6]. В этом приближении предполагается, что электрическое поле потенциально, то есть

$$\vec{E}(x, t) = -\nabla\varphi(x, t). \quad (1)$$

В этом случае из системы уравнений Максвелла следует, что

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla\varphi(x, t) + 4\pi\sigma\nabla\varphi(x, t) = 4\pi\vec{J}^{ext}(x, t) - c \operatorname{rot}(\vec{H}(x, t)), \quad (2)$$

$x = (x_1, x_2, x_3) \in \Omega$ ,  $\Omega$  — открытое ограниченное подмножество  $R^3$ , гомеоморфное шаровому слою с границей  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ ,  $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset$ , где  $\Gamma_1$  — поверхность Земли,  $\Gamma_2$  — условная граница, разделяющая атмосферу и ионосферу. Уравнение (2) дополняется начальными и граничными условиями

$$\varphi(x, t) = 0, \quad x \in \Gamma_1, \quad \varphi(x, t) = c(t), \quad x \in \Gamma_2, \quad (3)$$

$$\varphi(x, t)|_{t=0} = \varphi_0(x). \quad (4)$$

В (3)  $c(t)$  — неизвестная функция, зависящая только от времени  $t > 0$ .

Определим следующие функциональные пространства

$$H_1(\Omega) = \left\{ \varphi \in L_2(\Omega), \frac{\partial\varphi}{\partial x_i}, i = 1, 2, 3 \right\}, \quad (5)$$

$$V(\Omega) = \{ \varphi \in H_1(\Omega), \varphi(x) = 0, x \in \Gamma_1, L_2(\Omega), \varphi(x) = \text{const}, x \in \Gamma_2 \}, \quad (6)$$

$$H(\operatorname{rot}, \Omega) = \left\{ u \in L_2(\Omega), \operatorname{rot}(u) \in \{L_2(\Omega)\}^3 \right\}, \quad (7)$$

где  $\{L_2(\Omega)\}^3$  — пространство вектор-функций, суммируемых с квадратом.

Решением задачи являются функции  $\varphi(x, t) \in V(\Omega)$ ,  $\text{rot } \vec{H}(x, t) \in L_2(\Omega)$ ,  $\vec{H} \in H(\text{rot}, \Omega)$ . Исследование корректности задачи (2)–(4) выполнено в работах [2], [4], [5].

Справедлива теорема об ортогональном разложении пространства

$$\{L_2(\Omega)\}^3 = \mathcal{H}(\text{rot}, \Omega) \otimes \mathcal{H}(\text{grad}, \Omega), \quad (8)$$

$\mathcal{H}(\text{rot}, \Omega)$  — пространство роторов функций из  $H(\text{rot}, \Omega)$ ,  $\mathcal{H}(\text{grad}, \Omega)$  — пространство градиентов функций из  $V(\Omega)$ .

Пусть  $P$  — оператор ортогонального проектирования пространства  $\{L_2(\Omega)\}^3$  на  $\mathcal{H}(\text{grad}, \Omega)$ . Применяя оператор к уравнению (2) можно получить

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \varphi(x, t) + 4\pi P(\sigma \nabla \varphi(x, t)) = 4\pi P(\vec{J}^{ext}(x, t)). \quad (9)$$

В работе проводится теоретическое исследование дифференциального операторного уравнения и обсуждаются вопросы численной реализации соответствующей задачи. В частности, формулируется и обосновывается итерационный метод решения.

### Литература

1. *В.В. Толмачев, А.М. Головин, В.С. Потапов* Термодинамика и электродинамика сплошной среды, издательство МГУ, 1988, 233 с.
2. *А.А. Жидков, А.В. Калинин* Корректность одной математической задачи атмосферного электричества // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 4. С. 123–129.
3. *Е.А. Мареев* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 527–534.
4. *А.В. Калинин, Н.Н. Слюняев, Е.А. Мареев, А.А. Жидков* Стационарные и нестационарные модели глобальной электрической цепи: корректность, аналитические соотношения, численная реализация // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 314–322.
5. *A. V. Kalinin, N. N. Slyunyaev* Initial-boundary value problems for the equations of the global atmospheric electric circuit // J. Math. Anal. Appl. 2017. Vol. 450. No. 1. P. 112–136.
6. *R. Boström, U. Fahlsson* Vertical propagation of time-dependent electric fields in the atmosphere and ionosphere // in H. Dolezalek, R. Reiter (Eds.), Electrical Processes in Atmospheres, Steinkopff, 1977. P. 529–535.

## Роль гроз в образовании экваториальных электроструй

*В. В. Денисенко*

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Электрические токи, текущие в глобальной электрической цепи (ГЭЦ) от земли через атмосферу в ионосферу и обратно, замыкаются ионосферными токами. Построена модель распределения ионосферного потенциала, обеспечивающего существование этих токов. Изучаются только электрические поля и токи, генерируемые грозами, без магнитосферных и ионосферных генераторов. Высотный ход атмосферной проводимости задается в соответствии с эмпирическими моделями, учитывается рельеф земной поверхности. Используется двумерная модель ионосферного проводника [4], основанная на высокой проводимости вдоль геомагнитного поля; распределения локальных проводимостей Педерсена и Холла рассчитываются с использованием эмпирических моделей IRI, MSIS, IGRF [3]; интегральные проводимости получаются интегрированием вдоль магнитных силовых линий. Значения потенциала в E- и F-слоях ионосферы в такой модели не изменяются вдоль каждой магнитной силовой линии. Задача электропроводности ионосферы решается численно, метод подробно изложен в монографии [6].

В типичных для июля условиях в 19:00 UT при высокой солнечной активности полученная в модели максимальная разность потенциалов в ионосфере составляет 42 В. Напряжение увеличивается до 55 В в 23:00 UT и до 72 В в 06:00 UT, когда местная полночь наступает в двух основных грозовых областях, в Африке и в Центральной Америке, соответственно. Напряжения возрастают примерно в два раза при минимальной солнечной активности. За счет использования нашей более реалистичной модели ионосферы электрические поля получаются на порядок меньшими, чем в известной модели Робла и Хейса [5]. Эта часть результатов представлена в статье [1] с исправлением опечаток [2].

Построенная модель содержит экваториальные электроструи. Эти электроструи появляются в любой глобальной ионосферной токовой системе из-за экваториальной особенности проводимости ионосферы. Положение и направления электроструй определяются расположением основных грозовых областей и проводимостью ионосферы, и поэтому они сильно изменяются в зависимости от универсального времени. Существуют дневные электроструи, токи которых в нашей модели могут достигать 175 А, и ночные, до 60 А, в то время как общий ток ГЭЦ не превышает 1400 А. Для генерации экваториальных электроструй более важны грозы, происходящие в низких геомагнитных широтах.

Экваториальные электроструи порождаемой грозами части ГЭЦ создают наземные магнитные вариации порядка 0.1 нТл. В принципе, они могут

быть измерены, особенно на ночном геомагнитном экваторе, где они не так сильно замаскированы магнитными полями электроструй, создаваемых другими генераторами.

### Литература

1. *V.V. Denisenko, M.J. Rycroft, R.G. Harrison* 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. *V.V. Denisenko, M.J. Rycroft, R.G. Harrison* 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.
3. *V.V. Denisenko, H.K. Biernat, A.V. Mezentsev, V.A. Shaidurov, S.S. Zamay* Modification of conductivity due to acceleration of the ionospheric medium // *Ann. Geophys.* 2008, V. 26. P. 2111–2130.
4. *V.V. Denisenko* 2-D model of the global ionospheric conductor connected with the magnetospheric conductors. Cornell University Library. 2018. P. 1–15. <http://arxiv.org/abs/1802.07955>.
5. *P.B. Hays, R.G. Roble* A quasi-static model of global atmospheric electricity. 1. The lower atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84, № A7. P. 3291–3305.
6. *В.В. Денисенко* Энергетические методы для эллиптических уравнений с несимметричными коэффициентами — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1995. 204 с.

## Может ли сейсмогенный атмосферный ток повлиять на ионосферу?

*В. В. Сурков<sup>1,2</sup>, В. А. Пилипенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

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

В последнее время в геофизическом обществе развернулась широкая дискуссия о том, могут ли сейсмические события повлиять на фоновый атмосферный ток и параметры ионосферы, такие как полное электронное содержание (ПЭС), критическая частота слоя F2 и другие. В числе наиболее обсуждаемых гипотез, которые могли бы объяснить связь сейсмических и атмосферных явлений, рассматриваются следующие: (1) генерация внутренних гравитационных волн в атмосфере; (2) ионизация воздуха в приповерхностном слое атмосферы, вызванная увеличением эмиссии радиоактивного радона из почвы; (3) инжекция заряженных аэрозолей из почвы и ряд других гипотез.

В данном докладе теоретически анализируются две гипотезы [1]. Первая заключается в том, что аномальные вариации эмиссии радона, наблюдающиеся иногда в сейсмически активных районах, вызывают вариации вертикального фонового атмосферного тока с последующими изменениями ПЭС в ионосфере. Для анализа этой гипотезы вначале решается задача о влиянии радона на проводимость нижней атмосферы, а затем исследуются вариации атмосферного тока, втекающего в E-слой ионосферы, и связанные с этим вариации концентрации электронов. Оценки показывают, что максимальное изменение концентрации электронов, по крайней мере, на 3–5 порядков меньше наблюдаемых аномальных вариаций в ионосфере.

Для изучения второй гипотезы, основанной на предположении о том, что сейсмическая активность приводит к образованию в атмосфере направленных вверх сторонних токов, решается стационарная задача об электрических возмущениях в атмосфере и ионосфере при достаточно общих предположениях о величине и пространственном распределении сторонних токов. Из решения следует, что для этой гипотезы необходимо предполагать наличие в источнике токов больших полей, сопоставимых с напряжённостью пробоя воздуха на уровне моря. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о неправдоподобности обеих гипотез.

### Литература

1. *S. Pulinetz, D. Ouzounov* Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling (LAIC) model — An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.* 2011. V. 41. P. 131–137.

## Новые элементы в структуре и функционировании глобальной электрической цепи

*С. А. Пулинец<sup>1</sup>, Г. Я. Хачикян<sup>2</sup>, В. А. Гаврилов<sup>3</sup>, В. В. Богданов<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, Москва

<sup>2</sup> Институт ионосферы, НАН РК, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

<sup>4</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн  
ДВО РАН, Паратунка

Несмотря на то, что история развития концепции формирования глобальной электрической цепи (ГЭЦ) насчитывает более века [1–2], а также появляющиеся новые идеи ее усовершенствования [3], возникают новые факты, требующие дальнейшего пересмотра не просто деталей, а основ самой концепции. Два из них являются предметом нынешнего сообщения.

Основой концепции является формирование разности потенциалов между ионосферой и поверхностью земли порядка 250 кВ. При этом, учитывая разность проводимости земной коры и атмосферы, составляющую несколько порядков, обычно поверхность земли считается эквипотенциальной, а вариации атмосферного электричества (проводимость пограничного слоя атмосферы и аномальное электрическое поля над областями подготовки сильных землетрясений) считались основными источниками сейсмоионосферных аномалий, которые картировались в ионосфере с помощью ГЭЦ [4]. Как показали результаты последних исследований на Камчатском геофизическом полигоне, ионосферные предвестники формируются синхронно с изменениями удельного сопротивления земной коры [5]. Это приводит к формированию аномального электрического поля на поверхности земли на территориях большой площади области подготовки землетрясения, что требует добавления сопротивления в эквивалентную электрическую схему ГЭЦ в дополнение к сопротивлению атмосферного столба.

Второй фактор относится к суточной динамике электрического поля ГЭЦ, называемой кривой Карнеги. Считается, что унитарная вариация электрического поля ГЭЦ является результатом составной комбинации электрических полей, генерируемых грозовой активностью на разных континентах. В то же время недавно было установлено, то интенсивность глобальной сейсмической активности тоже зависит от мирового времени, а корреляция между вариацией атмосферного электрического поля и УТ-вариацией глобальной сейсмической активностью составляет 0.86 [6]. Возникает вопрос о наличии причинно-следственной связи наблюдаемой корреляции: то ли сейсмическая активность воздействует на ГЭЦ, то ли наоборот. Возможно, что обе зависимости являются результатом воздействия некоего третьего фактора, которым может оказаться ориентация геомагнитных полюсов Земли

относительно хвоста магнитосферы, откуда в атмосферу высыпаются потоки энергичных частиц.

Все данные варианты будут рассмотрены в настоящем сообщении.

### **Литература**

1. *S.T.R. Wilson* Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms // *Philos. Trans. Roy. Soc. London*. V. 221A. P. 73–115. 1920
2. *S.J. Mauchly* Studies in atmospheric electricity based on observations made on the Carnegie, 1915–1921 // *Carnegie Inst. Wash. Publ.* No 175(5), P. 385–424. 1926
3. *N.V. Ilin, N.N. Slyunyaev, E.A. Mareev* Toward a realistic representation of global electric circuit generators in models of atmospheric dynamics // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. 125. e2019JD032130. <https://doi.org/10.1029/2019JD032130>.
4. *S. Pulinets, D. Davidenko* Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit // *Advances in Space Research*, 53, 709–723, 2014
5. *V. Bogdanov, V. Gavrilov, S. Pulinets, D. Ouzounov* Responses to the preparation of strong Kamchatka earthquakes in the lithosphere–atmosphere–ionosphere system, based on new data from integrated ground and ionospheric monitoring // *E3S Web Conf.*, 196 (2020) 03005, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019603005>
6. *С.А. Пулинец, Г.Я. Хачикян* Унитарная вариация в сейсмическом режиме Земли: соответствие кривой Карнеги // *Геомагнетизм и Аэронавигация*. 2020, 60, №6, 803–808. DOI: 10.31857/S0016794020060115.



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

## Макромасштабная асимметрия молнии

Д. И. Иудин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Приволжский исследовательский медицинский университет, Н.Новгород

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Дерево молниевых разрядов — сеть плазменных каналов положительных и отрицательных лидеров, распространяющихся в противоположные стороны от точки инициации — представляет собой специфическую транспортную систему, которая развивается в квазиэлектростатическом потенциальном поле грозового облака, поддерживается этим полем и меняет его рельеф. Морфологические и функциональные свойства этой транспортной системы принципиально связаны с нарушением структурной симметрии при изменении направления тока молнии на противоположное. Асимметрия полярности атмосферных электрических процессов, обусловленная резким контрастом подвижностей положительных ионов и свободных электронов, приводит к ярким макромасштабным эффектам в физике молнии: разряды на землю отрицательной полярности чаще всего состоят из серии ударов, проходящих по одному каналу, а положительные вспышки, как правило, ограничиваются одним ударом, отрицательные и положительные лидеры молниевых разрядов имеют существенные морфологические различия, рост положительных лидеров сопровождается развитием отрицательных рекойл лидеров, а положительных рекойл лидеров, если они и существуют, никто не наблюдал. Последовательное описание механизмов макромасштабных проявлений асимметрии молниевых разрядов вызывает сегодня значительные трудности. Используя иерархическую схему Хортон-Штролера мы оценили структурную асимметрию пространственного распределения ёмкости разноимённых частей дерева молниевых разрядов и связали скорость смещения точки нулевого индуцированного заряда или точки реверса с разностью периферийных токов. Обнаруженное смещение точки реверса определяет главное направление развития молнии, запускает механизм конкурентного подавления боковых ветвей положительного лидера, механизм обновления ветвей отрицательного лидера и служит ключом к объяснению макромасштабных проявлений асимметрии молниевых разрядов.

### Литература

1. *D.I. Iudin, V.A. Rakov, E.A. Mareev, F.D. Iudin, A.A. Syssoev, S.S. Davydenko* Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type // *J. Geophys. Res.-Atmos.* 2017, 122, 6416–6430.
2. *D.I. Iudin* Lightning as an asymmetric branching network // *Atmospheric Research* 256 (2021) 105560.

## Моделирование излучения разрядной активности на стадии инициации молнии в облаке

*А. А. Сысоев*<sup>1,2</sup>, *Д. И. Иудин*<sup>1,2,3</sup>, *А. Н. Караштин*<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

<sup>2</sup> Приволжский исследовательский медицинский университет, Н.Новгород

<sup>3</sup> НИУ «Высшая школа экономики», Москва

<sup>4</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт, Н.Новгород

Работа посвящена сравнению данных регистрации электрической компоненты поля излучения грозы, происходившей 15 мая 2019 г. в Нижегородской области, и результатов численного моделирования процесса формирования лидера молнии в грозовом облаке в результате возникновения, роста и последующего слияния биполярных стримерных и лидерных систем. Экспериментальные данные были получены с помощью широкополосного радиоинтерферометра, принимающего излучение в диапазоне частот 0.1–30 МГц. Используемая в работе численная модель была построена на принципах подхода [1].

Результаты моделирования были использованы для расчета производимого моделируемой системой токов электромагнитного излучения. Было показано, что предсказания модели хорошо согласуются с экспериментом, причем наиболее интенсивные биполярные импульсы электрического поля с амплитудами и длительностями порядка 0.01–0.1 В/м и 0.2–0.4 мкс соответственно генерируются кратковременными импульсами тока выравнивания потенциалов с амплитудами порядка нескольких сотен (до тысячи) ампер, возникающих при слиянии биполярных лидерных систем с длинами не менее 10 м.

Результаты работы, опубликованные в статье [2], позволяют интерпретировать наблюдаемое излучение грозового облака на стадии, предшествующей формированию молниевых каналов, как результат естественной динамики развития внутриоблачных разрядов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №19-17-00183 «Исследование процессов инициации и развития молниевых разрядов в атмосфере Земли».

### Литература

1. *A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.A. Bulatov, V.A. Rakov* Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. V. 125, №. 7. P. e2019JD031360.
2. *A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.N. Karashtin, Yu.V. Shlyugaev* Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2021. Vol. 221, P. 105686.

## Характеристики импульсного субмикросекундного радиоизлучения грозового облака

*А. Н. Караитин<sup>1,2</sup>, Ю. В. Шлюгаев<sup>2,1</sup>, О. С. Караитина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Наблюдения радиоизлучения грозовых разрядов в широком диапазоне частот с высоким временным разрешением, впервые описанные в [1, 2], показали что радиоизлучение молнии начинается внезапно последовательностью биполярных субмикросекундных импульсов. В дальнейшем было обнаружено, что на этапах предварительной подготовки, инициации и развития, вплоть до возвратного удара, коротковолновое радиоизлучение молнии является преимущественно импульсным [3].

В настоящей работе представлены результаты исследования характеристик импульсного компонента коротковолнового радиоизлучения грозового облака на основе наблюдений, выполненных в Нижегородской области (координаты приемного пункта 56.15°N, 44.32°E) с использованием установки для регистрации волновой формы коротких электромагнитных импульсов, аналогичной описанной в [1, 2].

Установка состоит из четырех разнесенных антенных модулей (интерферометр), расстояние между которыми составляет около 300 м. в восточно-западном направлении и около 75 м в север-южном. Каждый антенный модуль содержит три антенны: вертикальный электрический диполь для измерения вертикальной составляющей электрического поля и две скрещенные рамочные антенны для измерения взаимно ортогональных горизонтальных компонент магнитного поля. Антенные модули соединены попарно с системами регистрации данных кабелями равной длины. Системы регистрации данных используют четырехканальные 14-битные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с максимальной тактовой частотой 60 МГц и внутренней памятью 1 ГБ. Запись ведется непрерывно в кольцевой буфер, организованный во внутренней памяти АЦП. В момент разряда молнии специальным устройством, расположенным рядом с одной из систем регистрации данных и принимающим низкочастотное (ниже 10 кГц) радиоизлучение, генерируется запускающий импульс. На вторую систему регистрации запускающий импульс передается по оптоволоконному кабелю, время задержки в котором точно измерено. По прибытии запускающего импульса запись данных продолжается в течение некоторого заранее определенного времени, по истечении которого весь буфер переписывается на жесткий диск компьютера. Кроме того, одна из рамочных антенн подключена к отдельной системе регистрации, позволяющей записывать одноканальные

данные с тактовой частотой до 50 МГц квазинепрерывно в течение нескольких часов с потерей примерно 3–5% данных.

В ряде гроз, проходивших вблизи приемного пункта, интерферометром было зафиксировано значительное количество событий, большая часть из которых соответствовала разрядам молний.

Такие события начинаются внезапно последовательностью сравнительно редких субмикросекундных биполярных импульсов довольно большой амплитуды, которая длится от единиц до 100–200 миллисекунд и может рассматриваться как подготовительная стадия разряда молнии. В качестве основных характеристик импульсного радиоизлучения рассматривались частота следования и распределение амплитуд импульсов. На подготовительной стадии молниевых разрядов частота следования импульсов невысока и не превышает нескольких десятков за миллисекунду. Распределение амплитуд импульсов при этом оказывается близким к экспоненциальному, что может свидетельствовать об импульсах как независимых событиях.

С развитием ступенчатого лидера частота следования импульсов начинает быстро расти, достигая к возвратному удару нескольких сотен за миллисекунду. Распределение амплитуд импульсов при этом остается близким к экспоненциальному, однако, с существенно большим по абсолютной величине показателем экспоненты, что может свидетельствовать о смене физического механизма генерации импульсов на стадии ступенчатого лидера.

Квазинепрерывная регистрация показывает наличие большого количества интервалов радиоизлучения грозового облака длительностью в доли секунды, начинающихся внезапно и разделенных интервалами отсутствия излучения длительностью от долей до единиц и десятков секунд в зависимости от уровня грозовой активности, не заканчивающихся молниевыми разрядами. В этих случаях характер излучения, включая его импульсный характер, частоту следования импульсов и распределение их амплитуд, аналогичен наблюдаемому на подготовительной стадии молниевых разрядов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00183).

### **Литература**

1. *A.V. Gurevich, L.M.Duncan, A.N. Karashtin, K.P. Zybin* Radio emission of lightning initiation // *Phys. Lett. A.* 2003. V. 312, № 3–4. P. 228–237.
2. *А.Н. Караштин, Ю.В. Шлюгаев, А.В. Гуревич* Коротковолновое радиоизлучение молнии // *Изв. ВУЗов. Радиофизика.* 2005. Т. 48, № 9. С. 800–809.
3. *A.V. Gurevich, A.N. Karashtin* Radio emission structure of cloud-to-ground lightning discharge // *Phys. Lett. A.* 2011. V. 375(7). P. 1128–1134.

## **Признаки развития молниевых разрядов облако – земля в коротковолновом радиоизлучении грозового облака**

*А. Н. Караитин<sup>1,2</sup>, Ю. В. Шлюгаев<sup>2,1</sup>, О. С. Караитина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н.Новгород

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Представлены результаты сопоставления данных наблюдений радиоизлучения грозовых облаков в широкой полосе частот с высоким временным разрешением с данными регистрации молниевых разрядов всемирной и региональной грозопеленгационными сетями. Наблюдения проводились в приемном пункте с координатами 56.15°N, 44.32°E (Нижегородская область) с использованием рамочной антенны одного из антенных модулей установки регистрации волновой формы излучения, перекрывающей диапазон частот от 50 кГц до 30 МГц, аналогичной описанной в [1, 2]. В качестве регистрирующего устройства использовался 14-разрядный аналого-цифровой преобразователь с частотой преобразования 50 МГц и записью данных на систему RAID из 4 жестких дисков.

В настоящей работе использованы данные, полученные при записи широкополосного радиоизлучения нескольких гроз, происходивших вблизи пункта наблюдения в 2016–2021 годах. В качестве характеристических параметров излучения использовались его амплитуда, среднеквадратическое значение (характеризующее интенсивность излучения) и коэффициент эксцесса (позволяющий судить о преобладании в излучении импульсов большой амплитуды), вычисленные на временных интервалах от десятков микросекунд до единиц миллисекунд.

В целом поведение интенсивности излучения соответствует поведению количества зафиксированных грозопеленгационными сетями событий на небольших (до 25 км) расстояниях от пункта наблюдения. Вместе с тем отдельные вспышки излучения имеют место и в случаях более удаленной (до 100 км и более) грозовой активности. Поведение коэффициента эксцесса согласуется с периодами высокой молниевой активности на расстояниях примерно до 50 км. Высокие его значения наблюдаются и для более удаленных грозовых событий. Следует отметить, что в отсутствие грозовой активности коэффициент эксцесса, несмотря на наличие заметных импульсных синхронизированных с электросетью помех, обусловленных, по видимому, работой различных источников электропитания, принимает существенно меньшие значения даже в случае сильных помех.

Детальное рассмотрение характеристик радиочастотного излучения грозового облака показало наличие в нем событий, которые могут ассоциироваться с молниевыми разрядами облако–земля. Такие события начинаются внезапно последовательностью редких субмикросекундных импульсов до-

вольно большой амплитуды при умеренном среднеквадратическом значении и высоком значении коэффициента эксцесса. Такое поведение излучения сохраняется в разных событиях от единиц до 100–200 мс и может соответствовать подготовительной стадии молниевых разрядов. После этого его поведение существенным образом меняется: при практически неизменной амплитуде начинается плавный рост среднеквадратического значения (в ряде событий оно может оставаться неизменным или даже несколько падать) при существенном уменьшении уровня его флуктуаций и значительном уменьшении коэффициента эксцесса. Это свидетельствует об уменьшении амплитуды импульсов при увеличении частоты их повторения и появлении в излучении квазинепрерывного (шумового) компонента. Данная фаза события может соответствовать развитию ступенчатого лидера молнии. Заканчивается событие резким пиком среднеквадратического значения, в большинстве случаев совпадающим по времени с зарегистрированным грозопеленгационными сетями событием (возвратным ударом молнии) при резком падении коэффициента эксцесса, часто ниже фонового уровня. Наблюдаются как изолированные радиочастотные события, так и их последовательности с интервалами в единицы–десятки миллисекунд, соответствующие молниям с множественными возвратными ударами.

Наряду с событиями, зафиксированными грозопеленгационными сетями, встречаются события, которые не были сетями зарегистрированы. В свою очередь некоторым событиям, зафиксированным грозопеленгационными сетями, не отвечает никаких событий радиочастотного диапазона. Если для региональной сети это не представляется удивительным ввиду ее высокой чувствительности как к внутриоблачным разрядам, так и к помехам, для всемирной сети, регистрирующей предположительно только разряды облако–земля, это вызывает вопросы.

В целом количество наблюдаемых радиочастотных событий хорошо согласуется с числом событий, зарегистрированных сетями, для которых расстояние до пункта наблюдения не превышает 50 км.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-05-80077 и № 18-45-520021). Наблюдения 2021 года выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части Государственного задания (проект № 0729-2020-0057).

### Литература

1. *A.V. Gurevich, L.M. Duncan, A.N. Karashtin, K.P. Zybin* Radio emission of lightning initiation // *Phys. Lett. A*. 2003. V. 312, № 3–4. P. 228–237.
2. *А.Н. Караштин, Ю.В. Шлюгаев, А.В. Гуревич* Коротковолновое радиоизлучение молнии // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2005. Т. 48, № 9. С. 800–809.

## Моделирование спрайтов/гало в дневных условиях

*А. А. Евтушенко, Ф. А. Кутерин, Е. К. Свечникова*

Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Вопрос возможности инициации спрайтов в дневных условиях остается открытым, в первую очередь потому, что невозможно зафиксировать оптическую вспышку, т. к. интенсивность свечения мала по сравнению с фоновым свечением неба. На существование дневных спрайтов указывают косвенные электромагнитные измерения, показывающие наличие характерных профилей поля после мощных вспышек в тропосфере, когда первый пик поля связан с родительской вспышкой, а второй пик может соответствовать спрайту. Восстановленные по этим данным значения дипольного момента нескомпенсированного заряда составляют 2000–5000 Кл·км.

В работе представлены результаты самосогласованного аксиально-симметричного моделирования дневного спрайта. Исследовано возмущение концентрации ионов, нейтральных компонент, возбужденных атомов и молекул, а также проводимости атмосферы при инициации дневного спрайта. Показано, что инициация спрайта в дневных условиях происходит на высотах от 50 до 70 км при импульсном дипольном моменте нескомпенсированного заряда родительской вспышки в несколько тысяч Кл·км. Расчеты дневного спрайта выполнены для двух значений дипольного момента: 3750 Кл·км и 2750 Кл·км. Показано, что дипольный момент 2750 Кл·км приводит к малым возмущениям химического состава атмосферы и скорее соответствует гало. Дипольный момент 3750 Кл·км создает условия для инициации спрайта с резким ростом концентрации заряженных частиц и возмущением проводимости. Показано, что условия для инициации дневного спрайта создаются ниже примерно на 20 километров, относительно спрайта в ночных условиях, а сам спрайт имеет меньший вертикальный размер.

### Литература

1. А.А. Evtushenko, F.A. Kuterin, E.K. Svechnikova Study of daytime high-altitude discharges using plasma-chemistry model // JASTP. 2021. DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105670

## Разделение заряда в облаках, создающих нисходящее гамма-излучение

*Е. К. Свечникова, Н. В. Ильин, Е. А. Мареев*  
Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Нисходящее гамма-излучение (thunderstorm gamma enhancement, TGE) может наблюдаться наземными приборами при прохождении электрифицированных облаков на высоте 1–2 км и менее над местом наблюдения [1]. Гамма-излучение имеет тормозное происхождение и создаётся лавинами электронов, ускоренных в электрическом поле облака. Большой набор данных наблюдений TGE получен на Исследовательской Станции Арагац (40°28'N, 44°10' E, 3200 м над уровнем моря). Электрические свойства облаков, создающих наблюдаемые в Арагац TGE, изучены путём моделирования с помощью WRF с применением разработанной параметризации электрических процессов [2]. Для создающих TGE облаков характерна двуслойная структура с нижним положительным и верхним отрицательным зарядами.

Основной механизм разделения заряда — передача заряда между твёрдыми гидрометеорами разных типов при их соударении. Скорость и направление переноса заряда зависит от температуры и содержания мелких капель — облачной влаги. Если метеорологические параметры внутри всего облака соответствуют одинаковому знаку заряда, обретаемого тяжёлыми частицами, то заряд этого знака будет накапливаться в нижней части облака, и облако обретёт двуслойную электрическую структуру. Изменение направления переноса заряда вблизи середины облака приводит к формированию трёхслойной структуры заряда. Результаты оценки метеорологических свойств, создающих TGE облаков сопоставлены с выводами лабораторных экспериментов, описанных в [3]. Показано, что условия разделения заряда в создающих TGE облаках, приводящие к формированию двуслойной электрической структуры, характеризуются низким содержанием жидкой влаги и могут быть близки к условиям лабораторных экспериментов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 0030-2022-0005).

### Литература

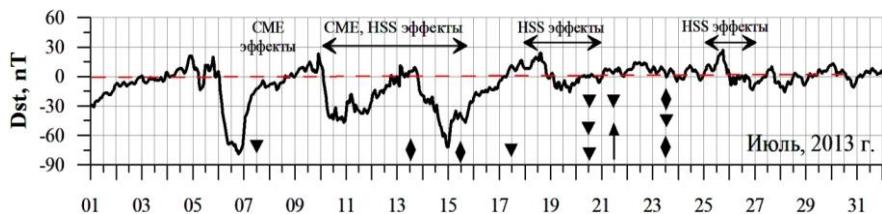
1. *A. Chilingatian* Thunderstorm Ground Enhancements — model and relation to lightning flashes // JASTP. 2014. V. 107. P. 68–76.
2. *E. Svechnikova, N. Ilin, E. Mareev* Characteristic Features of the Clouds Producing Thunderstorm Ground Enhancements // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126, issue 9.
3. *C. Saunders* Charge Separation Mechanisms in Clouds // Space Sci. Rev. 2008. V. 137. P. 335–353.

## Исследование воздействия спорадических космо- и геофизических источников возмущений на динамику атмосферного электрического поля

*В. П. Антонова, Г. И. Гордиенко, С. В. Крюков, В. Ю. Луценко*  
 Институт Ионосферы Национального Центра космических исследований  
 и технологий, Алматы, Казахстан

Представлены некоторые результаты исследования отклика атмосферного электрического поля на спорадические источники возмущений земного и космического происхождения и взаимосвязи геофизических полей. Анализировались данные мониторинга космо- и геофизических параметров на высокогорной Тянь-Шаньской станции (3340 м над уровнем моря) за период 2005–2015 гг. [1]. Высокогорное расположение станции благоприятно для изучения механизма возникновения молниевых разрядов в грозовых облаках и выяснения их взаимосвязи с космическими лучами. Грозовые облака проходят в непосредственной близости от экспериментальных установок. Возможно, что отсутствие максимума кривой Карнеги в суточном ходе квазистатического электрического поля определяется также высокогорным расположением станции на вечной мерзлоте.

Рассмотрены 125 случаев грозовых событий, которые классифицированы по типам развития молниевых разрядов: положительные, отрицательные и смешанные (положительные и отрицательные). Выполнен анализ вариаций минимальных частот отражения по данным наземного радиозондирования ионосферы, а также гелио-геомагнитных условий во время гроз. Обнаружена тенденция появления грозовой активности с вероятностью 68–70% на фазе восстановления состояния геомагнитного поля после воздействия на атмосферу/ионосферу Земли выбросов корональных масс (СМЕ), высокоскоростных потоков солнечного ветра (HSS) и повышенной интенсивности энергичных электронов на орбите Земли, рисунок 1. На рисунке символ ▼ — гроза с отрицательными разрядами, ↑ — с положительными разрядами, ◆ — гроза с положительными и отрицательными разрядами.



**Рис. 1.** Вариации геомагнитного индекса Dst и грозовые события.

Выявлены случаи повышения электронной концентрации в результате воздействия грозных разрядов на верхнюю часть D-области ионосферы в спокойных гелио-геомагнитных условиях. Достаточно убедительные доказательства влияния на ионосферу различных геофизических процессов в тропосфере, где определяющую и важную роль играют вариации параметров глобальной электрической цепи, приведены в [2].

Выброс корональных масс на орбиту Земли (потоков плазмы с вмороженными магнитными полями) вызывает развитие форбуш-эффектов в космических лучах и геомагнитные бури. Зачастую эти эффекты рассматривают неразрывно друг от друга как следствие одного источника возмущений. Однако самое существенное различие между ними в том, что форбуш-эффект определяется условиями в протяженной гелиосферной области, тогда как геомагнитная активность зависит от локальной ситуации вблизи Земли [3]. События выбросов корональных масс в исследуемый период нами были проанализированы по особенностям их проявлений в атмосфере Земли: 1 — большие форбуш-эффекты и большие магнитные бури, 2 — форбуш-эффекты без магнитных бурь, 3 — умеренные и большие магнитные бури, форбуш-эффекты менее или  $\sim 1\%$ .

Установлено, что понижение атмосферного электрического поля ( $\sim 40\text{--}50$  В/м) в условиях «хорошей» погоды обусловлено уменьшением интенсивности галактических космических лучей во время форбуш-эффектов. Магнитные бури вызывают его флуктуации в минутном диапазоне за счет изменения жесткости геомагнитного обрезания.

Обнаружены длительные аномальные изменения во временных характеристиках электрического поля накануне и во время значительных землетрясений с магнитудой более 5.0, а также перед слабыми землетрясениями, но с эпицентрами, расположенными в непосредственной близости от установки. Поскольку г. Алматы окружен рядом потенциальных источников сильных землетрясений выявленные особенности в атмосферном электрическом поле имеют важное прикладное значение для их прогноза.

### Литература

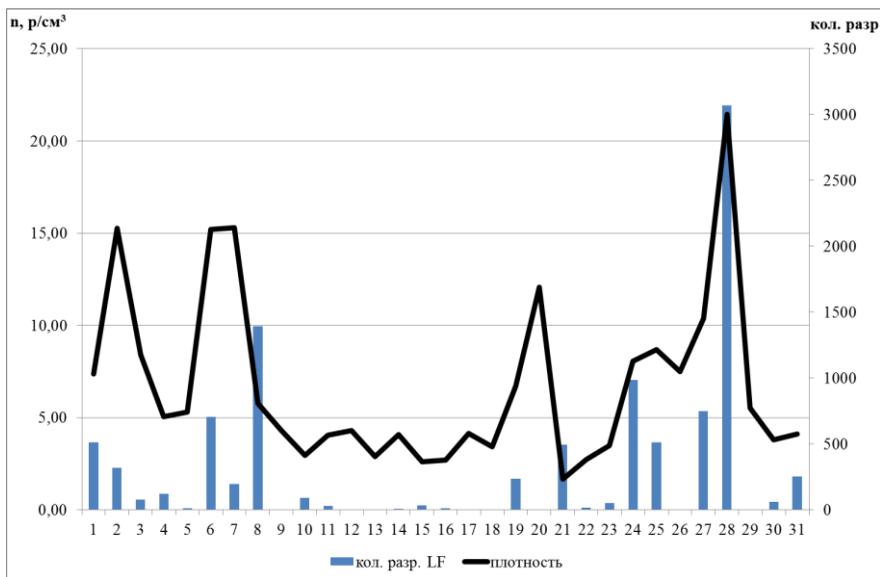
1. *V.P. Antonova, L.I. Vildanova, A.V. Gurevich, K.P. Zybin, A.N. Karashtin, S.V. Kryukov, V.A. Ryabov, M.O. Ptitsyn, A.P. Chubenko, Yu.V. Shlyugaev, A.L. Schepetov* Influence of cosmic rays and the runaway-electron breakdowns on thunderstorm processes in the atmosphere // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2009. V. 52, № 9. P. 1496–1501.
2. *S.A. Pulinet, J.Y. Liu* Ionospheric variability unrelated to solar and geomagnetic activity // *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 34. P. 1826–1933.
3. *А.В. Белов, Е.А. Ерошенко, В.А. Оленева, А.Б. Струминский, В.Г. Янке* Чем обусловлены и с чем связаны форбуш-эффекты // *Изв. РАН., Сер.Физическая*. 2001. Т. 65, № 3. С. 373–376.

## О влиянии плотности протонов солнечного ветра на грозное электричество

*А. А. Черкесов*

Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик

В данной работе рассмотрена плотность протонов солнечного ветра ( $n$ ) как один из возможных факторов воздействия на грозное электричество. Проведен корреляционный и регрессионный анализ. Пространственное глобальное распределение грозовой активности исследуется на основе данных инструментальных измерений с помощью грозорегистратора LS800. Для анализа были выбраны разряды типа облако–земля (LF-диапазон). Количество грозовых разрядов были отобраны в пределах географических координат 43.00 – 45.50. Данные по солнечной активности, а именно, плотности протонов солнечного ветра были отобраны с сайтов [1, 2] На рис. 1 представлена зависимость количество грозовых разрядов от среднесуточной плотности протонов солнечного ветра в июле 2016 г.



**Рис. 1.** Зависимость количество грозовых разрядов и плотности протонов солнечного ветра за месяц в июле 2016 г.

В работе получены следующие результаты:

- Корреляционный анализ показал хорошую взаимосвязь между исследуемыми параметрами. Коэффициент корреляции составил 0,64. Стати-

стическая значимость (sig.; от англ. statistical signification) равна  $0,0001 < 0,01$  на 1%-ом уровне ошибки, что говорит о высоком уровне значимости.

- Уравнение регрессии:  $y = 0,0049 x + 5,1872$ . Коэффициент детерминации равен  $R^2 = 0,4037$  или  $D = 40,4\%$ . Статистическая значимость sig(F-теста) равна  $0,0001 < 0,01$  на 1%-ом уровне ошибки.

### **Литература**

1. Solar and heliospheric observatory, soho: [сайт].  
URL: <https://sohoftp.nascom.nasa.gov/sdb/goes>.
2. The ACE science center: [сайт]. URL: [www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2).

## Параметры молниевых разрядов по инструментальным измерениям

З. М. Керефова

Высокогорный геофизический институт Росгидромета, Нальчик

Электричество хорошей погоды неразрывно связано с грозовым электричеством и составляет часть так называемой глобальной электрической цепи. Исследования грозовых процессов представляет особый интерес, поскольку грозы наносят существенный ущерб многим отраслям экономики, сельскому хозяйству, авиации и объектам энергетики. Часто вследствие удара молнии возникают лесные пожары, отключение высоковольтных линий электропередач. Поэтому определение параметров молнии таких как: координаты разрядов молнии, сила тока, время нарастания тока молнии до пикового значения, количество поражений земли молниями являются необходимыми при организации молниезащитных мероприятий [1–4].

Целью работы заключалась в исследовании параметров молниевых разрядов на территории Северокавказского федерального округа. Информационная база исследований состояла из данных за период с 2009 по 2015 г., регистрируемые грозорегистратором LS8000 фирмы Vaisala.

Полученные среднестатистические значения токов наземных молний по субъектам Федерации приведены в таблице 1.

Таблица. Сводная таблица значений токов молний, различной полярности по субъектам юга России

Субъекты	Токи в канале молнии				
	$I_{cp}^+$ , кА	$I_{cp}^-$ , кА	$I_{med}^+$ , кА	$I_{med}^-$ , кА	$ I_{cp} $ , кА
Кр. Край и Адыгея	32,72	-24,04	30,21	-22,67	25,23
КЧР	28,47	-16,1	15,96	-11,67	17,31
КБР	31,88	-12,45	15,46	-6,75	14,04
Северная Осетия	31,89	-16,54	14,25	-11,38	18,44
Ставропольский край	30,61	-12,79	21,17	-11,33	14,45
Ростовская область	33,72	-17,11	17,75	-13,08	18,11
Калмыкия	31,07	-22,63	24,17	-23,25	23,5
Чечня и Ингушетия	45,13	-23,61	15,5	-12,08	27,23
Дагестан	47	-29,5	24,04	-23,63	33,82

Средние абсолютные значения токов молний определялись по данным гронопеленгационной сети (ГПС) с использованием выражения (1).

$$|I_{cp}| = \frac{I_{cp}^- N^- + I_{cp}^+ N^+}{N^- + N^+}, \quad (1)$$

$I_{cp}^+$  — среднее значение тока положительной полярности,

$I_{cp}^-$  — среднее значение тока отрицательной полярности,

$I_{\text{мед}}^+$  — медиана положительных токов,

$I_{\text{мед}}^-$  — медиана отрицательных токов,

$|I_{\text{ср}}|$  — средние значения тока по модулю,

$N^-$  — количество зарегистрированных молний «облако–земля» отрицательной полярности,

$N^+$  — количество зарегистрированных молний «облако–земля» положительной полярности.

Выполнен анализ соотношений количества молний «облако–земля» положительной и отрицательной полярности. Получено, что доля наземных молний отрицательной полярности в среднем в 6 раз больше, чем доля молний положительной полярности. На рассматриваемой территории средние значения токов в канале молнии по данным за семилетний промежуток времени варьируются от 14 кА до 34 кА.

### Литература

1. *А.Х. Аджиев, Д.Д. Кулиев* Характеристики грозовой активности и параметры молниевых разрядов на территории юга европейской части России. Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2018, т. 54, № 4, С. 437–445.
2. *А.Х. Аджиев, В.О. Тапасханов, В.Н. Стасенко* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология № 1, 2013. С. 5–11.
3. РД34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. Утверждена Главтехуправлением Минэнерго СССР 12.10.87. Москва 1987 г. 10 с.
4. *И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина, Я.М. Шварц* Электричество облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 456 с.

**Механизм инициации и развития молнии  
от иницирующего события (IE) через стадию  
начальных изменений электрического поля (IEC)  
до стадии начальных импульсов пробоя (IBPs)**

*А. Ю. Костинский<sup>1</sup>, Т. Маршалл<sup>2</sup>, М. Стольценбург<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Московский институт электроники и математики НИУ Высшая школа экономики,  
Москва, Россия

<sup>2</sup> Университет штата Миссисипи, Оксфорд, США

На сегодняшний день механизм возникновения и развития молний в грозовых облаках не до конца понятен и не сформулирован как последовательная цепочка плазменных событий [1, 2].

В [3] был предложен новый последовательный механизм возникновения и развития молнии от иницирующего события до начальных импульсов пробоя (далее Механизм). Механизм предполагает, что иницирование происходит в области грозового облака объемом  $1 \text{ км}^3$  с электрическим полем  $E > 0,4 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{атм})$ , которая содержит благодаря турбулентности многочисленные небольшие « $E_{\text{th}}$ -объемы» размером  $3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$  с электрическим полем  $E \geq 3 \text{ МВ}/(\text{м} \cdot \text{атм})$ , которые мы называем также «воздушными электродами». Механизм описывает иницирование молнии двумя наблюдаемыми типами иницирующих событий: событие высокой мощности VHF-излучения [4], называемое компактный внутриоблачный разряд (KBR, compact intracloud discharge (CID)), или слабое событие VHF-излучения [5]. Согласно Механизму, оба типа иницирующих событий вызваны лавинами релятивистскими убегающих электронов, проходящих через многие из  $E_{\text{th}}$ -объемов, тем самым вызывая почти одновременный (синхронизированный) старт множества положительных стримерных вспышек.

В [3] также было показано, что синхронная инжекция релятивистских электронов в такие малые  $E_{\text{th}}$ -объемы требует, чтобы релятивистские лавины убегающих электронов иницировались ШАЛ с энергиями  $\epsilon \geq 10^{15} \text{ эВ}$ , которые могли бы создавать  $10^5 - 10^7$  вторичных электронов на высотах, где расположены высокие электрические поля грозовых облаков. После синхронного, в пределах нескольких микросекунд, старта начальных стримерных вспышек, благодаря ионизационно-перегревной неустойчивости, вдоль траекторий стримеров возникают высокопроводящие «необычные плазменные образования» (unusual plasma formations, UPFs, [6, 7]), которые с помощью вторичных положительных стримеров между ними, объединяются в длинные каналы горячей плазмы, образующие плазменные сети. Взаимодействие этих длинных каналов и плазменных сетей горячей плазмы быстро (за сотни микросекунд) приводит к серии разрядов, которые являются источником начальных импульсов пробоя (initial breakdown pulses, IBPs). По-

следовательность начальных импульсов пробоя (IBPs), в конечном итоге, создает длинный проводящий канал, который может устойчиво развиваться в электрическом поле грозового облака и поддерживать процесс развития большого отрицательного ступенчатого лидера, который и фиксируется радиофизическими и оптическими методиками, как молния, движущаяся к поверхности земли.

### **Литература**

1. V.A. Rakov, M.A. Uman *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 2003.
2. J.R. Dwyer, M.A. Uman *The physics of lightning* // *Physics Reports*. 2014. 534. 147–241.
3. A.Y. Kostinskiy, T.C. Marshall, M. Stolzenburg *The mechanism of the origin and development of lightning from initiating event to initial breakdown pulses (v.2)* // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. 125. e2020JD033191.
4. W. Rison, P.R. Krehbiel, M.G. Stock, H.E. Edens, X.-M. Shao, R.J. Thomas *et al.* *Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms* // *Nature Communications*. 2016. 7:10721.
5. T. Marshall, M. Stolzenburg, N. Karunarathna, S. Karunarathne *Electromagnetic activity before initial breakdown pulses of lightning* // *Journal of Geophysical Research*, 2014. 119. 12,558.
6. A.Y. Kostinskiy, V.S. Syssoev, N.A. Bogatov, E.A. Mareev, M.G. Andreev, L.M. Makalsky *et al.* *Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds* // *Geophysical Research Letters*. 2015. 42. 8165.
7. A.Y. Kostinskiy, V.S. Syssoev, N.A. Bogatov, E.A. Mareev, M.G. Andreev, L.M. Makalsky *et al.* *Infrared images of bidirectional leaders produced by the cloud of charged water droplets* // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. 120. 10,728–10,735.

## Оценка вертикального электрического тока, вызванного медленным пробоем стратосферы лавинами убегающих электронов, по измеренным на уровне земли вариациям космических лучей

*Н. С. Хаердинов, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов*

Институт ядерных исследований, Москва

В публикациях [1, 2], для ряда «ярких», длительностью несколько минут, событий регистрации установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН возмущений интенсивности гамма-квантов (10–17 и 17–30 МэВ) на уровне гор, во время гроз, в предположении их генерации лавинами убегающих электронов, была приведена теоретическая оценка высоты генерации. Кратко изложен принцип вычислений по регистрации возмущений в двух энергетических интервалах. Выводы — половина событий имела стратосферное происхождение с интенсивностью убегающих электронов  $\sim 10^7 \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}$ . В статье [3] приводится результат измерения интенсивности гамма-квантов, зарегистрированных детектором в самолёте непосредственно над вершиной грозового облака, генерированных в стратосфере убегающими электронами, ускоренными вниз. Оценка их интенсивности в максимуме, так же, оказалась  $10^7 \text{ с}^{-1}\text{м}^{-2}$ . Плотность электрического тока в стратосфере  $130 \text{ нА/м}^2$ .

В настоящей работе, для событий, описанных в работах [1, 2] проведены оценки, согласно которым, в стратосфере, в максимуме лавин убегающих электронов, в течение  $\sim 10$  секунд ионизация способна достичь  $n_{\text{ион}} \sim 10^{11} \text{ м}^{-3}$ . При этом становится возможным инициирование осадков [4]. Оценки плотности тока, соответствующих событиям, при установившихся условиях  $j \sim 100 \text{ нА/м}^2$ . Показана возможность исследования динамики «медленного» высотного разряда по данным наземных измерений.

### Литература

1. *N.S. Khaerdinov, A.S. Lidvansky* Heights of generation of runaway electrons in bright cosmic ray events observed on the ground during thunderstorms // *J. Phys.: Conf. Ser.* 409 012225
2. *Н.С. Хаердинов, А.С. Лидванский* Количественная интерпретация экспериментального исследования вариаций космических лучей во время гроз // VII Российская конференция по атмосферному электричеству, 2012 г., Санкт-Петербург, Сборник научных трудов, с. 248–250.
3. *N.A. Kelley, D.M. Smith et al.* Relativistic electron avalanches as a thunderstorm discharge competing with lightning // *Nature Communications* volume 6, Article number: 7845 (2015).
4. *М.В. Кустов* Влияние концентрации ионов в атмосфере Земли на процессы осадкообразования над зоной пожара // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2014. №. 2 (21), вып. 1. С. 114–118.

## Математическое моделирование заряжения капель в ионной среде с помощью эрдитарной динамической системы Риккати

*Т. С. Кумыков*

Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН, Нальчик

Известно, что образование заряженных областей в грозовых облаках начинается с электризации облачных частиц и гидрометеоров в них, и что в таких процессах, всегда участвуют ионы. Также следует отметить, что в последние десятилетия значительно расширились исследования физических процессов в грозовых облаках, в которых облако рассматривается как фрактальный объект. Поэтому исследование процессов электризации облачных частиц (в частности капельки) с участием ионов, в которых учитываются фрактальные свойства облаков, является актуальным.

Облака относятся к нерегулярным самоафинным фракталам, и процессы, протекающие в такой среде, описываются дифференциальными уравнениями, содержащими производные дробного порядка. Такой подход позволяет неявно включать дополнительные факторы взаимодействия физической системы. Одним из таких факторов является фрактальность облачной среды. Учет этого фактора меняет рассматриваемые уравнения динамики атмосферных облачных процессов, превращая их в дифференциальные уравнения дробного порядка.

Вильсоном была впервые поставлена задача исследование электризации капелек в воздухе, содержащем легкие ионы, с учетом влияния электрического поля и теоретически решалась Г. Ф. Друкаревым [1] и др. Электризация капелек, скорость падения которых меньше скорости движения ионов в электрическом поле, зависящее от напряженности поля и значения полярных проводимостей воздуха, равноценна электризации падающей капельки, которая увлекает за собой достаточный слой ионизированного воздуха, или неподвижной капельки. Поэтому учитывая, что рассматриваемое облако представляет собой фрактальный объект или фрактальную среду, процесс электризации капли можно описать уравнением

$$\partial_{0+}^{\alpha} q(t) = P q^2(t) + Bq(t) + C, \quad (1)$$

где  $\partial_{0+}^{\alpha}$  — производная по Капуто,  $q(t)$  — заряд капли,  $P, B, C$  — соответствующие постоянные.

Уравнение (1) представляет собой эрдитарное уравнение Риккати, с помощью которого в работе рассматривается процесс заряжения капли в ионной среде.

### Литература

1. Г.Ф. Друкарев О заряде дождевых капель // Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1944. Т. 8, № 6. С. 330—336.

## Дипольное электромагнитное излучение незаряженной капли, нелинейно осциллирующей во внешнем электростатическом поле

*Н. Ю. Колбнева*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Ярославль,

<sup>2</sup> Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль

Электромагнитное излучение от осциллирующих во внешних полях заряженных капель жидкости представляет интерес в связи с проблемами радиолокационного зондирования облаков и туманов, проблемой радиопомех от огней Св. Эльма, появляющихся на обшивке самолетов.

Согласно общей теории излучения интенсивность электромагнитного излучения системы ускоренно движущихся зарядов состоит из суперпозиции дипольной, квадрупольной и магнитно-дипольной компонент. Разделение общего излучения на мультипольные компоненты ведется по малому параметру  $\delta$  — квадрату отношения радиуса капли к длине излучаемой волны. Порядок величины этого параметра  $\delta \sim 10^{-15}$ . При этом дипольная компонента излучения обнаруживается в расчетах первого порядка малости по  $\delta$ , квадрупольная — второго.

На основе общей теории излучения в линейных расчетах по  $\epsilon$  (отношению амплитуды осцилляций к характерному линейному размеру капли) обнаружено дипольное электромагнитное излучение.

В настоящей работе выполнен аналитический асимптотический расчет во втором порядке малости по  $\epsilon$  капиллярных осцилляций незаряженной капли идеальной несжимаемой идеально проводящей жидкости во внешнем однородном электростатическом поле и интенсивность дипольного электромагнитного излучения.

Во внешнем электрическом поле капля вытягивается в сфероид и на её поверхности индуцируются заряды. Капля смоделирована в виде диполя: разноименным индуцированным зарядам поставлены в соответствие равновеликие точечные заряды, помещенные в положениях эффективных центров положительного и отрицательного зарядов. При капиллярных осцилляциях поверхности сфероида осциллируют положения эффективных зарядов и величина индуцированного заряда, в результате этого генерируются электромагнитные волны дипольного типа.

Математическая модель поставленной задачи включает основные уравнения электрогидродинамики идеальной несжимаемой идеально проводящей жидкости с граничными условиями. Кроме этого введены дополнительные интегральные условия: неизменности полного объема капли, неподвижности центра масс капли и условие незаряженности капли. Начальные условия заданы в виде начальной деформации равновесной формы капли и равенства нулю скорости движения поверхности капли.

Рассмотрение задачи ограничено вторым порядком по безразмерной амплитуде осцилляций  $\epsilon$  и расчеты задачи выполнены с сохранением слагаемых, учитывающих взаимодействие возбужденных колебательных мод со стационарной деформацией капли и учитывающих взаимодействие возбужденных колебательных мод между собой. Для упрощения математических расчетов принято, что квадрат эксцентриситета капли  $e^2$  порядка безразмерной амплитуды осцилляций, таким образом, сведя задачу к одному малому параметру  $\epsilon$ .

Решение поставленной нелинейной задачи проведено в рамках метода многих масштабов. Ограничиваясь точностью до второго порядка малости, искомые функции представлены в виде рядов по степеням  $\epsilon$ , учитывая, что их эволюция во времени определяется основным и более медленным масштабами времени. Поскольку величина напряженности электрического поля порядка  $\epsilon^{1/2}$ , то разложение для электрического потенциала проведено по полуцелым степеням параметра  $\epsilon$  с точностью до порядка  $5/2$ .

В расчетах нулевого порядка малости по  $\epsilon$  найдена форма равновесной поверхности капли, которая с точностью до  $e^2$  совпала с уравнением вытянутого сфероида.

Равновесный электрический потенциал получен в виде суперпозиции электрических потенциалов в окрестности незаряженной сферы во внешнем поле и добавки, связанной с вытянутостью капли.

В электрогидродинамических расчетах первого и второго порядков малости по  $\epsilon$  найдены последовательные поправки к возмущению поверхности капли. В расчетах  $3/2$  и  $5/2$  по  $\epsilon$  найдены поправки к электрическому потенциалу, вызванные взаимодействием возбужденных колебательных мод со стационарной деформацией капли и взаимодействием возбужденных колебательных мод между собой и со стационарной деформацией капли.

В электрогидродинамической математической асимптотической процедуре рассчитан вектор нормали к возмущенной волновым движением поверхности капли, поверхностная плотность индуцированного внешним электростатическим полем заряда, дипольный момент возмущенной сфероидальной капли, нелинейно осциллирующий во времени и генерирующий излучение дипольного типа, интенсивность которого оценена по известным соотношениям общей теории излучения.

Для типичных размеров внутриоблачных капель и напряженностей внешних электрических полей получено, что уединенная капля при возбуждении двух соседних колебательных мод (второй и третьей) излучает мощность  $\sim 2 \cdot 10^{-30}$  эрг/с.

Показано, что интенсивность дипольного излучения, генерируемого нелинейными осцилляциями незаряженной капли во внешнем электростатическом поле, по порядку величины совпадает с интенсивностью дипольного излучения, найденного в расчетах первого порядка малости по  $\epsilon$ .



**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ**

## **Электричество среднеширотного атмосферного пограничного слоя над сушей: мониторинг и моделирование**

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

Исследования электрического состояния атмосферного пограничного слоя (АПС), включая создание численных моделей, базируются преимущественно на результатах наземных обсерваторских и полевых натурных наблюдений. Электродинамические процессы в АПС, наряду с действием генераторов глобальной электрической цепи (ГЭЦ), обусловлены пространственным распределением объемного заряда и электрической проводимости, турбулентным режимом АПС, а также нелокальным характером электрического поля [1–4]. В летне-осенние сезоны 2016–2020 гг. на геофизическом полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН [58°04' N; 38°14' E] с использованием привязного аэростата и аппаратной измерительной платформы проводились высотные аэрофизические наблюдения электрической проводимости, напряженности атмосферного электрического поля, концентрации аэрозольных частиц, объемной активности радона [5]. Цель исследований — установление закономерностей формирования вертикальных аэроэлектрических профилей. Зондирование выполнялось до высот приблизительно 500 м и сопровождалось одновременными наземными геофизическими наблюдениями [6]. Метод синхронных разнесенных обсерваторских и полевых натурных наблюдений позволил детально проанализировать пространственно-временную динамику электрических величин АПС. В результате последовательных подъемов и спусков, а также удерживания платформы на определенных высотах, обнаружены долгоживущие слои объемного заряда, получены оценки скорости изменения средней плотности объемного заряда в нижней атмосфере. Определено, что плотность заряда легких ионов заключена в диапазоне от  $-20$  до  $30$  пКл/м<sup>3</sup>, достигая наибольших значений, за редкими исключениями, непосредственно у земной поверхности. Проанализированы характерные особенности высотных профилей напряженности электрического поля, объемной активности радона, концентрации аэрозольных частиц и легких ионов. На основании результатов высотного зондирования количественно определены электрическое сопротивление столба нижней атмосферы, электрический потенциал относительно земли и электродвижущая сила, действующая в АПС в условиях невозмущенной атмосферы (условиях «хорошей погоды»). Полученные оценки воспроизводятся численной моделью и показывают значительный вклад АПС в процессы формирования ГЭЦ.

### **Благодарности**

Исследования (в части обсерваторских радиофизических наблюдений) выполнены согласно государственному заданию ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023.

### **Литература**

1. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.A. Prokhorchuk* Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167. P. 327–348.
2. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.A. Prokhorchuk, A.S. Kozmina* Turbulent electric current in the marine convective atmospheric boundary layer // *Atmos. Res.* 2019. V. 228. P. 86–94.
3. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // *Atmos. Res.* 2020. V. 244. ES 105035.
4. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, A.A. Prokhorchuk, E.V. Klimanova* Statistics of variations in atmospheric electrical parameters based on a three-dimensional model and field observations // *Atmos. Res.* 2021. V. 259. ES 105660.
5. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, E.V. Klimanova, A.A. Prokhorchuk, A.S. Kozmina, A.V. Guriev* Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // *Atmos. Res.* 2021. 250. ES105355.
6. *S.V. Anisimov, A. Chulliat, E.M. Dmitriev* Information-measuring complex and database of mid-latitude Borok Geophysical Observatory // *Russian Journal of Earth Sciences.* 2008. V. 10, ES3007.

## Статистические характеристики вариаций объёмного заряда и электрического поля невозмущенной нижней атмосферы

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

Многообразие процессов с участием электрических зарядов, полей и токов в невозмущённой нижней атмосфере не позволяет без их учета корректно интерпретировать результаты наземных наблюдений при анализе глобальной электрической активности. Наблюдаемые вблизи земной поверхности вариации напряжённости атмосферного электрического поля отражают изменчивость разности потенциалов между ионосферой и земной поверхностью на фоне электрических процессов с существенно меньшими масштабами, чем планетарный, однако сопоставимыми по объёмной плотности энергии и амплитуде вариаций [1, 2]. Заметная роль в динамике электрических переменных невозмущённой нижней атмосферы в диапазоне короткопериодных вариаций  $4\pi\sigma L^2/c^2 \ll \tau < \varepsilon_0/\sigma \sim 10^3$  с ( $L$  — характерный пространственный масштаб,  $c$  — скорость света,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\sigma$  — средняя удельная электропроводность) отводится микрометеорологической турбулентности, осуществляющей каскадный механизм генерации, транспорта и диссипации флуктуаций определяющих электрическую проводимость малых атмосферных составляющих, таких как концентрации аэроионов и аэрозольных частиц, а также объёмная активность инертных радиоактивных газов  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  — прекурсоров  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, инициирующих образование ионных пар в воздухе.

Вследствие стохастичности турбулентных систем их статистическое описание представляется наиболее естественным и общим, предьявляя при этом, однако, высокие требования к объёму массивов данных натурных наблюдений, лабораторных и вычислительных экспериментов наряду с тщательностью их проведения. Несмотря на усовершенствование инструментов и развитие сети наблюдений атмосферного электричества, имеющиеся данные до сих пор чрезвычайно фрагментарны и ограничиваются в лучшем случае локальными эпизодическими наблюдениями электрического поля и/или проводимости с использованием нескольких наземных датчиков и редкими случаями высотных измерений [3–8]. С другой стороны, численные модели, основанные на совокупности упрощённых динамических и кинетических уравнений или эвристических принципов, хоть и не в состоянии учесть всю сложность поведения реальной среды, тем не менее, предоставляют возможность исследования изолированного или совместного влияния фиксированного набора входных параметров на динамический портрет системы или множество характеризующих её статистических параметров в

той мере, в которой это позволяют пространственно-временное разрешение модели или ограничения, связанные с конкретной вычислительной реализацией математических соотношений.

В настоящей работе на основе трёхмерной численной модели и результатов полевых многоточечных наземных и аэростатных наблюдений исследуются корреляционные, структурные и спектральные зависимости короткопериодных вариаций объёмного заряда и электрического поля невозмущённой нижней атмосферы, их анизотропия и зависимость от термического форсинга [9].

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023.

### Литература

1. *С.В. Анисимов, С.В. Галиченко, К.В. Афиногенов, А.А. Прохорчук* Глобальные и региональные составляющие электричества невозмущённой нижней атмосферы средних широт // Физика Земли. 2018. № 6. С. 104–114.
2. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.A. Prokhorchuk* Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // *Boundary-Layer Meteorol.* 2018. V. 167, № 2. P. 327–348.
3. *T.C. Marshall, W.D. Rust, M. Stolzenburg, W.P. Roeder, P.R. Krehbiel* A study of enhanced fair-weather electric fields occurring soon after sunrise // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104. P. 24455–24469.
4. *K.A. Nicoll, R.G. Harrison, H.G. Silva, R. Salgado, M. Melgão, D. Bortoli* Electrical sensing of the dynamical structure of the planetary boundary layer // *Atmos. Res.* 2018. V. 202. P. 81–95.
5. *K.A. Nicoll* Measurements of atmospheric electricity aloft // *Surv. Geophys.* 2012. V. 33, P. 991–1057.
6. *G.M. Lucas, J.P. Thayer, W. Deierling* Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2017. V. 122. 10.1002/2016JD025944.
7. *I.N. Panchishkina, G.G. Petrova, A.I. Petrov, O.G. Chkhetiani* Conduction current density profile transformation near the earth's surface, in connection with atmospheric stratification // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V.1604. 012002.
8. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, E.V. Klimanova, A.A. Prokhorchuk, A.S. Kozmina, A.V. Guriev* Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // *Atmos. Res.* 2021. V. 250. 105355.
9. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, A.A. Prokhorchuk, E.V. Klimanova* Statistics of variations in atmospheric electrical parameters based on a three-dimensional model and field observations // *Atmos. Res.* 2021. V. 259. 105660.

## Плотность конвективного электрического тока над морем

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

Атмосферный пограничный слой (АПС) выделяется среди других областей глобальной электрической цепи ярко выраженными пространственно-временными колебаниями электрических параметров атмосферы. Турбулентный электрический ток уменьшает градиент плотности объемного заряда. При определенной конфигурации электрических и статистических параметров АПС турбулентный электрический ток создает заметный вклад в распределение электрического ионосферного потенциала [1].

Оценивается плотность конвективного электрического тока на поверхности океана. Производится численное моделирование электродинамики морского атмосферного пограничного слоя (АПС) в горизонтально однородном приближении. Механический перенос скалярных, в том числе, электрически заряженных, величин осуществляется лагранжевыми частицами (трассерами). Трехмерное векторное поле скорости трассеров задается суперпозицией векторного поля вихреразрешающего моделирования (LES) и кинематической симуляции для подсеточного масштаба скорости методом случайных Фурье-мод [2].

Отношение потоков явного тепла к скрытому на поверхности океана задается как 1/12 [3]. Скорость геострофического ветра варьируется от 0 до 10 м/с. Анализируются электрические состояния АПС в финале эволюции в течение 22 часов из первоначально устойчиво стратифицированного и лишённого влаги АПС [4].

Плотность конвективного электрического тока ( $j_i$ ) на поверхности океана находится в пределах погрешности и отражает баланс электрического заряда в стационарном АПС.  $j_i$  достигает максимума в 1.0–1.2 пА/м<sup>2</sup> между 0 и 10 метрами высоты.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023.

### Литература

1. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, A.A. Prokhorchuk, K.V. Aphinogenov* Mid-latitude convective boundary layer electricity: A study by large-eddy simulation // *Atm. Res.* 2020. V. 244.
2. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, A.A. Prokhorchuk, E.V. Klimanova* Statistics of variations in atmospheric electrical parameters based on a three-dimensional model and field observations // *Atm. Res.* 2021. V. 259.
3. *A. Bentamy, et al* Review and assessment of latent and sensible heat flux accuracy over the global oceans // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 201. P. 196–218.
4. *I. Esau* Indirect air–sea interactions simulated with a coupled turbulence-resolving model // *Ocean dynamics.* 2014. V. 64. P. 689–705.

## Статистические оценки короткопериодных вариаций концентрации лёгких ионов в приземной атмосфере

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

В результате каскадных взаимодействий с атмосферой компонент галактических и солнечных космических лучей, а также частиц, испускаемых при радиоактивных распадах ядер элементов, распространённых преимущественно в нижней части тропосферы, из молекул газов формируются ионы, обеспечивающие протекание тока проводимости через атмосферный участок глобальной электрической цепи. Вновь образованные лёгкие (с подвижностью более  $0.5 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ) ионы за характерное время около  $10^2 \text{ с}$  в нижней атмосфере рекомбинируют или присоединяются к аэрозольным частицам, однако за это время успевают преодолеть некоторое расстояние, мигрируя в турбулентных потоках и одновременно смещаясь под действием атмосферного электрического поля в противоположных направлениях в зависимости от полярности. Время электрической диссипации заряда в приземной атмосфере, определённое из соотношения  $\tau = \epsilon_0/\sigma$ , где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, а  $\sigma$  — электропроводность, составляет около  $10^3 \text{ с}$  и формирует верхнюю границу диапазона короткопериодных вариаций напряженности атмосферного электрического поля, которые наряду с ионообразованием, турбулентным переносом, молекулярной диффузией и физико-химическими процессами трансформации исходных частиц управляют динамикой лёгких атмосферных ионов и определяют статистику короткопериодных вариаций их концентраций [1–4].

Полевые натурные наблюдения концентраций лёгких ионов проводились в летний период 2020 года. Три датчика концентрации лёгких ионов и две ультразвуковые метеостанции размещались двумя способами: в горизонтальной плоскости и на вертикальной мачте высотой 6 м. Для анализа отбирались данные синхронных разнесенных измерений вариаций температуры и концентраций лёгких ионов, полученные в дневных невозмущенных условиях. Функции плотности вероятности соответствующих вариаций аппроксимированы непрерывно усечёнными устойчивыми распределениями (smoothly truncated stable distribution) [5]. Выполнен анализ статистики временных инкрементов и пространственных разностей, определены параметры структурных функций и корреляции указанных величин. Исследованы параметры скейлинга полученных распределений по отношению к изменению аргумента, в качестве которого выступают временные интервалы между двумя однократными измерениями.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023.

### Литература

1. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.A. Prokhorchuk* Evaluation of the Atmospheric Boundary-Layer Electrical Variability // *Boundary-Layer Meteorology*. 2017. V. 167. P. 327–348.
2. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.V. Guriev, A.S. Kozmina, A.A. Prokhorchuk, E.V. Klimanova* Electricity of mid-latitude atmospheric boundary layer above land: results of observations and numerical modeling // *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2019. V. 231, 012007
3. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, E.V. Klimanova, A.A. Prokhorchuk, A.S. Kozmina, A.V. Guriev* Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform // *Atmos. Res.* 2020. V. 250, 105355.
4. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, A.A. Prokhorchuk, K.V. Aphinogenov* Mid-latitude convective boundary-layer electricity: A study by large-eddy simulation // *Atmos. Res.* 2020. V. 244, 105035.
5. *C. Menn, S.T. Rachev* Smoothly truncated stable distributions, GARCH-models, and option pricing // *Math. Meth. Oper. Res.* 2009. V. 69, № 3. P. 411–438.

## Суточные вариации высотного распределения изотопов радона в приземной атмосфере по данным наземных наблюдений и математического моделирования

*С. В. Анисимов, Э. М. Дмитриев, А. С. Козьмина*  
 Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, Борок

Изотопы радона  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  (торон), образующиеся в земной коре и поступающие в атмосферу с земной поверхности, — основные естественные источники ионизации приземной атмосферы [1]. Высотное распределение изотопов радона в нижней атмосфере формируется атмосферной турбулентностью [2–4]. В данной работе суточная вариация высотного распределения изотопов радона в приземной атмосфере, характерная для условий хорошей погоды, оценивается на основе диффузионной модели переноса приземного радона, параметризованной по данным наземных наблюдений.

Перенос изотопов радона  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  в турбулентной приземной атмосфере в диффузионном приближении описывается уравнениями

$$\frac{\partial A_{\text{Rn}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(z, t) \frac{\partial A_{\text{Rn}}}{\partial z} \right) - \frac{A_{\text{Rn}}}{\tau_{\text{Rn}}}, \quad \frac{\partial A_{\text{Tn}}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(z, t) \frac{\partial A_{\text{Tn}}}{\partial z} \right) - \frac{A_{\text{Tn}}}{\tau_{\text{Tn}}}, \quad (1)$$

где  $A_{\text{Rn}}$  — объемная активность  $^{222}\text{Rn}$ ,  $\tau_{\text{Rn}}$  — его время жизни,  $A_{\text{Tn}}$  — объемная активность  $^{220}\text{Rn}$ ,  $\tau_{\text{Tn}}$  — его время жизни,  $K(z, t)$  — эффективный коэффициент диффузии пассивной примеси, зависящий от высоты  $z$  и времени  $t$ .

Постановку задачи завершают начальные и граничные условия

$$A_{\text{Rn}}|_{z=H_{\text{Rn}}} = A_{\text{Rn}}(t), \quad - \left( K \frac{\partial A_{\text{Rn}}}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = \frac{J_{\text{Rn}}}{\tau_{\text{Rn}}}, \quad - \left( K \frac{\partial A_{\text{Tn}}}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = \frac{J_{\text{Tn}}}{\tau_{\text{Tn}}}, \quad (2)$$

$$A_{\text{Tn}}|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad A_{\text{Rn}}|_{t=0} = A_{\text{Rn},0}(z), \quad A_{\text{Tn}}|_{t=0} = A_{\text{Tn},0}(z),$$

где  $A_{\text{Rn}}(t)$  — наблюдаемая на высоте  $H_{\text{Rn}}$  объемная активность  $^{222}\text{Rn}$ ,  $J_{\text{Rn}}$  и  $J_{\text{Tn}}$  — плотности потоков с земной поверхности  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  соответственно,  $A_{\text{Rn},0}(z)$  и  $A_{\text{Tn},0}(z)$  — решения стационарной задачи (1)–(2) при  $\partial/\partial t \rightarrow 0$ .

Для численного решения начально-краевой задачи (1–2) использованы разностные аппроксимации производных на равномерных по времени и квазиравномерных сгущаемых по высоте сетках.

Коэффициент диффузии пассивной примеси  $K(z, t)$  задается как:

$$K(z, t) = K_{\text{M}} + K_{\text{T}}(z, t), \quad K_{\text{T}} = \begin{cases} K_0(t)(z/z_0)^{m(t)}, & z > z_0, \\ 0, & z < z_0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $K_{\text{M}}$  — коэффициент молекулярной диффузии,  $K_{\text{T}}$  — коэффициент турбулентной диффузии,  $z_0$  — параметр шероховатости подстилающей поверхности,  $K_0(t)$  и  $m(t)$  — параметры степенной аппроксимации

коэффициента турбулентной диффузии. В точке разрыва  $z = z_0$  уравнения переноса (1) заменяются на условия непрерывности потоков изотопов радона:

$$\left( K \frac{\partial A_{Rn}}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0 \rightarrow -0} = \left( K \frac{\partial A_{Rn}}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0 \rightarrow +0}, \left( K \frac{\partial A_{Tn}}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0 \rightarrow -0} = \left( K \frac{\partial A_{Tn}}{\partial z} \right) \Big|_{z=z_0 \rightarrow +0}. \quad (4)$$

Параметры аппроксимации  $K_0(t)$  и  $m(t)$  оцениваются по результатам измерений коэффициентов турбулентной диффузии на двух высотах.

Получены оценки суточных ходов высотных распределений изотопов радона для среднесуточных ходов  $K_T(z_1, t)$  и  $K_T(z_2, t)$  по данным наблюдений пульсаций скорости ветра с помощью двух метеоккомплексов Метео-2М, установленных на высотах  $z_1 = 2$  м и  $z_2 = 10$  м, а также среднесуточного хода  $A_{Rn}(t)$  по данным синхронных наблюдений объемной активности  $^{222}\text{Rn}$  с помощью радонметра AlphaGUARD PQ2000, установленного на высоте  $H_{Rn} = 0,2$  м. Наблюдения проводились на измерительном полигоне ГО «Борок» ИФЗ РАН летом–осенью 2014 г. Данные наблюдений усреднялись по всем суткам, удовлетворявшим условиям «хорошей погоды»: отсутствие осадков, скорость ветра  $< 6$  м/с, облачность  $< 3$  баллов. Значения плотностей потоков  $^{222}\text{Rn}$  ( $J_{Rn}$ ) и  $^{220}\text{Rn}$  ( $J_{Tn}$ ) с земной поверхности оценивались по данным радонметрических наблюдений [5]. Параметра шероховатости  $z_0 = 0.1$  м определен по данным метеонаблюдений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023.

### Литература

1. S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.A. Prokhorchuk Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability // Boundary-Layer Meteorol. 2018. V. 167. P. 327–348.
2. С.В. Анисимов, С.В. Галиченко, К.В. Афиногенов, А.П. Макрушин, Н.М. Шихова Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование // Физика Земли. 2017. № 1. С. 155–170.
3. S.V. Anisimov, E.M. Dmitriev, K.V. Aphinogenov, A.V. Guriev, A.S. Kozmina Variability of radon distribution in the atmospheric surface layer over the land of middle latitudes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 231. 012006.
4. S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, A.V. Guriev, A.S. Kozmina, A.A. Prokhorchuk Electricity of mid-latitude atmospheric boundary layer above land: results of observations and numerical modeling // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 231. 012007.
5. С.В. Анисимов, Э.М. Дмитриев, А.С. Козьмина Фоновая объемная активность радона и торона в почве и приземной атмосфере по наблюдениям сейсмической радоновой станции // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 4. С. 5–16.

## **Влияние аэрозольного состояния приземной атмосферы на перенос заряда под действием механических сил**

*И. Н. Панчишкина, Г. Г. Петрова, А. И. Петров*  
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Результаты экспедиционных исследований, полученные в августе 2017 года в Ростовской области на Цимлянской научной станции (ЦНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и в августе 2018 года на территории Кисловодской высокогорной научной станции ИФА (КВНС, плато Шаджатмаз), показали, что плотность тока механического переноса из атмосферы на землю в значительной мере определяется содержанием аэрозолей субмикронного диапазона в атмосферном воздухе вблизи земной поверхности.

Настоящая работа является продолжением исследований вариаций плотности тока механического переноса с учетом влияния счетной концентрации аэрозолей субмикронного диапазона и метеорологических условий в пункте наблюдений. Для выявления закономерностей процесса переноса зарядов под действием механических сил необходимо понимание механизмов образования и зарядки аэрозолей. В частности, по мере увеличения относительной влажности воздуха наблюдается рост концентрации аэрозолей [1], и изменение избирательности аэрозольных частиц по отношению к легким ионам разных знаков [2], что приводит к появлению объемных зарядов в атмосфере.

Проведен сравнительный анализ влияния метеофакторов на плотность тока механического переноса в пунктах, термодинамические условия в которых имеют существенные отличия: плато Шаджатмаз, где условия в летний период являются типичными для высокогорья, и концентрация аэрозолей повышается ночью в результате конденсации водяного пара, и ЦНС, которая расположена в степном засушливом районе Ростовской области, где содержание аридных аэрозолей в атмосфере повышается в дневное время при усилении скорости ветра.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 19-05-50110 — «Микромир»

### **Литература**

1. *Г.Г. Петрова, И.Н. Панчишкина, А.И. Петров, О.Г. Чхетиани, Е.В. Егоров, В.А. Болдырева* Исследование роли аэрозолей в формировании вариаций электрического поля в приземной атмосфере // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 5(25). с. 42–54.
2. *В.В. Смирнов* Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярно ионизированном воздухе // Изв. РАН. ФАО, 2010, т. 46, с. 321–331.

## Сравнение спектров мелкодисперсного аэрозоля в приземном слое в степной и высокогорной зонах юга России

*И. Н. Панчишкина<sup>1</sup>, Г. Г. Петрова<sup>1</sup>, А. И. Петров<sup>1</sup>, В. А. Болдырева<sup>1</sup>,  
О. Г. Чхетиани<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

В работе рассматриваются особенности распределения по размерам аэрозольных частиц субмикронного диапазона. Данные о счетной концентрации аэрозолей получены в летних экспедициях 2014–2020 гг. на территории научных станций Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН: Цимлянской (ЦНС) и Кисловодской высокогорной (КВНС) с помощью лазерного аэрозольного счетчика ЛАС-П системы НИФХИ им. Л.Я. Карпова в семи размерных диапазонах (0,1–0,2 мкм; 0,2–0,3 мкм; 0,3–0,4 мкм; 0,4–0,5 мкм; 0,5–0,7 мкм; 0,7–1,0 мкм; > 1 мкм). Отбор проб воздуха для исследования осуществлялся с высоты 1 м над земной поверхностью. Размерные спектры аэрозолей построены по данным, полученным в часы с отсутствием в атмосфере помутняющих факторов, и для периодов измерений, когда наблюдатели отмечали запах дыма, пыль или туман.

ЦНС расположена в степной зоне юга России, где аэрозоли образуются, в основном, диспергационным способом в результате ветрового подъема частиц с поверхности почвы. Максимум концентрации аэрозольных частиц в этом пункте наблюдается в дневное время при увеличении скорости ветра. Для периодов степных пожаров в районе Цимлянска счетная концентрация аэрозолей в среднем оказалась выше во всех размерных диапазонах, чем в условиях ясной атмосферы:

На КВНС (плато Шаджатмаз), где условия в летний период характеризуются сравнительно низкими температурами и высокой влажностью, аэрозольная компонента представлена преимущественно конденсационными частицами. Суточные вариации концентрации аэрозолей и относительной влажности синхронны. Средние значения концентрации аэрозолей ночью превышают средние дневные значения для всех размерных диапазонов в 1,5–2 раза, что связано с ростом в ночное время концентрации жидких аэрозолей, образованных в результате конденсации водяного пара. В спектре аэрозолей при наличии тумана и низкой туманообразной облачности, доля наиболее мелких аэрозолей (0,1–0,2 мкм) снижалась, по сравнению с измерением в условиях с ясной атмосферой, в то время как концентрация более крупных аэрозолей (более 0,2 мкм), оказалась выше, чем для ясной атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 19-05-50110 — «Микромир».

## Особенности электрического состояния приземной атмосферы на степной и высокогорной станциях ИФА им. А.М. Обухова РАН

*Г. Г. Петрова<sup>1</sup>, И. Н. Панчишкина<sup>1</sup>, А. И. Петров<sup>1</sup>, О. Г. Чхетиани<sup>2</sup>,  
В. А. Болдырева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

В ходе совместных экспедиций Южного федерального университета и Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН на Цимлянской (2014–2017) и Кисловодской высокогорной (2018–2020) научных станциях ИФА в летние месяцы в течение 7–10 дней производились круглосуточные комплексные измерения атмосферно-электрических характеристик в сочетании с регистрацией аэрозольного спектра, объемной активности радона-222 в атмосфере и почвенном газе, параметров термовлагорежима и динамики атмосферы в слое до 5 метров. На основании результатов полевого эксперимента обнаружено, что на обеих станциях значения градиента электрического потенциала  $G$  (В/м) вблизи земной поверхности коррелируют с концентрацией аэрозольных частиц  $N$  ( $10^6 \text{ м}^{-3}$ ). Полученные эмпирические ряды регрессии аппроксимируются линейной зависимостью  $G = G_0 + kN$ , параметры которой для обследованных пунктов представлены в таблице.

Таблица.

Пункт наблюдений	Год	D частиц	$G_0$ , В/м	$k$ , $10^{-6} \text{ В} \cdot \text{м}^{-2}$	$R^2$
Федоровка, Кашарск.р-н, Р.О.	2012	>0,3 мкм	60	-0,50	0,99
ЦНС ИФА, Цимлянск Р.О.	2017	>0,1 мкм	56	-0,04	0,93
КВНС ИФА, плато Шаджатмаз	2018		49	0,05	0,93
КВНС ИФА, плато Шаджатмаз	2019		33	0,05	0,90

Для пунктов Ростовской области (Р.О.) в условиях жаркой летней степи с ветровым подъемом пыли с иссушенной поверхности почвы характерно снижение значений поля вблизи земли при увеличении содержания аэрозолей в приземном слое. Косвенно это свидетельствует об отрицательном объемном заряде в атмосфере, локализованном на аэрозольных частицах. На плато Шаджатмаз (КВНС ИФА, 2100 м) при высокой влажности воздуха и почвы частицы аэрозоля имеют иную природу и заряжены, по-видимому, положительно, на что указывает увеличение значений поля с ростом концентрации аэрозолей. На возможность такой интерпретации указывают и наблюдаемые на станциях с различными термодинамическими условиями характерные особенности вертикального профиля поля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-50110 — Microworld.

## Исследования ионизации приземной атмосферы и природных радионуклидов по результатам экспедиционных измерений

*Г. Г. Петрова, А. И. Петров, И. Н. Панчишкина, Е. А. Бураева,  
В. А. Болдырева*

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Наряду с регистрацией атмосферно-электрических характеристик радиологические измерения являются неотъемлемой частью измерительно-вычислительного комплекса, используемого при проведении научных экспедиций лаборатории геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета в летние месяцы в степной и высокогорной зонах Северного Кавказа. По результатам натурных измерений совокупный вклад содержащихся в верхнем 5 сантиметровом слое почвы естественных радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и искусственного  $^{137}\text{Cs}$  в плотность ионизации приземного слоя воздуха на уровне земли может достигать от 20–25 % (для республики Адыгея) до 50% (для республики Кабардино-Балкария). Таким образом, на долю атмосферного  $^{222}\text{Rn}$  приходится более 50% ионизации приземного слоя. Для Ростовской области и, в частности, для Цимлянского района вклад радона в ионизацию на уровне земли по данным проведенных измерений и расчётов может быть оценён в 67 %. По результатам измерений на Цимлянской (ЦНС) и Кисловодской высокогорной (КВНС) научных станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН для сгруппированных данных получены регрессионные зависимости отрицательной и положительной удельных электропроводностей атмосферы (фСм/м) от объёмной активности радона-222  $A_{\text{Rn}}$  (Бк/м<sup>3</sup>) на высоте 1 метр. В Цимлянске в августе 2016 года:  $\lambda_- = 15 + 0,2A_{\text{Rn}}$ ,  $\lambda_+ = 16 + 0,2A_{\text{Rn}}$ . На высокогорном плато Шаджатмаз (КВНС, 2100 м) летом 2019 года:  $\lambda_- = 7 + 0,1A_{\text{Rn}}$  и  $\lambda_+ = 12 + 0,1A_{\text{Rn}}$ . Объёмная активность радона в грунте измерительной площадки на КВНС в 2018 изменялась существенно: от 4 кБк/м<sup>3</sup> на глубине 10 см до 28 кБк/м<sup>3</sup> на глубине 50 см. При этом плотность потока радона с поверхности почвы КВНС по данным 2018 и 2019 невелика и составляет 8–20 мБк/м<sup>2</sup>с. Очевидно, из-за обилия осадков почвенные поры заполняются водой, что препятствует эксхалляции радона из почвы в атмосферу. В итоге средние значения объёмной активности радона в атмосфере высокогорной станции невысоки и составляют 9–11 Бк/м<sup>3</sup>.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-50110 — Microworld.

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

## Влияние смога от природных пожаров на электрические процессы в атмосфере

*П. М. Нагорский<sup>1</sup>, К. Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, С. В. Смирнов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

На основе данных спутникового зондирования и приземных наблюдений проведено исследование влияния задымлений от удаленных природных пожаров на территории Сибири на электрическое состояние приземного слоя атмосферы за период с 2006 по 2020 гг.

Состояние атмосферы с интенсивным задымлением является одним из наименее изученных среди других природных явлений. Сложные взаимосвязи между временными вариациями в этой области, с одной стороны, физическими, химическими и биологическими процессами, с другой, определяют важность исследований изменений в окружающей среде во время интенсивных лесных (степных) пожаров.

Анализ случаев интенсивных задымлений, распространяющихся непосредственно в приземном слое атмосферы, показал, что градиент потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) в эти периоды систематически изменялся от положительных величин днем до отрицательных — ночью (от +300 В/м днем до -300 В/м). Выявленные суточные вариации  $\nabla\phi$  кардинальным образом отличаются как от суточных вариаций  $\nabla\phi$  в условиях «хорошей погоды» (кривая Карнеги), так и от усредненных вариаций  $\nabla\phi$  в средних широтах летом с полусуточным периодом.

Для количественных оценок влияния дымовых шлейфов в верхней и средней тропосфере на атмосферное электрическое поле были использованы среднeminутные данные  $\nabla\phi$  за 2006–2019 гг. (г. Томск), данные спектрорадиометров MODIS (спутники Terra, Aqua) и VIIRS (спутник Suomi NPP), метеонаблюдений в стандартные сроки. Анализ данных показал, что распределение значений  $\nabla\phi$  при прохождении дымового шлейфа отличается от аналогического распределения для условий «хорошей» погоды: задымление приводит к понижению (в ~ 1,5 раза) дневных значений  $\nabla\phi$ , а также к практически удвоению размаха значений  $\nabla\phi$ .

Анализ данных аэрологического зондирования и данных облачного лидара CALIOP (спутник CALIPSO) показал, что дымовым шлейфам соответствовали приподнятые инверсии на высотах 1–5 км, под которыми скапливался дымовая аэрозоль, нижняя часть которого, по-видимому, имела отрицательный объемный заряд, что и обусловило понижение напряженности поля в приземном слое.

Выполнено при поддержке госбюджетной темы (№ 121031300154-1).

## Сравнительный анализ «медленных» вариаций электрического поля на примере взрывов вулкана Эбеко и внутримассовых кучево-дождевых облаков

*П. М. Назорский<sup>1</sup>, Р. Р. Акбаев<sup>2</sup>, К. Н. Пустовалов<sup>1,2,3</sup>, П. П. Фирстов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

<sup>2</sup> КФ ФНЦ «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский

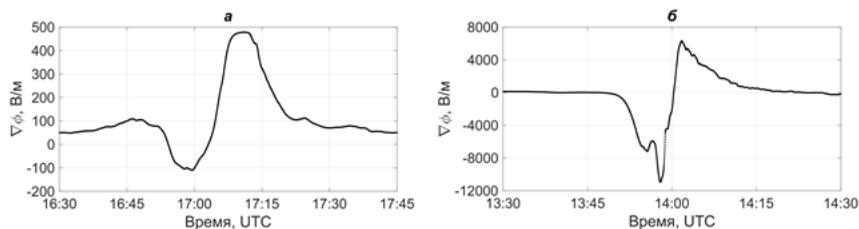
<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Проведено сравнение форм отклика градиента потенциала электрического поля атмосферы ( $\nabla\phi$ ), зарегистрированных в г. Томске при прохождении внутримассовых кучево-дождевых (грозовых) облаков (*Cb*), представляющих собой одиночные конвективные ячейки, и эруптивных облаков (ЭО) от взрывов вулкана Эбеко.

По частоте извержений вулкан Эбеко на о. Парамушир является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги. Новый цикл активность вулкана Эбеко, выразившейся в эпизодически происходящих взрывах вулканского типа, начался в октябре 2016 г. При наиболее сильных взрывах высота ЭО достигает 4–5 км над уровнем моря. В КФ ФНЦ «Единая геофизическая служба РАН» ведется мониторинг вертикальной составляющей электрического поля атмосферы в г. Северо-Курильске, расположенным в 7 км от кратера вулкана. На записях отклика  $\nabla\phi$  выделены четыре основных типа «медленных» вариаций.

Сравнительный анализ форм отклика  $\nabla\phi$  при прохождении эруптивных облаков и внутримассовых *Cb*, зарегистрированных в ИМКЭС СО РАН, показал, что отмечается высокое подобие форм «медленных» вариаций  $\nabla\phi$ . Сделан вывод о сходстве пространственно-временной эволюции электрических структур эруптивных и внутримассовых кучево-дождевых облаков.

Пример такого подобия форм отклика  $\nabla\phi$  при прохождении *Cb* и ЭО представлен на рис 1.



**Рис. 1.** Подобие форм отклика  $\nabla\phi$  при прохождении ЭО 15.04.2020 г. (а) и *Cb* 29.05.2020 г. (б).

Выполнено при поддержке госбюджетной темы (№ 121031300154-1).

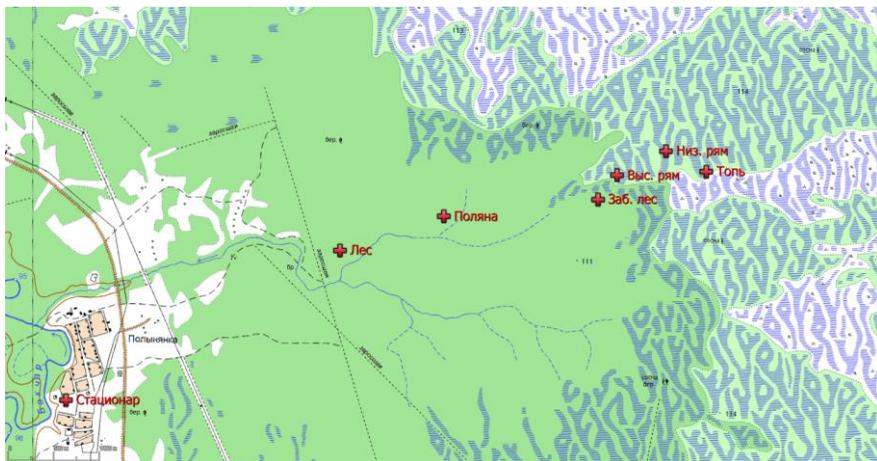
## Влияние болотных ландшафтов Западной Сибири на аэроионы (на примере Бакчарского болота)

*М. В. Оглезнева*<sup>1</sup>, *П. М. Нагорский*<sup>1,2</sup>, *К. Н. Пустовалов*<sup>1,2</sup>, *С. В. Смирнов*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт мониторинга экологических и климатических систем СО РАН, Томск

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

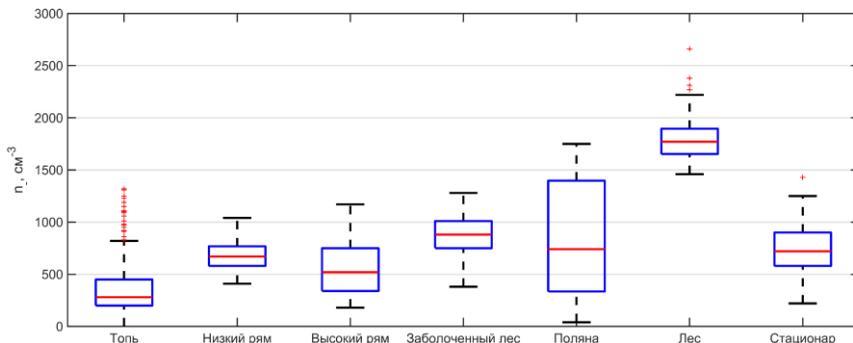
В работе рассматриваются данные содержания ионов, полученные в ходе экспедиционных измерений на стационаре ИМКЭС СО РАН «Васюганье» (56° 57' с. ш., 82° 30' в. д., 120 м над ур. м.) в теплый период 2019–2021 гг. Регистрация ионов производилась счётчиком аэроионов Air Ion Counter Model AIC2-R1 (AlphaLab, Inc.; США). Маршрут экспедиционных измерений представлен на рисунке 1.



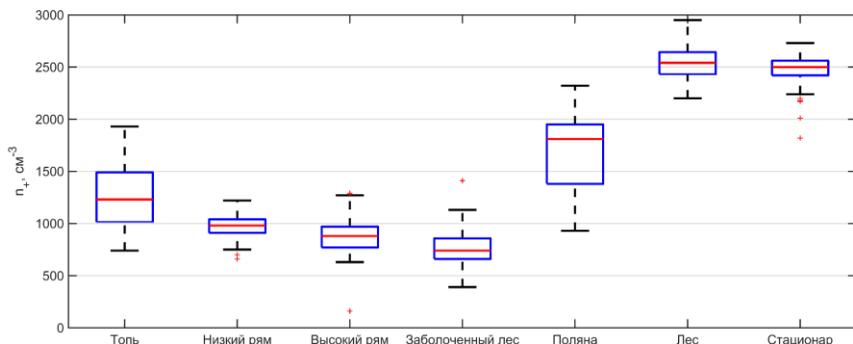
**Рис. 1.** Топографическая карта мест измерения вдоль ландшафтного профиля Бакчарского болота.

Отмечено, что с уменьшением обводненности грунтов происходит рост отрицательных аэроионов (рис. 2). Минимальные концентрации отмечаются на топи (менее  $500 \text{ см}^{-3}$ ), а максимальные значения достигают  $1700 \text{ см}^{-3}$  в лесу. На территории стационара, вблизи трассы концентрации резко снижаются ( $\sim 700 \text{ см}^{-3}$ ).

В пределах болотных ландшафтов обратная картина наблюдается в содержании положительных аэроионов (рис. 3) — с уменьшением обводненности, снижаются и концентрации. При этом максимальные значения  $\sim 2500 \text{ см}^{-3}$  зафиксированы в лесу и в поселке, а минимальные ( $700 \text{ см}^{-3}$ ) — в заболоченном лесу.



**Рис. 2.** Динамика содержания отрицательных аэроионов на различных болотных и селитебных ландшафтах.



**Рис. 3.** Динамика содержания положительных аэроионов на различных болотных и селитебных ландшафтах.

Низкие концентрации ионов в болотных ландшафтах, возможно, связаны с затрудненным выходом радона из обводненных грунтов. При этом механизмы, влияющие на снижение содержания отрицательных аэроионов и рост положительных с увеличением обводненности неясны и требуют дополнительного исследования.

Исследование было выполнено в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050031-8.

## **Response of near-surface meteorology to changes in cloud microphysics and fair-weather current density Jz related to IMF By**

*A. V. Karagodin*<sup>1</sup>, *I. A. Mironova*<sup>1</sup>, *E. V. Rozanov*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics of Earth, Faculty of Physics, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> The Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland

In recent decades, the response of surface meteorology to a change in the By component of the interplanetary magnetic field (IMF) at high latitudes, known as the Mansurov effect, has been widely studied [1, 2]. However, the role of the global electrical circuit (GEC) in these processes is still unclear. Recent studies have shown that the response of cloud microphysics to IMF By-induced changes in the cross-polar cap potential and the downward current density (Jz) in fair-weather may be one of the possible ways to couple the solar wind and surface meteorology [2]. Such a mechanism requires confirmation, but numerical studies that would show the Mansurov effect discovered in observations have not been carried out previously. In this study, we estimated the sensitivity of surface meteorological parameters to a certain change in the rate of coalescence of fair-weather cloud droplets caused by changes in Jz associated with IMF By using the chemistry-climate model SOCOLv3. We found that even small changes of  $\pm 12\%$  in Jz and corresponding changes in the autoconversion rate in regions where IMF By affects the cross-polar cap potential can lead to large-scale anomalies of surface pressure (up to 2 hPa) and air temperature (up to 1.5 degrees K) in high and middle latitudes. This study demonstrates the importance of further exploring solar-terrestrial coupling through the GEC using global climate models.

### **References**

1. *M.M. Lam, G. Chisham, M.P. Freeman* The interplanetary magnetic field influences mid-latitude surface atmospheric pressure. *Environmental Research Letters* 8(4), 045001250 (2013). DOI 10.1088/1748-9326/8/4/045001
2. *R.G. Harrison, M. Lockwood* Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere. *Proceedings of the Royal Society of London Series A476* (2241), 20200164240 (2020). DOI 10.1098/rspa.2020.0164

## **Инженерное моделирование геоиндуцированных токов в электроэнергетических системах**

*В. В. Вахнина, А. Н. Черненко, А. А. Кувишинов, А. В. Бычков, О. В. Федяй,  
Р. Н. Пудовинников*

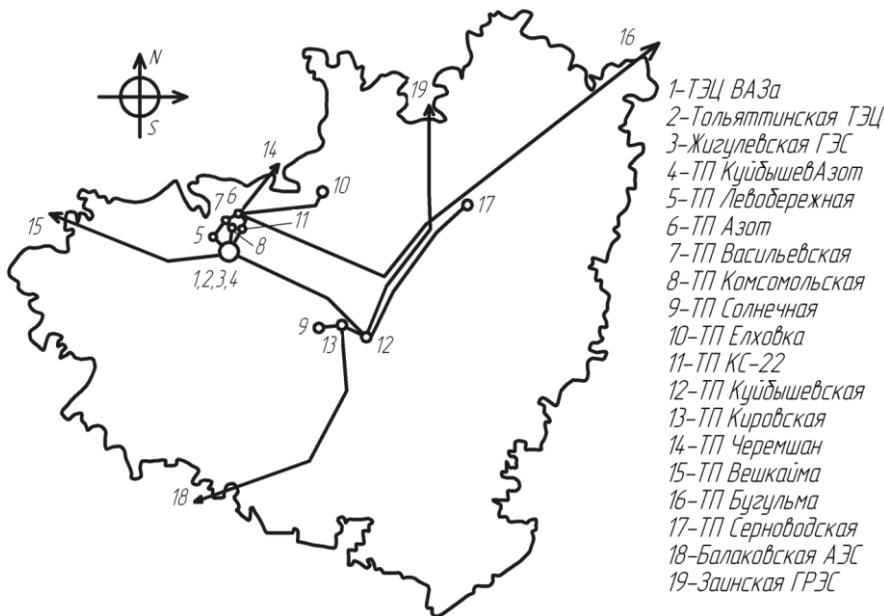
Тольяттинский государственный университет, Тольятти

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) характеризуются значительной сложностью структуры генерирующих мощностей и топологии основной электрической сети, многообразием режимов функционирования, необходимостью учета требований надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей и поэтому уязвимы к внешним возмущениям, в том числе и к воздействию геоиндуцированных токов (ГИТ) [1, 2]. Проведение натуральных экспериментов в масштабах ЭЭС практически невозможно. Альтернативным путем исследования режимов работы ЭЭС при воздействии ГИТ с величинами, характерными при геомагнитных бурях для регионов средних и высоких широт, служит математическое моделирование, например, в математической системе MATLAB в пакете Simulink.

Разработана модель и алгоритм расчета функционирования электроэнергетической системы любой конфигурации и сложности при геомагнитных бурях различной интенсивности и длительности. Расчеты реализованы в математической системе MATLAB в пакете Simulink. При создании модели электроэнергетической системы использованы как стандартные блоки Simulink и SimPowerSystems, так и блоки, разработанные авторами. Особенности разработанной расчетной модели электроэнергетической системы являются: привязка объектов к географическим координатам местности, что позволяет определять матрицу потенциалов геоэлектрического поля в узловых точках для расчета матрицы ГИТ в нейтральных и обмотках силовых трансформаторов и линиях электропередач; для определения мгновенных и действующих токов намагничивания силовые трансформаторы моделируются на основе применения Т-образной схемы замещения с нелинейной взаимной индуктивностью ветви намагничивания, которая является функцией от величины ГИТ. Приведены результаты моделирования воздействия геомагнитной бури различной интенсивности с направлением вектора напряженности геоэлектрического поля запад–восток для ЭЭС Самарского региона (рис. 1).

Разработанные методы расчета позволяют определять ГИТ в элементах ЭЭС с учетом их географического расположения на карте местности, моделировать процессы насыщения силовых трансформаторов при геомагнитных бурях и определять мгновенные и действующие значения токов намагничивания силовых трансформаторов, мгновенные значения полных токов и напряжений во всех элементах ЭЭС, а также выполнять гармонический анализ токов для оценки степени влияния ГИТ на режимы работы ЭЭС и опре-

деления безопасных значений ГИТ с точки зрения обеспечения требований надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей.



**Рис. 1.** Структурная схема модели ЭЭС Самарского региона.

### Литература

1. 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.
2. D.H. Boteler Assessment of geomagnetic hazard to power systems in Canada / D.H. Boteler // Natural Hazards. 2001. 23. P. 101–120.

## Влияние Эль-Ниньо на глобальную электрическую цепь

*Н. Н. Слюняев, Н. В. Ильин, Е. А. Мареев*  
Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) — одна из наиболее важных мод климатической изменчивости на Земле, состоящая в нерегулярном чередовании тёплой фазы (Эль-Ниньо) и холодной фазы (Ла-Нинья), во время которых изменяются структура циркуляции, распределение температуры и осадков в атмосфере.

В докладе отражены недавние результаты авторов, доказавшие наличие воздействия цикла ЭНЮК на фундаментальные параметры глобальной электрической цепи (ГЭЦ) в атмосфере и давшие возможность объяснить механизм такого воздействия. Моделирование многолетней динамики атмосферы с помощью модели WRF (Weather Research and Forecasting model) и данных реанализа метеорологических наблюдений позволило воспроизвести эволюцию ионосферного потенциала и обнаружить в динамике его значений и формы кривой его суточной вариации паттерны, однозначно связанные с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Моделирование показывает, что во время сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья форма кривой суточной вариации ГЭЦ деформируется противоположным образом. В частности, в интервале 8:00–14:00 UTC ионосферный потенциал, рассматриваемый относительно среднесуточного значения, как правило, выше обычного в годы Эль-Ниньо и ниже обычного в годы Ла-Нинья, в то время как в интервале 16:00–0:00 UTC обычно наблюдается обратный эффект. Наиболее значительные изменения кривой суточной вариации наблюдаются во время особенно сильных событий Эль-Ниньо (так называемых супер-Эль-Ниньо). Анализ долговременного ряда аномалий относительного ионосферного потенциала в различные часы показывает их статистически значимую корреляцию с индексами, характеризующими фазу и интенсивность ЭНЮК.

Анализ среднесуточных значений вычисленного ионосферного потенциала также показывает некоторую связь с ЭНЮК. Однако в данном случае суммарный эффект не слишком велик, будучи суммой двух сильных эффектов противоположного знака — положительного отклика со стороны вклада океана в ГЭЦ и отрицательного отклика со стороны вклада суши. Суммарный эффект выражен хуже, но остаётся положительным, так как суша и океан дают сравнимые вклады в ГЭЦ, но положительная чувствительность вклада океана к изменению индексов ЭНЮК выше по абсолютной величине, чем отрицательная чувствительность вклада суши.

Моделирование с использованием результатов реанализа данных метеорологических наблюдений позволило не только выявить эффекты воздействия ЭНЮК на ГЭЦ, но и объяснить их механизмы. Согласно результатам

расчётов, изменения структуры распределения конвекции во время событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья — в первую очередь над Тихим океаном, Южной Америкой и в районе Малайского архипелага — приводят к изменению вкладов этих регионов в ионосферный потенциал (выраженному в различной степени в зависимости от времени суток), что в конечном счёте и приводит к изменению как средних значений ионосферного потенциала, так и формы кривой его суточной вариации.

Сравнение с данными измерений градиента потенциала электрического поля в различных точках земной поверхности подтвердило предсказанные в моделировании эффекты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Нижегородской области в рамках проекта № 18-45-520010.

### **Литература**

1. *N.N. Slyunyaev, N.V. Ilin, E.A. Mareev, C.G. Price* A new link between El Niño — Southern Oscillation and atmospheric electricity // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16, № 4. P. 044025.
2. *N.N. Slyunyaev, N.V. Ilin, E.A. Mareev, C.G. Price* The global electric circuit land – ocean response to the El Niño — Southern Oscillation // *Atmos. Res.* 2021. V. 260. P. 105626.

## Глобальная климатология высоты конвективных облаков по спутниковым данным MODIS

*А. В. Чернокульский*<sup>1</sup>, *А. В. Елисеев*<sup>1,2</sup>, *А. Н. Плосков*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

Получены оценки высоты конвективных облаков  $h_{\text{conv}}$  в различных регионах Земли по спутниковым данным. Использованы 5-минутные данные спектрорадиометра MODIS на спутнике Terra (продукт MOD06\_L2, версия 6.1) о высоте, оптической толщине и фазовом составе облаков с километровым разрешением. Для определения принадлежности облаков к конвективному накладывались условия на минимальную оптическую плотность  $\tau$  ( $\tau \geq 23$ ) и обязательное наличие ледяной фазы.

Определены значения  $h_{\text{conv}}$  для января и июля за период 2002–2020. Получены оценки пространственного распределения  $h_{\text{conv}}$  для макрорегионов (тропики и внетропические широты, океан и суша, различные континенты) определены параметры распределения  $h_{\text{conv}}$  при разном пространственном и временном разрешении. Оценена чувствительность оценок  $h_{\text{conv}}$  и параметров распределений к исходным данным, в частности, к использованию информации об оптической толщине и высоте облаков, полученной с использованием различных спектральных каналов.

Полученные оценки распределений  $h_{\text{conv}}$  могут использоваться при моделировании молниевой активности в климатических моделях (например, [1, 2]).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-17-00012).

### Литература

1. *А.В. Елисеев, А.Н. Плосков, А.В. Чернокульский, И.И. Мохов* Связь частоты молний со статистическими характеристиками конвективной активности в атмосфере // Доклады академии наук. 2019. Т. 485, № 1. С. 722–727.
2. *А.В. Елисеев, И.И. Мохов, А.В. Чернокульский* Влияние молниевой активности и антропогенных факторов на крупномасштабные характеристики природных пожаров // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 1. С. 13–14.

## **Климатология мезомасштабных конвективных систем на Европейской территории России**

*А. В. Чернокульский<sup>1</sup>, М. А. Криницкий<sup>2</sup>, А. А. Спрыгин<sup>3</sup>, Е. А. Ерошкина<sup>4</sup>,  
М. В. Курганский<sup>1</sup>, А. Н. Шихов<sup>5</sup>, Ю. И. Ярынич<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

<sup>3</sup> Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск

<sup>4</sup> Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный

<sup>5</sup> Пермский государственный университет, Пермь

Наиболее опасные погодные явления конвективного характера (сильные ливни, смерчи, шквалы, град) в России связаны с мезомасштабными конвективными системами (МКС), в том числе с мезомасштабными конвективными комплексами и супер-ячейками. Однако, климатология подобных явлений в российских регионах изучена недостаточно.

В данной работе представлена новая климатология осесимметричных МКС на европейской территории России для 2010–2020 гг. Информация о прохождении МКС получена на основе разметки спутниковых данных Meteosat с выделением характерных сигнатур на верхней границе облачности внутри МКС и последующего обучения сверточной нейронной сети на основе этой выборки. По радарным данным для событий 2019–2020 гг. рассчитаны средние и максимальные значения радиолокационных характеристик МКС (радиолокационная отражаемость, высота верхней границы облаков, интенсивность осадков, вертикальная интегральная водность). Также получена статистика сопутствующих опасных погодных явлений, определены характерные значения индексов конвективной неустойчивости.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-77-10076).

## Феноменологическая модель формирования объемных электростатических зарядов в эруптивных облаках извержений вулкана Эбеко (о. Парамушир)

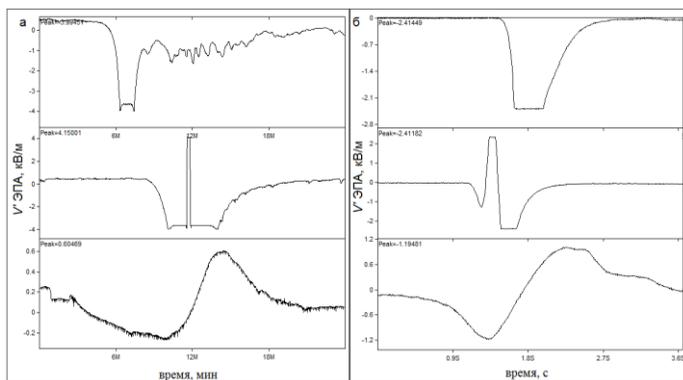
*Р. Р. Акбашев<sup>1,2</sup>, П. П. Фирстов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Камчатский филиал Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup> Камчатский государственный университет им. В. Беринга, Петропавловск-Камчатский

В период с 29.07.2020 г. по 05.08.2020 г. на склоне в. Эбеко (о. Парамушир) в непосредственной близости от кратера вулкана (3 и 4 км) работали временные пункты наблюдения (ПН) градиента потенциала электрического поля атмосферы  $V'$  ЭПА. Вместе со стационарным пунктом SKR (г. Северо-Курильск), расположенном в 7 км от кратера, они образовывали близкий к радиальному профиль относительно кратера вулкана. В качестве датчиков использовались электростатические флюксометры ЭФ-4 [1].

Из 27 зарегистрированных откликов  $V'$  ЭПА, когда эруптивное облако (ЭО) проходило через ПН, на основании формы записи четко выделяются три типа отклика (рис. 1а).



**Рис. 1.** Примеры зарегистрированных откликов  $V'$  ЭПА I тип, II тип, III тип: а — по данным натурных наблюдений; б — по данным физического моделирования.

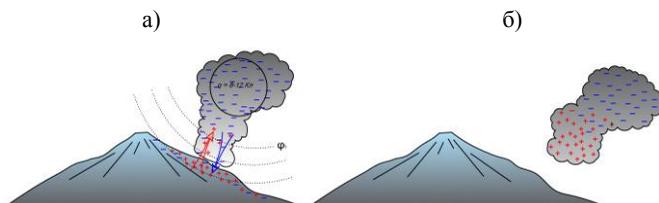
Проведенный анализ условий распространения ЭО позволил выявить взаимосвязь наблюдаемых откликов  $V'$  ЭПА с особенностями распространения ЭО. Показано, что важное значение в формировании объемных зарядов в ЭО оказывают условия распространения нижней области ЭО относительно поверхности склона вулкана.

С целью подтверждения природы зарегистрированных откликов, было проведено физическое моделирование. Для этих целей был отобран пепел со склона вулкана Эбеко и подготовлен экспериментальный стенд. Экспе-

риментальный стенд позволил смоделировать пепловое облако и задавать его направление и скорость распространения относительно поверхности земли, Устройство экспериментального стенда выполнено таким образом, чтобы заряджение пепла происходило за счет трибоэлектрического эффекта. Процесс формирования объемных зарядов регистрируемого ЭО контролировался двумя электростатическими датчиками ЭФ-4.

В эксперименте моделировались ЭО, с условиями распространения близкими к натурным. Были получены отклики  $V'$  ЭПА по форме подобные откликам  $V'$  ЭПА зарегистрированные при натурных наблюдениях (рис. 1б).

На основании результатов натурных наблюдений  $V'$  ЭПА и физического моделирования авторами предложена феноменологическая модель формирования объемных электростатических зарядов в ЭО. Согласно которой в момент взаимодействия нижней области ЭО с поверхностью склона вулкана происходит перераспределение зарядов (рис. 2). Перераспределение зарядов, по всей видимости, в какой-то степени контролируется эффектом наведенной электростатической индукции на поверхность склона вулкана от основного заряда ЭО, который локализован в верхней области ЭО (рис. 2а). Процесс продолжается до момента, когда возникает компенсация объемных зарядов между нижней и верхней областями ЭО, и/или до момента отрыва нижней области ЭО от поверхности (рис. 2б).



**Рис. 2.** Феноменологическая модель формирования объемных зарядов в ЭО.

$q$  — заряд ЭО, на момент когда оно достигло максимального подъема;

$\phi$  — потенциал электрического поля, которое генерируется основным объемным электростатическим зарядом ЭО.

Предложенная модель дополняет известные процессы формирования объемных зарядов в ЭО [2].

### Литература

1. В.А. Ефимов, Д.М. Орешкин, П.П. Фирстов, Р.Р. Акбашев Применение электростатического флюксметра ЭФ-4 для исследований геодинамических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 4. С. 35–46.
2. S.J. Lane, J.S. Gilbert., A.J. Kemp Electrical and chemical properties of eruption plumes at Sakurajima volcano, Japan // Bull. in 8th Report of Geophysical and Geochemical Observations at Sakurajima Volcano — Obs., Kyoto Univ., Kyoto, Japan. 1995. P. 105–127.

## О связи интенсивности тропических ураганов с грозовой активностью. Взгляд из космоса

*В. В. Хегай<sup>1</sup>, А. В. Карелин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, Троицк

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев

Проанализирована возможность оценки скорости ионизации атмосферы в тропических ураганах (ТЦ) с помощью детекторов молний из космоса. Установлено, что совместный анализ временной динамики грозовой активности и темпа нарастания скорости ТЦ за первые несколько суток позволит оценить перспективы развития ТЦ с использованием фундаментального уравнения для тангенциальной составляющей скорости тропических ураганов и временной развертки скорости ионизации атмосферы [1, 2]:

$$\frac{dV}{dt} = \left( A_c(T_g) U_{cd}(T_g) \sqrt{\frac{v_i(t) N}{\beta_{ii}}} + (A_{ass}(T_g) - A_{diss}(T_g)) U_{dd}(T_g) N_n(t) \right) \frac{v}{p} - \frac{\kappa v^2}{h},$$

и

$$f(t) = f_0 \sin^2(\omega t) + f_1 \exp(-\alpha t) \sin^2(\omega t).$$

Состояние океана и атмосферы (температура, влажность, насыщенность центрами конденсации) в областях возникновения и распространения ТЦ можно установить с помощью космического мониторинга микроволновыми зондировщиками и детекторами молний, расположенными на спутниках геостационарной и атмосферной орбитальных группировок [3]. Перспективы возникновения и развития ТЦ можно оценить с использованием систем глобального космического мониторинга.

### Литература

1. *A.V. Karelin* Dynamics of tropical hurricanes and cyclones // *Physics of wave phenomena*. 2006. Vol. 14. № 4. P. 44–51.
2. *К.А. Боярчук, А.В. Карелин, Р. В. Широков* Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. — Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. — 204 с.
3. *А.В. Карелин, Е.М. Твердохлебова, В.А. Шувалов, А.А. Яковлев* Целевая аппаратура перспективной гидрометеорологической и геофизической орбитальной группировки // *Труды ВНИИЭМ. Вопросы электромеханики*. 2020. Т. 175. № 2. С. 8–13.



## **ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

## В поисках электрической моды УНЧ диапазона в атмосфере

*В. А. Пилипенко<sup>1,2</sup>, Е. Н. Федоров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>2</sup> Геофизический Центр РАН, Москва

Вариации вертикального атмосферного электрического поля  $E_z$  в основном связаны с метеорологическими процессами. С другой стороны, теория электромагнитных волн в атмосферном волноводе между нижней ионосферой и поверхностью Земли предсказывает возможность существования двух мод — магнитной  $H$  (TE) и электрической  $E$  (TH). При этом  $E$ -мода несет вертикальную составляющую электрического поля  $E_z$ . Предыдущие попытки найти проявления УНЧ возмущений (периоды от секунд до десятков минут) в  $E_z$  дали противоречивые результаты. На идее о существовании  $E$ -моды был построен новый метод магнитотеллурического зондирования — дирекционный анализ. Таким образом, давняя проблема связи между атмосферным электричеством и возмущениями космической погоды в УНЧ диапазоне оставалась нерешенной. Мы построили модель электромагнитного УНЧ отклика на осциллирующий продольный магнитосферный ток, падающий на реалистичную ионосферу и атмосферу. Модель основана на численном решении полной системы волновых уравнений в атмосфере — ионосфере с использованием модели IRI. Мы рассчитали вертикальное и горизонтальное распределения магнитного и электрического полей как  $H$ -, так и  $E$ -моды, возбуждаемых продольными токами из магнитосферы. Модель предсказывает, что эффективность возбуждения  $E$ -моды магнитосферными возмущениями мала, и только слабый отклик  $E_z \sim$  нескольких В/м может сопровождать интенсивные геомагнитные возмущения с амплитудой 100 нТл. Однако на высотах  $\sim 30$  км электрическое поле  $E$ -моды становится доминирующим. Мы проанализировали результаты ранних измерений в Антарктиде электрического поля на воздушном шаре и вариаций геомагнитного поля. Прогнозируемые амплитуды порядка десятков мВ/м горизонтального электрического поля в атмосфере, вызванного пульсациями Pc5 и конвективными вихрями (TCV), хорошо согласуются с данными скоординированных наблюдений электрического поля на воздушном шаре и геомагнитного поля. Перенос импульсов внезапного начала бури (SSC) на более низкие широты часто интерпретируется как возбуждение электрической моды TH0, мгновенно распространяющейся по волноводу ионосфера – земля. Согласно проведенным теоретическим расчетам даже слабое магнитное возмущение  $E$ -моды  $\sim 1$  нТл должно сопровождаться всплеском  $E_z$  значительно превышающим градиент атмосферного потенциала. Анализ прямых наблюдений вариаций вертикального атмосферного поля  $E_z$  не поддерживает гипотезу о SSC как электрической моде.

## Оценка высоты и направленности вспышек гамма-излучения, зарегистрированных над областями с повышенной грозовой активностью

*В. В. Сурков*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

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

Направленные вверх в сторону ионосферы вспышки гамма-излучения получили название TGF (terrestrial gamma-ray flash). С момента своего открытия в 1994 г. [1] эти вспышки многократно регистрировались на низкоорбитальных спутниках над активными грозовыми образованиями. Для TGF характерны малая по сравнению с космическими гамма-всплесками длительность вспышки  $\sim 1$  мс, флюенсе на орбите спутника  $\sim 0.1$ – $1$  фотон/см<sup>2</sup> и жёсткий спектр квантов от 25 кэВ до 20 МэВ, который можно объяснить тормозным излучением релятивистских электронов.

Вопрос о возможной высоте источников TGF и об угловом распределении гамма-квантов, которые регистрируются на спутнике, обычно исследуется с помощью моделирования методом Монте Карло и другими численными методами, не позволяющими получить аналитические зависимости между параметрами задачи [2]. В данной работе применяются аналитические исследования, основанные на предположении о том, что распределение гамма-квантов по энергиям определяется спектром тормозного излучения релятивистских электронов. Кроме того, в модели учитывается зависимость пробега квантов в воздухе от их энергии и высоты в атмосфере. Полученные в работе формулы позволяют найти плотность потока гамма квантов на высоте орбиты спутника в зависимости от высоты источника, числа испущенных им гамма-квантов и других параметров. Из анализа формул следует, что интенсивность испускания квантов уменьшается при увеличении зенитного угла. Оценки, основанные на этих формулах и данных спутниковых измерений, показывают, что наиболее вероятное расположение источника TGF находится на высоте около 12 км, а его излучение направлено, в основном, в вертикальный конус с углом полураствора около 40° или даже меньше. Эти величины согласуются с результатами моделирования, полученными другими авторами методом Монте Карло.

### Литература

1. *G.L. Fishman et al.* Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // *Science*. 1994. V. 264. No. 5163. 1313–1316.
2. *B.E. Carlson, N.G. Lehtinen, U.S. Inan* Terrestrial gamma ray flash production by lightning current pulses // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. No. A12. A00E08.

## Регистрация свистящих атмосфериков в Якутске (AWDANET)

*Р. Р. Каримов<sup>1</sup>, Я. Лихтенбергер<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт космофизических исследований и аэронауки СО РАН, Якутск

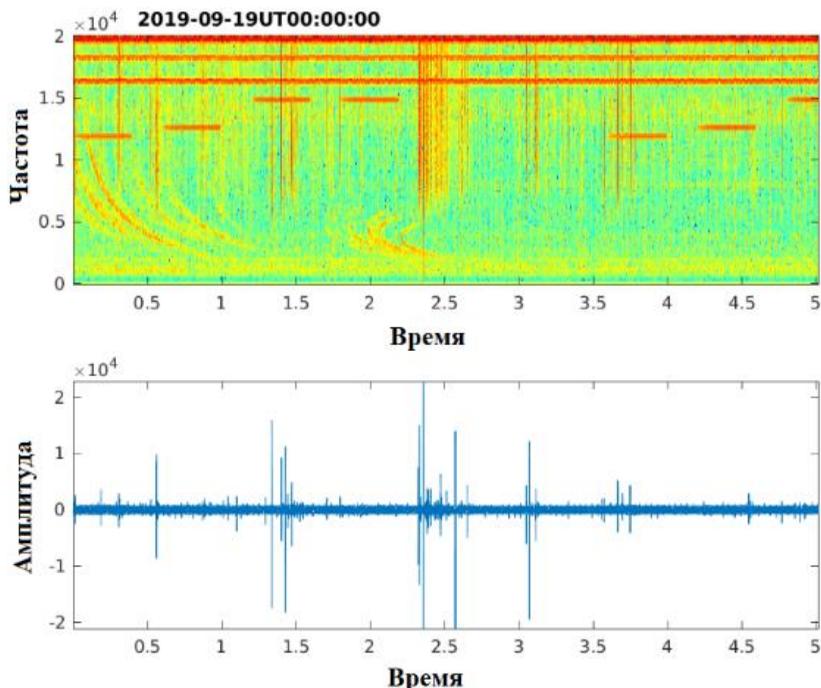
<sup>2</sup> Университет имени Лоранда Этвёша, Будапешт

Исследования свистящих атмосфериков, источником которых являются грозовые разряды, актуально, так как при распространении вдоль силовых линий магнитосферы они несут в себе информации о свойствах магнитосферной плазмы. Одновременные наземные и спутниковые измерения свистящих атмосфериков позволяют в комплексе исследовать свойства магнитосферой плазмы.

Сеть автоматического обнаружения и анализа вистлеров (AWDANet) была основана в 2002 году и постепенно расширилась до глобальной сети [1]. В настоящее время работает 28 станций, 15 из которых полностью оснащены системой автоматической инверсии в реальном времени. AWDANet был значительно модернизирован в рамках проекта PLASMON EU FP7-Space в 2011–2014 гг. [2] с установкой 3 новых площадок, одна из которых находится на Камчатке (ИКФ ДВО РАН). В рамках проекта была разработана процедура автоматической инверсии [3]. Алгоритм, реализованный в AWDANet, был подвергнут калибровке и проверен с помощью измерений электронной плотности на спутниках Cluster и Van Allen Probes в проекте ESA-PECS в период 2015–2017 гг. В рамках российско-венгерских космических исследованиях динамики магнитосферной плазмы, наземная глобальная система AWDANet является инструментом для поддержки проводимых в настоящее время и планируемых космических исследований с помощью спутников «Фазы-2», «Трабант», «Chibis-AI», «Обстановка» и др.

В 2018 году на радиофизическом полигоне лаборатории радиоизлучений ионосферы и магнитосферы «Ойбенкель» ИКФИА СО РАН был установлен пункт сети AWDANet. Радиофизический полигон находится в 25 км от Якутска вдали от промышленных помех, что позволяет регистрировать радиоизлучение в ОНЧ-диапазоне естественного и техногенного происхождения. В конце 2019 года было дополнительно установлено оборудования для хранения и анализа данных регистрации свистящих атмосфериков на сервере ИКФИА СО РАН. За период 2018–2021 гг. пополняется база данных по ОНЧ-излучению до 20 кГц, зарегистрированного с помощью приемно-регистрирующего комплекса пункта AWDANet, на сервере ИКФИА СО РАН в непрерывном режиме. Автоматический алгоритм анализа каждого свистящего атмосферика позволяет определять такие основные параметры магнитосферной плазмы, как электронная концентрация в экваториальной области и величину соответствующей L-оболочки. Данные ежечасно выставляются на Web-ресурсе (<https://ikfia.ysn.ru/data/rim/awdnanet>) ИКФИА

СО РАН по интернет-каналу из радиофизического полигона «Ойбенкель». На рисунке 1 представлен пример динамического спектра в КНЧ–ОНЧ диапазоне до 20 кГц, зарегистрированные 19 сентября 2019 г.



**Рис. 1.** Свистящие атмосферерики в динамическом спектре в КНЧ–ОНЧ диапазоне до 20 кГц, зарегистрированные 19 сентября 2019 г. на радиофизическом полигоне «Ойбенкель» ИКФИА СО РАН.

Регистрации свистящих атмосферерики в Якутске является важным шагом для расширения глобальной сети AWDANet, так как глобальная сеть имеет долготный разрыв между пунктами наблюдений в северном полушарии.

### Литература

1. *J. Lichtenberger, C. Ferencz, L. Bodnár, D. Hamar, P. Steinbach* Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector // JGR, V. 113, A12201, 2008
2. *J. Lichtenberger, M. Clilverd, B. Heilig, M. Vellante, J. Manninen, C. Rodger, A. Collier, A. Jorgensen, J. Reda, R. Holzworth, R. Friedel, M. Simon-Wedlund* The plasmasphere during a space weather event: First results from the PLASMON // J. Space Weather Space Climate, 3 (A3), 2013
3. *J. Lichtenberger* A new whistler inversion method // JGR, V. 114, A07222, 2009.

## Геофизические и астрофизические процессы в электромагнитном поле Земли инфранизкочастотного диапазона

*Л. В. Грунская*<sup>1</sup>, *В. В. Исакевич*<sup>2</sup>, *Д. В. Исакевич*<sup>2</sup>, *А. Н. Золотов*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Владимирский государственный университет имени А.Г. Столетова и  
Н.Г. Столетова, Владимир

<sup>2</sup> ООО «Бизнессофтсервис», Владимир

Исследования, проводимые на физическом экспериментальном полигоне Владимирского государственного университета с 1972 года направлены на изучение взаимосвязи электромагнитного поля Земли инфранизкочастотного (ИНЧ) диапазона с приливными процессами геофизического (лунно-солнечные) и астрофизического (гравитационно-волновое воздействие, порождаемое двойными звездными системами (ДЗС)) характера, также с процессами подготовки крупных сейсмических событий.

Приливные воздействия не являются чисто гармоническими и анализ их с помощью быстрого преобразования Фурье не позволил осуществить достоверного обнаружения их воздействия. В результате исследований был разработан метод «Айгеноскопии» [1], позволяющий анализировать процессы сложнопериодические, энергетически недоминирующие. С помощью данного метода были выявлены периоды в электрическом и геомагнитном полях, соответствующие лунным приливам [2].

Одно из направлений исследований связано с поиском взаимодействий между электромагнитным полем Земли и гравитационно-волновыми астрофизическими процессами в природе. В работах Гинзбурга и Зельдовича была разработана теория взаимосвязи между гравитационными и электромагнитными полями ИНЧ [3, 4]. На сегодня с помощью метода «Айгеноскопии» удалось достоверно обнаружить в электрическом и геомагнитном полях приземного слоя атмосферы сигналы на гравитационно-волновых частотах 43-х ДЗС [5, 6].

Созданы каталоги обнаруженных видов предвестниковых аномалий в электрическом и геомагнитном поле приземного слоя атмосферы. С помощью Айгеноскопии удалось разработать методику обнаружения предвестниковых аномалий крупных сейсмических событий [7].

### Литература

1. *В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич, Л.В. Грунская* Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Полезная модель РФ № 116242RU. Приоритет от 30 сентября 2011 года.
2. *Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Исакевич, Д.В. Рубай, А.Н. Золотов* Исследование воздействия лунных приливов на электромагнитное поле пограничного слоя атмосферы с помощью метода собственных векторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 4. С. 65–70.

3. *В.Л. Гинзбург, В.Н. Цитович* Переходное излучение и переходное рассеяние. — М.: Наука, 1984. 360 с.
4. *Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков* Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
5. *L.V. Grunskaya1, V.V. Isakevich, D. V. Isakevich* Anomalous Behavior of the Terrestrial Electric Field Intensity at Multiple Frequencies of Relativistic Binary Star Systems // *Gravitation and Cosmology*. 2018. Vol. 24. No.4. pp.384–392.
6. *L.V. Grunskaya1, V.V. Isakevich, D.V. Isakevich* Study of the Impact of Relativistic Double Star Systems on the Earth's Electric Field // *Russian Physics Journal*. 2019. V.62. №1. p. 55–61.
7. *П.П. Фирстов, Д.В. Исакевич, В.В. Исакевич, Д.И. Будилов, Е.О. Макаров, Л.В. Грунская* Выделение методом айгеноскопии предвестниковых аномалий Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. с  $m_w=7.2$  и глубиной очага 171 км (Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2017. № 4(20). С. 109–120.



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

## Первые результаты мониторинга свечения атмосферы Земли телескопом «УФ атмосфера» с борта МКС

*П. А. Климов*

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

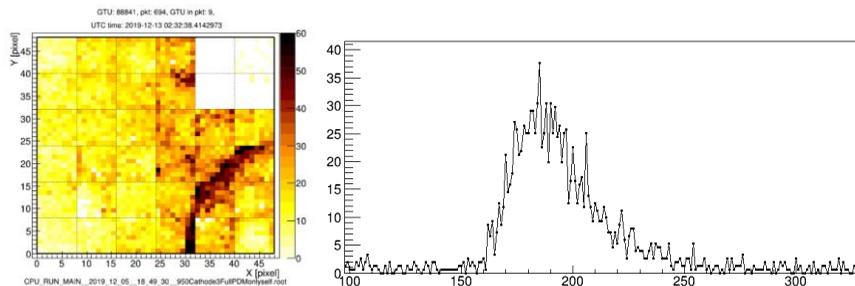
В 2019 году на борт международной космической станции был доставлен детектор «УФ атмосфера» (Mini-EUSO). Научная аппаратура представляет собой широкоугольный линзовый телескоп с высоким временным разрешением (2.5 мкс). Поле зрения прибора составляет  $\pm 20^\circ$ . Диапазон длин волн измерения — 300–400 нм. Оптическая схема представляет собой двухлинзовую систему с эффективным фокусным расстоянием 25 см. Используются линзы Френеля, изготовленные из УФ прозрачного пластика ПММА. Матрица фотоприемника представлена 36-ю многоанодными фотоэлектронными умножителями. Всего в матрице 2304 регистрирующих канала, которые работают в режиме счета фотонов. Пространственное разрешение на поверхности Земли составляет порядка 5 км. В детекторе реализована трехуровневая триггерная система, позволяющая параллельно записывать до 4-х событий с временным разрешением 2.5 мкс и 320 мкс в течение каждого 5-ти секунд наблюдений, а также вести непрерывную запись в режиме мониторинга с разрешением 40 мс. Подробное описание аппаратуры, наземного тестирования и устройства программного обеспечения приведено в [1–3].

За два года работы на борту проведен 41 сеанс эксперимента, в ходе которого аппаратура устанавливалась на иллюминатор №9 Служебного модуля Российского сегмента МКС в направлении в нади́р. Длительность сеанса около 10 часов. Первые результаты эксперимента опубликованы в работе [4]. Проведены измерения УФ свечения в разных областях грозовой и антропогенной активности, над океанами и над сушей. Для каждого ночного витка формируются карты свечения, на которых хорошо видны облачный покров и антропогенное свечение. Регистрируются антропогенные вспышечные явления, среди которых наблюдается класс событий, коррелирующих с положением аэропортов.

Ярким примером регистрации высоко атмосферных транзитных явлений (ТАЯ) грозовой природы являются события типа ELVE (ELVES — Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources). Этот вид ТАЯ является наиболее частым (80% от общего числа транзитов в верхней атмосфере) и легко распознается по пространственно-временной структуре сигнала (расширяющиеся на релятивистской скорости кольцо или кольца). Регистрация многократных эльфов (два и более колец) представляет особый интерес, поскольку источником этих событий может быть компактный внутрияоблачный разряд. Длительность разви-

тия события типа ELVE не превышает 1 мс, поэтому, измерения в режиме с временным разрешением 2,5 мкс оптимальны для регистрации и исследования пространственно-временной структуры этих явлений. В результате первичного анализа данных было отобрано 17 таких событий. Пример приведен на рис. 1, слева.

Интересно отметить, что иногда происходит регистрация вспышек вдали от грозовых областей и антропогенных источников. Длительность сигнала составляет порядка 100–200 мкс, а пространственная форма говорит о локализации объекта в одном или нескольких соседних пикселях. Пример временного профиля такого события приведен на рис. 1, справа.



**Рис. 1.** Слева: транзитное явление типа ELVE, зарегистрированное 05.12.2019. Справа: осциллограмма самого яркого канала необычного внегрозового события, зарегистрированного 31.03.2020 в 18:32 UTC.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке ГК Роскосмос и при участии коллаборации JEM-EUSO. Текст подготовлен по материалам исследований, выполненных в КЭ «УФ атмосфера» на российском сегменте МКС.

### Литература

1. *F. Capel, A. Belov, M. Casolino, P. Klimov* Mini-EUSO: A high resolution detector for the study of terrestrial and cosmic UC emission from the international space station // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62, № 10. P. 2954–2965.
2. *A. Belov, M. Bertaina, F. Capel et al.* The integration and testing of the Mini-EUSO multi-level trigger system // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62, № 10. P. 2966–2976.
3. *F. Capel, A. Belov, G. Cambiè et al.* Mini-EUSO data acquisition and control software // *Journal of astronomical telescopes, instruments and systems*. 2019. V. 5, № 4. P. 1–10.
4. *S. Bacholle, P. Barrillon, M. Battisti et al.* Mini-EUSO mission to study earth UV emissions on board the ISS // *Astrophysical Journal, Supplement Series*. 2021. V. 253, № 2. P. 36.

## **Первый опыт мониторинга высыпаний электронов и высотных электрических разрядов с помощью мульти-спутниковой группировки Московского университета**

*С. И. Свертилов, В. В. Богомолов, Ю. К. Зайко, А. Ф. Июдин, В. В. Калегаев, П. А. Климов, О. Ю. Перетягко, В. Л. Петров, В. И. Оседло, И. В. Яшин*  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

В рамках проекта Московского университета «Универсат-СОКРАТ» [1] осуществлен запуск нескольких малых космических аппаратов класса кубсат, на которых установлена научная аппаратура, предназначенная для мониторинга космической радиации, а также ультрафиолетового свечения атмосферы Земли. На этих спутниках установлены универсальные детекторы космической радиации ДеКор и ультрафиолетовым фотометры типа АУРА [2].

Мульти-спутниковая группировка, позволяющая проводить одновременные измерения потоков частиц и квантов с помощью однотипной аппаратуры в разных точках околоземного пространства, дает информацию о динамике потоков электронов суб-релятивистских энергий в околоземном пространстве. В этом плане особо следует отметить возможность исследования высыпаний электронов из радиационных поясов. Высыпающиеся электроны могут вносить достаточно большой электрический заряд в верхнюю атмосферу Земли и тем самым влиять на формирование глобальной электрической цепи.

Измерения с помощью аппаратуры типа АУРА показали свою надежность и работоспособность в условиях сильно переменной интенсивности свечения атмосферы, удалось зарегистрировать слабое свечение ночной атмосферы. С помощью аппаратуры подобного типа также можно регистрировать связанные с высотными электромагнитными разрядами всплески ультрафиолетового излучения и тем самым исследовать вклад высотных разрядов в формирование глобальной электрической цепи.

### **Литература**

1. *В.А. Садовничий и др.* Мониторинг природных и техногенных космических угроз: результаты миссии ЛОМОНОСОВ и проект Универсат-СОКРАТ // Космические исслед. 2019. Т.57, №1. С.46–56.
2. *В.В. Богомолов и др.* Первый опыт мониторинга космической радиации в мульти-спутниковом эксперименте Московского университета в рамках проекта «Универсат-СОКРАТ» // Вестник Московского ун-та. Сер. 3. Физика, астрономия. 2020. Т. 75, №6. С. 135–141.

## **Подготовка стратосферного эксперимента по измерению космической радиации**

*В. Л. Петров<sup>1</sup>, С. А. Филиппчев<sup>1</sup>, С. Е. Коченасов<sup>1</sup>, Д. Г. Аксельрод<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> НИИЯФ МГУ, Москва

<sup>2</sup> Факультет космических исследований МГУ, Москва

В НИИЯФ МГУ разрабатывается линейка перспективных малогабаритных полупроводниковых спектрометров заряженных частиц средних энергий (кремниевых телескопов) для экспериментов на борту наноспутников типа CubeSat (кубсатов).

В рамках наземной отработки первого изделия была проведена его адаптация к спутниковой платформе StratoSat формата CubeSat 1U для запуска на стратосферном зонде. Запуск был проведён 26 июня 2021 года в Подмоскowie, в рамках проекта «Стратонавтика» запусков школьных стратосферных миссий. Пуск был выполнен успешно, аппарат найден и эвакуирован, полезная нагрузка отработала штатно.

В докладе представляются результаты работы по подготовке и адаптации прибора, проведению эксперимента и обработке данных, а также планы по дальнейшей доработке устройств.

Проведённый эксперимент показал возможность использования приборов линейки в качестве основной или дополнительной нагрузки для стратосферных геофизических зондов.

## **Совместная экспериментальная кампания по измерению высотных профилей электрических параметров атмосферы: первые результаты**

*Н. В. Ильин<sup>1</sup>, Е. А. Мареев<sup>1</sup>, К. А. Николь<sup>2</sup>, Р. Дж. Харрисон<sup>2</sup>, К. Г. Прайс<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup> ФИЦ Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород, Россия

<sup>2</sup> Университет Рединга, Рединг, Великобритания

<sup>3</sup> Университет Тель-Авива, Тель-Авив, Израиль

Одним из ключевых параметров глобальной электрической цепи является ионосферный потенциал, значение которого определяется распределением источников и динамикой проводимости всей атмосферы.

Ионосферный потенциал — разность электрических потенциалов между ионосферой и поверхностью Земли — уникальный геофизический индекс, имеющий одно и то же значение при измерениях в любой точке Земли. Сложность измерения ионосферного потенциала связана с необходимостью измерения высотного профиля электрического поля атмосферы от поверхности до верхних слоёв тропосферы. Один из возможных способов измерения профилей — использование метеозондов с помощью специальных датчиков, пригодных для использования на метеозондах.

Летом 2021 года стартовала совместная с Университетом Рединга (г. Рединг, Великобритания) экспериментальная кампания по измерению высотных профилей электрических параметров атмосферы. Проведено несколько одновременных тестовых запусков метеозондов с измерителями ионизации.

В данном докладе представлены первые результаты измерений профиля ионизации. Уникальность данных экспериментов заключается в том, что впервые профиль ионизации атмосферы в разных точках Земли промерен одновременно и на абсолютно одинаковом оборудовании, что позволяет избавиться от ошибок неоднородности датчиков и системы телеметрии.

### **Благодарности**

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории электромагнитного окружения Земли за помощь в организации эксперимента в частности: А.А. Евтушенко, Ф.Г. Сарафанову, Ф.А. Кутерину, П.А. Микрюкову. Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ (Соглашение № 075-15-2019-1892).

## Универсальный критерий хорошей погоды в приземных измерениях электростатического поля атмосферы

*Ф. Г. Сарафанов, Н. В. Ильин, М. В. Шаталина*  
Институт прикладной физики РАН, Н.Новгород

Современные исследования атмосферного электричества базируются на теории глобальной электрической цепи (ГЭЦ), в рамках которой атмосфера моделируется замкнутым распределённым электрическим контуром. Ключевым параметром в теории ГЭЦ является ионосферный потенциал (ИП), значение которого определяется распределением во времени суток и пространстве активности грозových центров [1, 2].

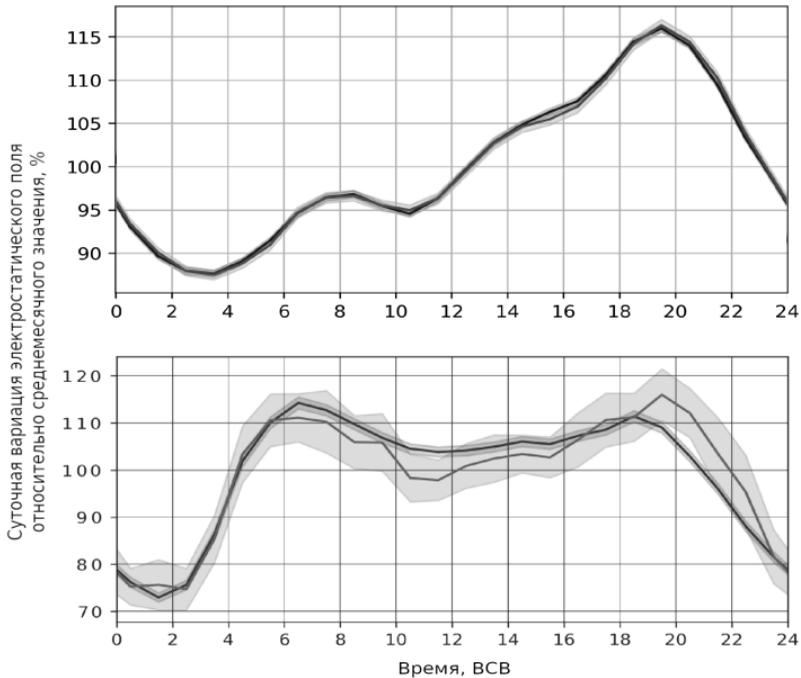
Для экспериментального изучения ионосферного потенциала широко применяются методы приземного измерения вертикальной компоненты квазистатического электрического поля атмосферы. Длинные ряды таких измерений неизбежно включают в себя ряд локальных изменений поля.

Существуют разные подходы к определению критериев хорошей погоды, пригодной для наблюдений ИП. Например, в [1] предполагается отсутствие осадков, тумана, дымки, ветер скоростью не более 4 м/с и облачность в пределах 5 баллов. В работе [3] используются и другие метеорологические параметры, но также ограничивается скорость ветра. В антарктических измерениях [4] отбрасываются все 5-минутные интервалы, включающие скачкообразные изменения поля выше пороговых значений, а метеорологические критерии не используются.

В данной работе предлагается новый универсальный критерий, не требующий знания метеорологической обстановки и состояния атмосферы во время измерений. Он основан на том, что суточная вариация ИП относительно среднего значения составляет порядка 50%, соответственно приземное поле от 110 В/м до 160 В/м [3, 4]. Наличие локальных эффектов приводит к изменениям проводимости в вертикальном столбе атмосферы над измеряющим прибором, разброс измеряемых значений становится больше и измеряемое поле приобретает случайные искажения. Экспериментальные исследования позволили оценить предельные значения параметров, определяющих поле хорошей погоды: разброс среднечасовых измерений электрического поля относительно среднесуточного значения не выше  $\eta = 150\%$ , а в абсолютных значениях не выше порога  $v_b = 1000$  В/м и не ниже  $v_n = 0$  В/м.

С помощью такого критерия были проанализированы экспериментальные данные из двух пунктов наблюдения: на антарктической станции Восток (2005–2020) и в ИПФ РАН (2012–2020), Нижний Новгород. Усреднённые по временному ряду суточные вариации поля, полученные с помощью нового критерия, в обоих случаях показывают хорошее соответствие (рис. 1, серые линии) с аналогичными вариациями (рис. 1, черные линии), полученными с помощью метеорологических критериев: ветер меньше 5 м/с, общая

облачность меньше 25%, отсутствие осадков и метеособытий при измерениях.



**Рис. 1.** Суточная вариация измеряемого электрического поля на станции Восток (сверху) и в Нижнем Новгороде (внизу).

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ (Соглашение № 075-15-2019-1892).

### Литература

1. *С.В. Анисимов, К.В. Афиногенов, Н.М. Шихова* Динамика электричества невозмущённой атмосферы средних широт: от наблюдений к скейлингу // Известия вузов. Радиофизика. 2013. № 11–12. С. 787–802.
2. *E. Williams, E. Mareev* Recent progress on the global electrical circuit // Atmos. Res. 2014. V. 135–136. P. 208–227.
3. *R.G. Harrison, K.A. Nicoll* Fair-weather criteria for atmospheric electricity measurements // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 179. P. 239–250.
4. *G.B. Burns, A.V. Frank-Kamenetsky, B.A. Tinsley, W.J.R. French, P. Grigioni, G. Camporeale, E.A. Bering* Atmospheric Global Circuit Variations from Vostok and Concordia Electric Field Measurements // Journal of the Atmospheric Sciences. 2017. V. 74. № 3. С. 783–800.

## Спектральный состав вариаций атмосферного электрического поля на ст. Восток в Антарктиде

*А. В. Франк-Каменецкий*

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета,  
Санкт-Петербург

В работе приведены результаты совместного анализа спектрального состава вариаций атмосферного электрического поля, приземной температуры и РС индекса. Показано, что в вариациях атмосферного электрического поля присутствуют гармоники, связанные как с атмосферными процессами (ВГВ, планетарные волны), так и с внешним источником (РС индекс)

Короткопериодные колебания в летний период (с периодом  $T < 3$  мин.) обусловлены турбулентными процессами в атмосфере, возникающими в результате конвекции в приземном слое из-за разницы температуры воздуха и подстилающей поверхности. Наличие этих короткопериодных колебаний в атмосферном электрическом поле на ст. Восток свидетельствует о существовании зарядов у поверхности, несмотря на отсутствие радона, так как ст. Восток находится на ледниковом щите мощностью более 3.5 км, а источник радона может быть только в твердой Земле.

Более медленные колебания с периодами  $T > 3$  мин. могут быть вызваны как внутренними гравитационными волнами, распространяющимися в атмосфере до высот нижней ионосферы, так и периодически меняющимся потенциалом ионосферы, возникающим в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Подобные волны наблюдаются как в солнечном ветре, так и в данных наземных магнитных и метеорологических наблюдений.

Для медленных вариаций ( $T > 1$  суток) рассчитаны спектры мощности среднесуточных значений электрического поля ( $E_z$ ), атмосферного давления ( $P$ ), приземной температуры ( $T_{гр}$ ), РС и Кр-индексов отдельно для периода минимума (2008–2009 гг.) и для максимума (2011–2012 гг.) солнечной активности. Показано, что все рассматриваемые параметры имеют общий период 26–30 суток, причем в годы спокойного Солнца (2008–2009 гг.) этот период равен 27 суткам, а в 2011–2012 гг. он увеличился до 30 суток. Кроме того, в 2011–2012 гг. в электрическом поле и индексах магнитной активности наблюдаются вариации с периодом около 14 суток.

## **Наблюдения за атмосферным электрическим полем в приземном слое и грозовой активностью на Северном Кавказе**

*А. Х. Аджиев<sup>1</sup>, Г. В. Куповых<sup>2</sup>, З. М. Керефова<sup>1</sup>, Н. В. Юрченко<sup>1</sup>,  
И. А. Муратов<sup>1</sup>, С. Т. Казакова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

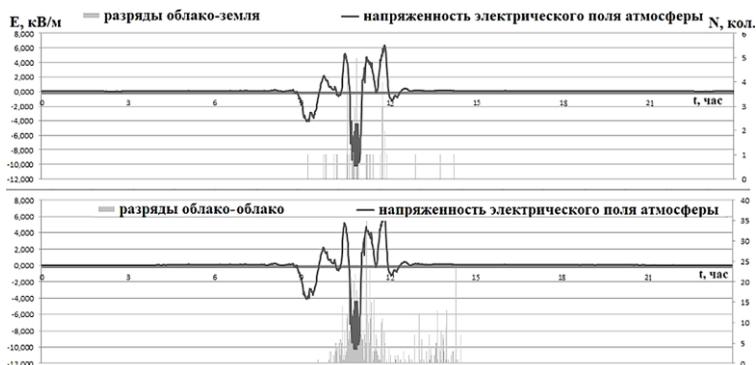
Для проведения комплексных синхронных измерений молниевых разрядов различных типов (облачных, наземных положительных и наземных отрицательных) и временного хода напряженности электрического поля приземной атмосферы были использованы аппаратно-программные комплексы ФГБУ «ВГИ», включающие грозорегистратор LS8000 и измерители напряженности электрического поля атмосферы EFM550 (АПК) [1, 2].

Грозопеленгационная сеть LS8000, установленная на Северном Кавказе в 2008 году, состоит из шести грозопеленгаторов и центрального пункта приема и обработки информации. Каждый грозопеленгатор имеет по два датчика — низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). Для молниевых разрядов «облако–земля» радиус области обзора составляет 625 км от центров сети, а разрядов «облако–облако» 325 км. Зона обзора системы перекрывает территории юга европейской части России и республик Закавказья. По данным, полученным с LF и VHF датчиков, центральные процессоры (CP8000), расположенные в центре приема и обработки информации, формируют до 25 параметров по каждому молниевому разряду.

В частности, для молниевых разрядов «облако–земля»: дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд; координаты разряда; сила и полярность тока в канале разряда; классификация разрядов на положительные и отрицательные; время роста сигнала до пикового значения; время спада сигнала от пикового значения до нуля и др. Для молниевых разрядов «облако–облако»: дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд и координаты разряда.

Объектом исследования также является напряженность электрического поля приземной атмосферы [3]. Данная аппаратура производит измерение значения напряженности электрического поля атмосферы с частотой 2 Гц, т. е. каждые 0,5 секунды. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, составляют  $\pm 10\,000$  В/м. Репрезентативной территорией сбора информации является круг радиусом не менее 15 км. Пункты измерения поля расположены: на здании ВГИ (высота 540 м), на научно-исследовательской базе ВГИ «Кызбурун» (747 м), на станции СКВС «Урвань» (483 м) и на метеостанции «Пик Четет» (3 100 м).

На рис. 1 показаны совмещенные данные напряженности электрического поля атмосферы с количеством молниевых разрядов над выбранной территорией, для дня с грозой. Как видно из рис. 1, имеют место резкие скачки напряженности электрического поля приземной атмосферы под воздействием разрядов молний.



**Рис. 1.** Ход напряженности электрического поля и количества разрядов «облако–облако» и «облако–земля» 28 июля 2016 г.

Получены аналитические уравнения распределений значений токов молний «облако–земля». Определены их минимальные, максимальные, средние и модальные значения. Для юга европейской части России характерно значительное преобладание облачных (межоблачных) разрядов молний до 87% от общего числа регистрируемых грозорегистратором LS8000 молний. При этом доля положительных разрядов от общего числа наземных молний составляет около 23%, что соответствует значениям для средних широт (20%).

Значительные скачки напряженности поля вызывают наземные разряды молний. Такое увеличение, как правило, может достигать до  $\pm 10$  кВ/м.

Выполнены количественные оценки корреляционных взаимосвязей между интенсивностью молний различных типов и значениями напряженности электрического поля приземной атмосферы при грозах в виде линейных выражений. Рассчитанные значения коэффициентов корреляции указанных параметров составили 0,8; 0,9 и 0,8 соответственно.

### Литература

1. А.Х. Аджиев, В.О. Тапасханов, В.Н. Стасенко Система грозоупреждения на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. №1. С.5–11.
2. Измеритель электрического поля EFM550. Руководство пользователя [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.vaisala.com>.2004
3. А.Х. Аджиев А.Х., Г.В. Куповых Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдений // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462, № 2. С. 213–216.

## **Пространственно временной анализ гамма-всплесков (Fermi GBM), ассоциированных с разрядами молний (WWLLN), с сейсмическими волнами от землетрясений**

*Л. В. Сорокин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», Москва

<sup>2</sup> ООО «Лаборатория физики атмосферы», Москва

Феномен возникновения гамма-всплесков земного происхождения активно изучается с 1996 г. За прошедшее десятилетие были получены убедительные доказательства пространственно временной связи гамма-всплесков [1], зарегистрированных Fermi GBM, с разрядами молний (WWLLN) [2]. Характерной особенностью данного явления является высокая интенсивность электромагнитного излучения от разрядов молний [2].

Ранее нами проводились исследования по пространственно временной связи положительных разрядов молний [3] с сильными электромагнитными импульсами, связанными с прохождением фаз сейсмических волн от землетрясений [4–6]. Исследования показали, что одним из необходимых условий инициирования положительных разрядов молний является наличие триггерного эффекта от мощного электромагнитного импульса [7], при этом данные события имеют более широкий спектр излучения и высокую яркость. Дальнейшие исследования показали, что данные положительные разряды молний [3, 5, 8], ассоциированы с высотными электрическими разрядами — Transient Luminous Events (TLE), такими как Sprites и Elves.

После публикации 3-его каталога гамма-всплесков (1049 TGF), зарегистрированных Fermi GBM [1, 2], ассоциированных с 1214 разрядами молний (WWLLN), была произведена проверка пространственно временной связи этих событий с прохождением через точку наблюдения фаз сейсмических волн от землетрясений [9].

Для 1203 события была установлена прямая связь [9] с прохождением сейсмических волн от землетрясений через точку с координатами зарегистрированных молний (WWLLN), а 11 событий были исключены. Была проведена проверка пространственно временной связи 1049 событий каталога TGF с прохождением 1203 установленных фаз сейсмических волн от землетрясений. В результате 1038 TGF были ассоциированы с конкретными землетрясениями, а 42 события были исключены. Функция плотности распределения соответствует распределению Коши, что указывает на то, что результат является составной частью нескольких одновременных процессов. Для данного распределения внутри временного окна  $\pm 100$  сек (соответствует определению погрешности координат), находятся 996 TGF, что соответствует 95% событий от общего числа в 1049 TGF. Для 996 TGF было

установлено прохождение фаз сейсмических волн от конкретных землетрясений, а также магнитуды для данных землетрясений.

### Литература

1. *M.S. Briggs et al.* First results on terrestrial gamma ray flashes from the Fermi Gamma-ray Burst Monitor // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, A07323, doi: 10.1029/2009JA015242.
2. *V. Connaughton et al.* Associations between Fermi Gamma-ray Burst Monitor terrestrial gamma ray flashes and sferics from the World Wide Lightning Location Network // *J. Geophys. Res.*, 2010. V. 115, A12307, doi: 10.1029/2010JA015681.
3. *Л.В. Сорокин* Пространственно-временные связи землетрясений с положительными и высотными электрическими разрядами // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: физика.* 2002. № 10(1). С. 163–169.
4. *Л.В. Сорокин* Иницирование положительных разрядов молний электромагнитными импульсами, связанными с сейсмическими волнами от землетрясений // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: физика.* 2005. № 1(13). С. 149–156.
5. *L.V. Sorokin* Triggering of Positive Lightning and High-Altitude Atmospheric Discharges. // *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on “Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges”* Edited by Martin Fullenkruug, Eugene A. Mareev and Michael J. Rycroft. Code, Corsica, France 24–31 July 2004, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry — Spinger 2006, Vol. 225. P. 384–385.
6. *L.V. Sorokin* Lightning triggering related with seismic waves // *The proceedings of 7-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. Saint-Petersburg, June 26–29, 2007. P. 297–300.
7. *L.V. Sorokin* Anomalous seismo-electromagnetic emission related with seismic waves // *The proceedings of “7-th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology”*. Saint-Petersburg, June 26–29, 2007. P. 293–296.
8. *L.V. Sorokin* Seismo-electromagnetic emissions related to seismic waves can trigger TLEs // *Coupling of thunderstorms and lightning discharges to Near-Earth Space.* Editors Norma B. Crosby, Tai-Yin Huang, Michael J. Rycroft. *Proceedings of the Workshop (Corte, France, 23–27 June 2008)*, Melville, New York, 2009. AIP Conference proceedings. V. 1118. P. 58–67.
9. *L.V. Sorokin* Space-time analysis of the Seismic Waves propagation and World Wide Lightning Location Network data association with the Terrestrial Gamma-ray Flashes detected by the Fermi Gamma-ray Burst Monitor // *Chilingarian, A. (Ed.). Proceedings of International Symposium TEPA 2016: Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration.* 2017. P. 94–99.

## Применение спектрально-статистического подхода при пассивном мониторинге грозовой деятельности

*А. К. Богушов, А. В. Панюков*

Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск

Предгрозовое излучение и большинство внутриоблачных разрядов, важных для целей прогнозирования развития грозы, как правило, сложно зарегистрировать несколькими взаимно удаленными пунктами наблюдения. Однопунктовые пассивные методы лишены этого недостатка, но несовершенство математических методов не позволяет корректно обработать данные сигналы.

Задача идентификации параметров положения источника ЭМИ из одной точки наблюдения является обратной задачей математической физики, что ведет к высокой чувствительности алгоритмов к погрешностям в исходных данных. Для решения этой задачи разработано множество методов, которые используют модель диполя с произвольной ориентацией дипольного момента и позволяют по результатам пассивного мониторинга получить оценки параметров положения источника:  $\alpha = c/r$  и

$$u = \sin(\theta) \cos(\varphi - \psi).$$

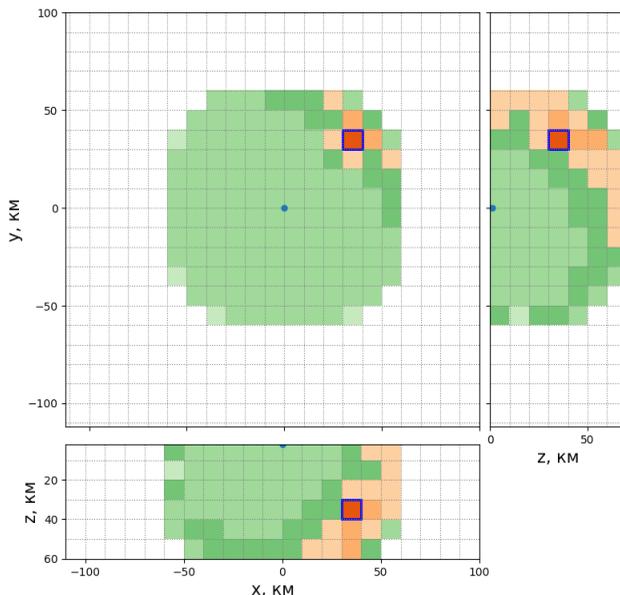
где  $r$  — расстояние от наблюдателя до диполя,  $c$  — скорость света,  $\psi$  — пеленг диполя,  $\theta$  — полярный угол,  $\varphi$  — псевдопеленг, определяемый грозо-пеленгатором.

Прямой метод [1] дает точечные оценки для параметров  $\alpha$  и  $u$  без информации о погрешностях, что в случае наличия шумов в сигнале ведет к большим ошибкам. Устранить данную проблему можно получением множественных оценок параметров одного разряда с целью увеличения статистической значимости конечных оценок. Для этого был разработан спектрально-статистический метод [2], который позволяет получить множество оценок параметров положения одного источника для различных гармоник. Метод работает более точно и позволяет получать достоверные результаты.

Существует неопределенность в определении угловых координат источника [1] излучения, поэтому параметры  $\alpha$  и  $u$  в общем случае позволяют получить только оценки угловых координат и сформировать множество точек возможного положения разряда. Однако интегрированная обработка излучения для множества разрядов  $R(T)$ , зарегистрированных в течение некоторого промежутка времени  $T$ , позволяет выявить вероятного местоположения очага.

Анализ информации, полученной от некоторой совокупности разрядов грозового очага, с использованием вторичной обработки результатов мониторинга [3] позволяет построить карту степени принадлежности очага. Данный алгоритм разбивает все пространство на ячейки размера  $\Delta$  и определяет

степень принадлежности очага ячейке. Для определения вероятности принадлежности разряда точкам множеству допустимых значений в работе [3] были сформулированы различные гипотезы.



**Рис. 1.** Карта степени принадлежности грозового очага.

На рис. 1 показан пример карты степени принадлежности для смоделированного точечного грозового очага, расположенного в координатах  $r = 60$  км,  $\psi = \pi/4$ ,  $\theta = \pi/3$ , где  $\psi$  — азимут,  $\theta$  — полярный угол,  $r$  — расстояние из центра координат. Очаг содержит 100 разрядов с различными ориентациями диполей  $\theta_0 = \pi/2$ ,  $\psi_0 = \{2\pi k/100: k = 1, 2, \dots, 100\}$ , где  $\theta_0$ ,  $\psi_0$  — угловые координаты дипольного момента источника излучения.

Подобный подход позволяет выявить местоположение очага и устранить неопределенности, возникающие при работе однопунктового грозопеленгатора.

### Литература

1. A.V. Panyukov Estimation of the location of an arbitrarily oriented dipole under single-point direction finding // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, № D10. P 14977–14982.
2. A.V. Panyukov, A.K. Bogushov The Spectral Statistical Method for Determining the Location Parameters of a Dipole Source of Electromagnetic Radiation // Radiophys and Quantum Electronics. 2016. V. 59, № 4. P 278–288.
3. A.V. Panyukov, A.K. Bogushov Development of Secondary Processing Data Methods under Single Point Thunderstorm Activity Monitoring // Adv. sci. technol. eng. syst. j. 2020. V. 5, № 6. P 1096–1102.

## Диагностика геоиндуцированных токов на Кольском полуострове

*А. В. Воробьев<sup>1,2</sup>, А. А. Соловьев<sup>1,3</sup>, В. А. Пилипенко<sup>1,3</sup>, Г. Р. Воробьева<sup>2</sup>,  
Я. А. Сахаров<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Геофизический центр РАН, Москва

<sup>2</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>4</sup> Полярный геофизический институт, Апатиты

На примере данных станции «Vykhodnoy» (Кольский п-ов) исследуется проблема диагностики геоиндуцированных токов в высокоширотных линиях электропередач посредством наземных магнитных станций. На основании статистического и корреляционного анализа экспериментальных данных выделяются признаки, связанные с исследуемым параметром, синтезируются и анализируются регрессионные диагностические модели [1–3].

Верификационные тесты показали, что полученные модели могут обеспечить дистанционное зондирование и диагностику ГИТ со среднеквадратической ошибкой до  $\sim 0.08 \text{ A}^2$  (т. е. относительной ошибкой до 1.5 % от размаха значений ГИТ за исследуемый период). При этом отношение доли верифицированных превышений некоторого порогового уровня ( $J_0 = 2.5 \text{ A}$ ) к доле ложных срабатываний (ложных превышений уровня) модели составляет  $\sim 5.7$ .

Установлено, что в случаях отсутствия окрестных магнитных станций или данных наблюдения геомагнитного поля, грубую диагностику ГИТ имеет смысл осуществить посредством набора глобальных и региональных индексов геомагнитной активности (например, AE-, IE-, SME-индексы), однако среднеквадратическую ошибку (MSE) диагностирования ГИТ (для региона покрытия индексов) в данном случае следует ожидать на уровне  $\sim 0.5 \text{ A}^2$  (RMSE  $\sim 0.71 \text{ A}$ , где  $\text{RMSE} = \text{MSE}^{1/2}$ ).

### Литература

1. R.A. Marshall, E.A. Smith, M.J. Francis, C.L. Waters, M.D. Sciffer (2011), A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather, Space Weather, 9, S10004, doi:10.1029/2011SW000685.
2. R.A. Marshall, C.L. Waters, M.D. Sciffer (2010), Spectral analysis of pipe-to-soil potentials with variations of the Earth's magnetic field in the Australian region, Space Weather, 8, S05002, doi:10.1029/2009SW000553.
3. А.В. Воробьев, В.А. Пилипенко, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов // Солнечно-земная физика, Т.5, №1, 2019, С. 48–58.

## **К вопросу о веб-ориентированной визуализации геофизических параметров в области аврорального овала**

*Г. Р. Воробьева<sup>1</sup>, А. В. Воробьев<sup>1,2</sup>, В. А. Пилипенко<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

<sup>2</sup> Геофизический центр РАН, Москва

<sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

Известно, что авроральные овалы — это высокоширотные области северного и южного полушарий планеты, имеющие форму овального пояса, в центре которого находятся соответствующие магнитные полюса Земли.

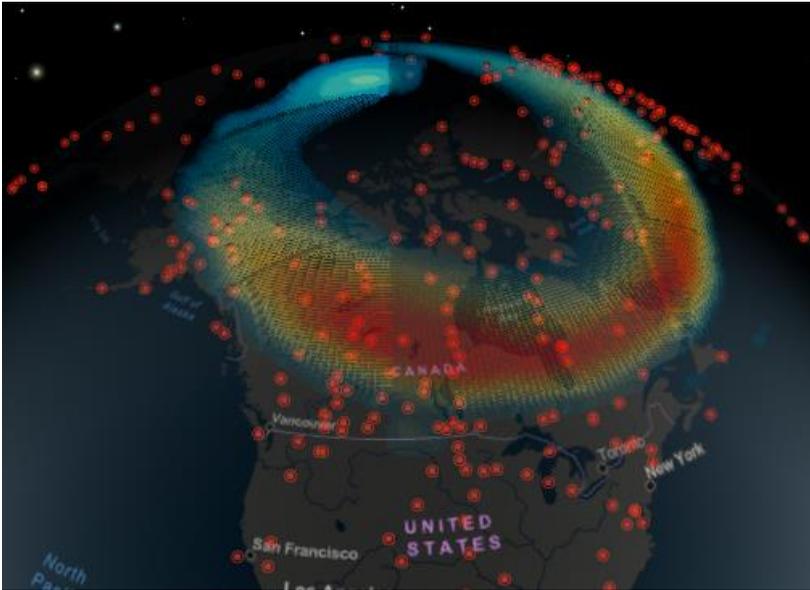
В настоящее время учеными разработаны несколько математических моделей, позволяющих прогнозировать значение различных геофизических параметров в области аврорального овала (электрический и магнитный потенциал, интегральная мощность возбуждения верхних слоев атмосферы и др.) [1].

При этом опыт работы с реализующими эти модели программными сервисами позволил выявить ряд характерных и, в принципе, повторяющихся от реализации к реализации недостатков, к которым, в первую очередь следует отнести: невозможность динамического масштабирования и добавления дополнительных слоев; малое число отображаемых параметров; отсутствие данных о текущем состоянии космической погоды и базовых инструментов для пространственного анализа визуализированных параметров.

В силу геопространственной специфики распределения анализируемых данных (узкие высокоширотные пояса) по причине искажения геометрического подобия контуров, соотношения площадей земной поверхности и картографических искажений проекций традиционные плоские картографические подложки использовать нецелесообразно, и при реализации системы стоит делать выбор в пользу виртуальных глобусов.

Исключение составляют плоские проекции северной и южной полушар, однако помимо того, что такой вид карт является достаточно экзотичным и не поддерживается большинством доступных программных библиотек, он также уступает трехмерной модели Земли по качеству визуального восприятия информации.

Среди ряда известных на сегодняшний день библиотек, позволяющих (с использованием технологии виртуального глобуса) реализовать визуализацию геофизических параметров в области аврорального овала, по мнению авторов, выбор следует сделать в пользу ArcGIS API, хотя значимым потенциалом для решения такого рода задач также обладают NASA World Wind и Cesium.



**Рис. 1.** Экранная форма разработанного веб-сервиса для визуализации геофизических параметров в области аврорального овала.

На базе веб-ориентированной MVC-программной архитектуры, создан прототип системы, с которым можно ознакомиться по адресу: ([url: http://aurora-forecast.ru/](http://aurora-forecast.ru/)). При этом работа над повышением функциональности и эффективности визуализации приложения продолжается [2, 3].

### **Литература**

1. *P.T. Newell, K. Liou, Y. Zhang et al.* OVATION Prime- 2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // *Space Weather*. 2014. V. 12, N 6. P. 368–379. doi: 10.1002/2014 sw 001056.
2. *А.В. Воробьев, Г.Р. Воробьева* Геоинформационная система для амплитудно-частотного анализа данных наблюдения геомагнитных вариаций и космической погоды // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41, в. 6. С. 963–972.
3. *С.Б. Лунюшкин, Ю.В. Пенских* Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм // *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 97–113, doi: 10.12737/szf-52201913

## Аппаратура полевых натуральных наблюдений концентраций легких аэроионов

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

Для организации полевых натуральных наблюдений геофизических характеристик приземной атмосферы сотрудниками лаборатории геофизического мониторинга ГО «Борок» ИФЗ РАН разработан автономный аппаратный комплекс, предназначенный для длительных наблюдений концентраций легких атмосферных ионов в полевых условиях [1]. Комплекс состоит из датчиков концентрации легких аэроионов (ДКИ), автоматизированной системы сбора данных (ССД) и источника питания (ИП).

ССД построена на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 и работает под управлением операционной системы Debian Linux. Управление ССД осуществляется посредством протокола SSH через Ethernet или WiFi подключение. К одной системе сбора может быть подключено до 16-ти ДКИ, объединенных в общую шину данных. Интерфейс передачи данных между ДКИ и ССД – UART по проводной линии.

ДКИ представляет собой автоматизированный датчик концентрации легких аэроионов. В основе прибора использованы два аспирационных конденсатора, смонтированных в один общий измерительный блок. ДКИ одновременно измеряет концентрации легких положительных и отрицательных аэроионов. В конструкции ДКИ заложены возможности изменения объемного расхода воздуха через аспирационные конденсаторы (контроль осуществляется за скоростью вращения крыльчатки воздушной помпы) и напряжения на отклоняющих электродах. Таким образом, ДКИ позволяет не только измерять концентрацию легких аэроионов, но и осуществлять наблюдения спектров аэроионов по подвижностям. Диапазон изменения отклоняющего напряжения:  $\pm 10$  В с шагом 0.1 В. Диапазон изменения объемного расхода воздуха через аспирационные конденсаторы:  $0.9 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^3$  [м<sup>3</sup>/с]. Диапазон изменения критической подвижности регистрируемых аэроионов с учетом изменения отклоняющего напряжения и объемного расхода воздуха: 0.3–6 [см<sup>2</sup>/В·с] с шагом 0.05 [см<sup>2</sup>/В·с]. Диапазон измеряемых концентраций легких атмосферных ионов:  $2 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^9$  [м<sup>-3</sup>] с точностью  $1 \cdot 10^5$  [м<sup>-3</sup>]. ДКИ осуществляет синхронные измерения концентраций легких положительных и отрицательных аэроионов с разрешением по времени от 1 до 16 измерений в секунду. Диапазон рабочих температур ДКИ: от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ . Возможна работа ДКИ при относительной влажности до 100%. Допускается конденсация росы на внешних поверхностях приборов. Номинальное напряжение питания ДКИ: от 15 В до 18 В, потребляемая мощность — не более 3 Вт.

ИП комплекса позволяет осуществлять питание агрегатов как от сети 220 В 50 Гц, так и от автономной аккумуляторной батареи или иного автономного источника.

Комплекс рассчитан на длительную работу в полевых условиях с минимальным участием оператора. В связи с этим, исполнение агрегатов комплекса произведено с учетом возможного влияния факторов окружающей среды, таких как осадки, перепады температур, влияние солнечного ультрафиолета, загрязнение воздуха пылью и аэрозолями.

Работа выполнена в рамках государственного задания ГО «Борок» ИФЗ РАН, проект 0144-2019-0023.

### **Литература**

1. *S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, K.V. Aphinogenov, E.V. Klimanova, A.A. Prokhorchuk, A.S. Kozmina, A.V. Guriev* Mid-latitude atmospheric boundary layer electricity: A study by using a tethered balloon platform. *Atmos. Res.* DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105355.

## УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

А. Х. Аджиев	90	Р. Р. Каримов	76
Р. Р. Акбашев	59, 69	З. М. Керефова	34, 90
Д. Г. Аксельрод	85	Е. В. Климанова	44, 46, 49
С. В. Анисимов	44, 46, 48, 49, 51	М. В. Клименко	12
С. В. Анисимов	99	В. В. Клименко	12
В. П. Антонова	30	П. А. Климов	82, 84
К. В. Афиногенов	44, 49, 99	А. С. Козьмина	44, 51
В. В. Богданов	18	Н. Ю. Колбнева	40
В. В. Богомоллов	84	А. Ю. Костинский	36
А. К. Богушов	94	С. Е. Кочепасов	85
В. А. Болдырева	54, 55, 56	А. В. Кочин	10
Е. А. Бураева	56	М. А. Криницкий	68
А. В. Бычков	63	С. В. Крюков	30
В. В. Вахнина	63	А. А. Кувшинов	63
А. В. Воробьев	96, 97	Т. С. Кумыков	39
Г. Р. Воробьева	96, 97	Г. В. Куповых	90
В. А. Гаврилов	18	М. В. Курганский	68
С. В. Галиченко	44, 46, 48, 49, 99	Ф. А. Кутерин	28
Г. И. Гордиенко	30	А. С. Лидванский	38
Л. В. Грунская	78	Я. Лихтенбергер	76
А. В. Гурьев	44, 99	В. Ю. Луценко	30
В. В. Денисенко	12, 15	Е. А. Мареев	6, 29, 65, 86
Э. М. Дмитриев	51	Т. Маршалл	36
А. А. Евтушенко	28	И. Г. Милешин	13
А. В. Елисеев	67	И. А. Миронова	62
Е. А. Ерошкина	68	В. Н. Морозов	8
Ю. К. Зайко	84	И. А. Муратов	90
А. Н. Золотов	78	П. М. Нагорский	58, 59, 60
Н. В. Ильин	29, 65, 86, 87	К. А. Николь	86
В. В. Исакевич	78	М. В. Оглезнева	60
Д. В. Исакевич	78	В. И. Оседло	84
Д. И. Иудин	22, 23	И. Н. Панчишкина	53, 54, 55, 56
А. Ф. Июдин	84	А. В. Панюков	94
С. Т. Казакова	90	О. Ю. Перетятыко	84
В. В. Калегаев	84	В. Б. Петков	38
А. В. Калинин	13	А. И. Петров	53, 54, 55, 56
А. В. Карагодин	62	В. Л. Петров	84, 85
А. Н. Караштин	23, 24, 26	Г. Г. Петрова	53, 54, 55, 56
О. С. Караштина	24, 26	В. А. Пилипенко	17, 74, 96, 97
А. В. Карелин	71	А. Н. Плосков	67

К. Г. Прайс	86	О. В. Федяй	63
А. А. Прохорчук	44, 46, 48	С. А. Филиппычев	85
Р. Н. Пудовинников	63	П. П. Фирстов	59, 69
С. А. Пулинец	18	А. В. Франк-Каменецкий	89
К. Н. Пустовалов	58, 59, 60	Н. С. Хаердинов	38
Е. В. Розанов	62	М. Н. Хаердинов	38
Ф. Г. Сарафанов	87	Р. Дж. Харрисон	86
Я. А. Сахаров	96	Г. Я. Хачикян	18
С. И. Свергилов	84	В. В. Хегай	71
Е. К. Свечникова	28, 29	А. А. Черкесов	32
Н. Н. Слюняев	65	А. Н. Черненко	63
С. В. Смирнов	58, 60	А. В. Чернокульский	67, 68
А. А. Соловьев	96	О. Г. Чхетиани	54, 55
Л. В. Сорокин	92	М. В. Шаталина	87
А. А. Спрыгин	68	А. Н. Шихов	68
М. Стольценбург	36	Ю. В. Шлюгаев	24, 26
В. В. Сурков	17, 75	Н. В. Юрченко	90
А. А. Сысоев	23	Ю. И. Ярынич	68
Е. Н. Федоров	74	И. В. Яшин	84

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	3
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	4
<b>ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ЗЕМЛИ</b>	
<i>Е. А. Мареев</i>	
На пути к новому поколению моделей глобальной электрической цепи	6
<i>В. Н. Морозов</i>	
Влияние аэрозольных частиц на глобальную электрическую цепь	8
<i>А. В. Кочин</i>	
Влияние поглощения электрических зарядов поверхностью Земли на генерацию зарядов в слоисто-дождевых облаках	10
<i>М. В. Клименко, В. В. Клименко, В. В. Денисенко</i>	
Модельный учет взаимовлияния глобальной электрической цепи и изменчивости ионосферной проводимости за счет внутренних процессов и внешнего воздействия	12
<i>И. Г. Милешин, А. В. Калинин</i>	
Метод ортогонального проектирования в моделировании глобальной электрической цепи в атмосфере Земли	13
<i>В. В. Денисенко</i>	
Роль гроз в образовании экваториальных электроструй	15
<i>В. В. Сурков, В. А. Пилюшенко</i>	
Может ли сейсмогенный атмосферный ток повлиять на ионосферу?	17
<i>С. А. Пулинец, Г. Я. Хачикян, В. А. Гаврилов, В. В. Богданов</i>	
Новые элементы в структуре и функционировании глобальной электрической цепи	18
<b>ФОРМИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ — ГРОЗОВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, МОЛНИЕВЫЕ РАЗРЯДЫ И ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ, ИОНОСФЕРНЫЕ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ</b>	
<i>Д. И. Иудин</i>	
Макромасштабная асимметрия молнии	22
<i>А. А. Сысоев, Д. И. Иудин, А. Н. Караитин</i>	
Моделирование излучения разрядной активности на стадии инициации молнии в облаке	23
<i>А. Н. Караитин, Ю. В. Шлюгаев, О. С. Караитина</i>	
Характеристики импульсного субмикросекундного радиоизлучения грозового облака	24
<i>А. Н. Караитин, Ю. В. Шлюгаев, О. С. Караитина</i>	
Признаки развития молниевоего разряда облако – земля в коротковолновом радиоизлучении грозового облака	26
<i>А. А. Евтушенко, Ф. А. Кутерин, Е. К. Свечникова</i>	
Моделирование спрайтов/гало в дневных условиях	28
<i>Е. К. Свечникова, Н. В. Ильин, Е. А. Мареев</i>	
Разделение заряда в облаках, создающих нисходящее гамма-излучение	29

<i>В. П. Антонова, Г. И. Гордиенко, С. В. Крюков, В. Ю. Луценко</i> Исследование воздействия спорадических космо- и геофизических источников возмущений на динамику атмосферного электрического поля _____	30
<i>А. А. Черкесов</i> О влиянии плотности протонов солнечного ветра на грозовое электричество _____	32
<i>З. М. Керефова</i> Параметры молниевых разрядов по инструментальным измерениям _____	34
<i>А. Ю. Костинский, Т. Маршалл, М. Стольценбург</i> Механизм инициации и развития молнии от инициирующего события (IE) через стадию начальных изменений электрического поля (IEC) до стадии начальных импульсов пробоя (IBPs) _____	36
<i>Н. С. Хаердинов, А. С. Лидванский, В. Б. Петков, М. Н. Хаердинов</i> Оценка вертикального электрического тока, вызванного медленным пробоем стратосферы лавинами убегающих электронов, по измеренным на уровне земли вариациям космических лучей _____	38
<i>Т. С. Кумыков</i> Математическое моделирование заряжения капель в ионной среде с помощью эредитарной динамической системы Риккати _____	39
<i>Н. Ю. Колбнева</i> Дипольное электромагнитное излучение незаряженной капли, нелинейно осциллирующей во внешнем электростатическом поле _____	40
<b>ЭЛЕКТРОДИНАМИКА АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ</b>	
<i>С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов, Е. В. Климанова, А. А. Прохорчук, А. С. Козьмина, А. В. Гурьев</i> Электричество среднеширотного атмосферного пограничного слоя над сушей: мониторинг и моделирование _____	44
<i>С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, А. А. Прохорчук, Е. В. Климанова</i> Статистические характеристики вариаций объёмного заряда и электрического поля невозмущенной нижней атмосферы _____	46
<i>А. А. Прохорчук, С. В. Галиченко, С. В. Анисимов</i> Плотность конвективного электрического тока над морем _____	48
<i>Е. В. Климанова, С. В. Анисимов, С. В. Галиченко, К. В. Афиногенов</i> Статистические оценки короткопериодных вариаций концентрации лёгких ионов в приземной атмосфере _____	49
<i>С. В. Анисимов, Э. М. Дмитриев, А. С. Козьмина</i> Суточные вариации высотного распределения изотопов радона в приземной атмосфере по данным наземных наблюдений и математического моделирования _____	51
<i>И. Н. Панчишкина, Г. Г. Петрова, А. И. Петров</i> Влияние аэрозольного состояния приземной атмосферы на перенос заряда под действием механических сил _____	53
<i>И. Н. Панчишкина, Г. Г. Петрова, А. И. Петров, В. А. Болдырева, О. Г. Чхетиани</i> Сравнение спектров мелкодисперсного аэрозоля в приземном слое в степной и высокогорной зонах юга России _____	54
<i>Г. Г. Петрова, И. Н. Панчишкина, А. И. Петров, О. Г. Чхетиани, В. А. Болдырева</i> Особенности электрического состояния приземной атмосферы на степной и высокогорной станциях ИФА им. А.М. Обухова РАН _____	55

Г. Г. Петрова, А. И. Петров, И. Н. Панчишкина, Е. А. Бураева, В. А. Болдырева  
Исследования ионизации приземной атмосферы и природных радионуклидов по результатам экспедиционных измерений \_\_\_\_\_ 56

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов  
Влияние смога от природных пожаров на электрические процессы в атмосфере \_\_ 58

П. М. Нагорский, Р. Р. Акбашев, К. Н. Пустовалов, П. П. Фирстов  
Сравнительный анализ «медленных» вариаций электрического поля на примере эксплозий вулкана Эбеко и внутримассовых кучево-дождевых облаков \_\_\_\_\_ 59

М. В. Оглезнева, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов  
Влияние болотных ландшафтов Западной Сибири на аэроионы  
(на примере Бакчарского болота) \_\_\_\_\_ 60

A. V. Karagodin, I. A. Mironova, E. V. Rozanov  
Response of near-surface meteorology to changes in cloud microphysics  
and fair-weather current density Jz related to Mansurov effect \_\_\_\_\_ 62

В. В. Вахнина, А. Н. Черненко, А. А. Кувишинов, А. В. Бычков, О. В. Федяй,  
Р. Н. Пудовинников  
Инженерное моделирование геоиндуцированных токов  
в электроэнергетических системах \_\_\_\_\_ 63

Н. Н. Слюняев, Н. В. Ильин, Е. А. Мареев  
Влияние Эль-Ниньо на глобальную электрическую цепь \_\_\_\_\_ 65

А. В. Чернокульский, А. В. Елисеев, А. Н. Плосков  
Глобальная климатология высоты конвективных облаков  
по спутниковым данным MODIS \_\_\_\_\_ 67

А. В. Чернокульский, М. А. Криницкий, А. А. Спрыгин, Е. А. Ерошкина,  
М. В. Курганский, А. Н. Шихов, Ю. И. Ярынич  
Климатология мезомасштабных конвективных систем  
на Европейской территории России \_\_\_\_\_ 68

Р. Р. Акбашев, П. П. Фирстов  
Феноменологическая модель формирования объемных электростатических  
зарядов в эруптивных облаках извержений вулкана Эбеко (о. Парамушир) \_\_\_\_\_ 69

В. В. Хегай, А. В. Карелин  
О связи интенсивности тропических ураганов с грозовой активностью.  
Взгляд из космоса \_\_\_\_\_ 71

**ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ**

В. А. Пилипенко, Е. Н. Федоров  
В поисках электрической моды УНЧ диапазона в атмосфере \_\_\_\_\_ 74

В. В. Сурков  
Оценка высоты и направленности вспышек гамма-излучения,  
зарегистрированных над областями с повышенной грозовой активностью \_\_\_\_\_ 75

Р. Р. Каримов, Я. Лихтенбергер  
Регистрация свистящих атмосфериков в Якутске (AWDANET) \_\_\_\_\_ 76

Л. В. Грунская, В. В. Исакевич, Д. В. Исакевич, А. Н. Золотов  
Геофизические и астрофизические процессы в электрическом поле  
Земли инфранизкочастотного диапазона \_\_\_\_\_ 78

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

*П. А. Климов*

Первые результаты мониторинга свечения атмосферы Земли телескопом  
«УФ атмосфера» с борта МКС \_\_\_\_\_ 82

*С. И. Свертилов, В. В. Богомолов, Ю. К. Зайко, А. Ф. Июдин, В. В. Калегаяев,  
П. А. Климов, О. Ю. Перетягко, В. Л. Петров, В. И. Оседло, И. В. Яшин*

Первый опыт мониторинга высыпаний электронов и высотных электрических  
разрядов с помощью мульти-спутниковой группировки  
Московского университета \_\_\_\_\_ 84

*В. Л. Петров, С. А. Филиппычев, С. Е. Кочepasов, Д. Г. Аксельрод*

Подготовка стратосферного эксперимента по измерению космической радиации \_ 85  
*Н. В. Ильин, Е. А. Мареев, К. А. Николь, Р. Дж. Харрисон, К. Г. Прайс*

Совместная экспериментальная кампания по измерению высотных профилей  
электрических параметров атмосферы: первые результаты \_\_\_\_\_ 86

*Ф. Г. Сарафанов, Н. В. Ильин, М. В. Шаталина*

Универсальный критерий хорошей погоды в приземных измерениях  
электростатического поля атмосферы \_\_\_\_\_ 87

*А. В. Франк-Каменецкий*

Спектральный состав вариаций приземного электрического поля  
на ст. Восток в Антарктиде \_\_\_\_\_ 89

*А. Х. Аджиев, Г. В. Куповых, З. М. Керефова, Н. В. Юрченко, И. А. Муратов,  
С. Т. Казакова*

Наблюдения за атмосферным электрическим полем в приземном слое  
и грозовой активностью на Северном Кавказе \_\_\_\_\_ 90

*Л. В. Сорокин*

Пространственно временной анализ гамма-всплесков (Fermi GBM),  
ассоциированных с разрядами молний (WWLLN), с сейсмическими волнами  
от землетрясений \_\_\_\_\_ 92

*А. К. Богущов, А. В. Панюков*

Применение спектрально-статистического подхода при пассивном мониторинге  
грозовой деятельности \_\_\_\_\_ 94

*А. В. Воробьев, А. А. Соловьев, В. А. Пилипенко, Г. Р. Воробьева, Я. А. Сахаров*

Диагностика геоиндуцированных токов на Кольском полуострове \_\_\_\_\_ 96

*Г. Р. Воробьева, А. В. Воробьев, В. А. Пилипенко*

К вопросу о веб-ориентированной визуализации геофизических параметров  
в области аврорального овала \_\_\_\_\_ 97

*К. В. Афинозенов, С. В. Анисимов, А. В. Гурьев, С. В. Галиченко*

Аппаратура полевых натурных наблюдений концентраций легких аэроионов \_\_\_\_ 99

**УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ** \_\_\_\_\_ 101

Научное издание

**ГЛОБАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ**

*Материалы  
Пятой 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.

Подписанов печать 23.09.21. Формат 60х90 1/16.  
Усл. печ. л. 7,0. Заказ № 17161. Тираж 100 экз.

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