

39. Александров Е Б, Мамырин А Б, Соколов А П *Опт. и спектроск.* **34** 1216 (1973)
40. Александров Е Б и др. *Опт. и спектроск.* **38** 818 (1975) [Aleksandrov E B et al. *Opt. Spectrosc.* **38** 466 (1975)]
41. Александров Е Б, Мамырин А Б, Якобсон Н Н *ЖТФ* **51** 607 (1981) [Aleksandrov E B, Mamyrin A B, Yakobson N N *Sov. Phys. Tech. Phys.* **26** 363 (1981)]
42. Александров Е Б, Вершовский А К, Пазгалева А С *ЖТФ* **76** (7) 103 (2006) [Aleksandrov E B, Vershovskii A K, Pazgaleva A S *Tech. Phys.* **51** 919 (2006)]
43. Allen A H, Bender P L J. *Geomagn. Geoelectr.* **24** 1 105 (1972)
44. Pulz E, Jäkel K-H, Linthe H-J *Meas. Sci. Technol.* **10** 1025 (1999)
45. Александров Е Б и др. *ЖТФ* **70** (7) 118 (2000) [Aleksandrov E B et al. *Tech. Phys.* **45** 931 (2000)]
46. Александров Е Б и др. *ЖТФ* **69** (9) 27 (1999) [Aleksandrov E B et al. *Tech. Phys.* **44** 1025 (1999)]
47. Александров Е Б, Пазгалева А С *Опт. и спектроск.* **80** 534 (1996) [Aleksandrov E B, Pazgaleva A S *Opt. Spectrosc.* **80** 473 (1996)]
48. Александров Е Б, Пазгалева А С, Рассон Ж Л *Опт. и спектроск.* **82** 14 (1997) [Alexandrov E B, Pazgaleva A S, Rasson J L *Opt. Spectrosc.* **82** 10 (1997)]
49. Happer W, Tang H *Phys. Rev. Lett.* **31** 273 (1973)
50. Happer W, Tam A C *Phys. Rev. A* **16** 1877 (1977)
51. Allred J C et al. *Phys. Rev. Lett.* **89** 130801 (2002)
52. Kominis I K et al. *Nature* **422** 596 (2003)
53. Savukov I M, Romalis M V *Phys. Rev. A* **71** 023405 (2005)
54. Savukov I M et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 063004 (2005)
55. Вершовский А К, Пазгалева А С, Александров Е Б *ЖТФ* **70** (1) 88 (2000) [Vershovskii A K, Pazgaleva A S, Aleksandrov E B *Tech. Phys.* **45** 88 (2000)]
56. Nagel A et al. *Europhys. Lett.* **44** 31 (1998)
57. Stähler M et al. *Europhys. Lett.* **54** 323 (2001)
58. Kitching J et al. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **49** 1313 (2000)
59. Schwindt P D D, Hollberg L, Kitching J *Rev. Sci. Instrum.* **76** 126103 (2005)
60. Тайченачев А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **80** 265 (2004) [Taichenachev A V et al. *JETP Lett.* **80** 236 (2004)]
61. Budker D, Yashchuk V, Zolotov M *Phys. Rev. Lett.* **81** 5788 (1998)
62. Pustelny S et al. *Phys. Rev. A* **73** 23817 (2006)
63. Fairweather A J, Usher M J J. *Physics E* **5** 986 (1972)
64. Lamden R J J. *Phys. E* **2** 125 (1969)
65. Александров Е Б и др. *Meas. Sci. Technol.* **15** 918 (2004)
66. Вершовский А К и др. *ЖТФ* **76** (1) 115 (2006) [Vershovskii A K et al. *Tech. Phys.* **51** 112 (2006)]
67. Вершовский А К *Опт. и спектроск.* **101** (2) 341 (2006) [Vershovskii A K *Opt. Spectrosc.* **101** 309 (2006)]

PACS numbers: **94.30.** – d, 95.85.Ry, 96.50.S –
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005g.0509

Вариации космических лучей и космическая погода

Л.И. Дорман

1. Введение

В моём докладе, представленном на Научной сессии РАН в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) 25 ноября 2009 г., были рассмотрены следующие вопросы:

Л.И. Дорман. Israel Cosmic Ray and Space Weather Center with Emilio Ségre Observatory, affiliated to Tel Aviv University, Technion, and Israel Space Agency; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, РФ
E-mail: lid@physics.technion.ac.il

1. *Краткая история исследований вариаций космических лучей (КЛ) в Научно-исследовательском институте земного магнетизма и в ИЗМИРАН:* роль Н.В. Пушкова; счётчиковый телескоп Е.С. Глоковой; проект С.Н. Вернова, Н.В. Пушкова и Ю.Г. Шафера (1950–1951 гг.) по созданию серии больших ионизационных камер и привлечению студентов-ядерщиков (не допущенных Комитетом государственной безопасности СССР на ядерные объекты) для организации советской сети станций КЛ; разработка теории метеорологических эффектов и метода функций связи; публикация в 1957 г. первой в мире монографии по вариациям КЛ в Москве и её английского перевода в США; 10-кратная ошибка правительственных чиновников в 1960–1961 гг., послужившая стремительному развитию экспериментальной базы исследований вариаций КЛ и вообще солнечно-земной физики в СССР; теоретическое и прикладное значение исследований вариаций КЛ.

2. *Вариации КЛ как элемент космической погоды:* влияние земной атмосферы на КЛ и обратное влияние вариаций КЛ на процессы в атмосфере и глобальное изменение климата; радиационная опасность от галактических КЛ, солнечных КЛ и от энергичных частиц, "высыпавшихся" из радиационных поясов.

3. *Вариации КЛ как инструмент для мониторинга и предсказания космической погоды:* предсказание части изменения глобального климата, обусловленной вариацией интенсивности галактических КЛ; предсказание радиационной опасности для людей и электронной аппаратуры на самолётах, спутниках и космических кораблях, обусловленной вариацией интенсивности галактических КЛ и вспышками солнечных КЛ; предсказание опасных больших магнитных бурь по часовым данным интенсивности КЛ в реальном масштабе времени, непрерывно получаемых с мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов.

Ниже я хотел бы рассмотреть основы исследований вариаций КЛ и их связь с космической погодой.

2. Основы науки о вариациях космических лучей

Наблюдаемые пространственно-временные вариации плотности и анизотропии КЛ обусловлены в основном причинами, имеющими следующее происхождение: 1) атмосферное, 2) магнитосферное, 3) внеземное, или космическое (солнечное, межпланетное, галактическое и внегалактическое) (см. расширенные обзоры в [1–4]). Для каждой станции КЛ k , регистрирующей компоненту КЛ i (например, мюонную под разными зенитными и азимутальными углами, нейтронную, как полную интенсивность, так и разные кратности, измерения под землей на разных глубинах и на поверхности, на кораблях, самолётах, баллонах и спутниках), интенсивность $I_{ki}(t)$ в момент времени t может быть представлена как

$$I_{ki}(t) = \int_{R_k(t)}^{\infty} m_i(R, t) D(R, t) dR, \quad (1)$$

где $R_k(t)$ — жёсткость геомагнитного обрезания (в случае измерений КЛ вне магнитосферы Земли $R_k(t) = 0$), $m_i(R, t)$ — интегральная кратность (полное число вторичных частиц типа i , генерированных в каскадных процессах от одной первичной частицы жёсткостью R ,

для измерений КЛ вне магнитосферы Земли $m_i(R, t) = 1$, $D(R, t)$ — дифференциальный спектр первичных КЛ по жёсткостям (вне магнитосферы Земли). Из (1) следует, что в принципе возможны три типа вариаций КЛ — атмосферного, магнитосферного и внеземного, или космического, происхождения:

$$\begin{aligned} \delta I_{ki}(t) = & -m_i(R_k, t) D(R_k, t) \delta R_k(t) + \\ & + \int_{R_k(t)}^{\infty} \delta m_i(R, t) D(R, t) dR + \\ & + \int_{R_k(t)}^{\infty} m_i(R, t) \delta D(R, t) dR. \end{aligned} \quad (2)$$

Наблюдаемые относительные вариации КЛ можно найти, поделив (2) на $I_{ki}(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{\delta I_{ki}(t)}{I_{ki}(t)} = & -W_{ik}(R_k, t) \delta R_k(t) + \\ & + \int_{R_k(t)}^{\infty} \frac{\delta m_i(R, t)}{m_i(R, t)} W_{ik}(R, t) dR + \\ & + \int_{R_k(t)}^{\infty} \frac{\delta D(R, t)}{D(R, t)} W_{ik}(R, t) dR, \end{aligned} \quad (3)$$

где $W_{ik}(R, t)$ — функции связи:

$$W_{ik}(R, t) = \frac{m_i(R, t) D(R, t)}{I_{ki}(t)}, \quad (4)$$

которые могут быть вычислены на основе детального рассмотрения каскадного процесса и поглощения КЛ в земной атмосфере. Такое вычисление было сделано для функций связи $W_{ik}(R, t)$ и интегральных кратностей $m_i(R, t)$ в [5–7] (см. расширенный обзор в нашей монографии [2, гл. 3]). Из (1) и (4) следует, что функции связи нормированы:

$$\int_{R_k(t)}^{\infty} W_{ik}(R, t) dR = 1. \quad (5)$$

Из (1) и (4) следует также, что теоретически вычисленные функции связи $W_{ik}(R, t)$ и интегральные кратности $m_i(R, t)$ могут быть проверены и экспериментально оценены путём использования Земли как гигантского магнитного спектрометра (с помощью измерения геомагнитных эффектов КЛ):

$$\begin{aligned} W_{ik}(R, t) = & - \left. \frac{\partial I_{ki}(t) / \partial R_k}{I_{ki}(t)} \right|_{R_k \rightarrow R}, \\ m_i(R, t) = & - \left. \frac{\partial I_{ki}(t) / \partial R_k}{D(R, t)} \right|_{R_k \rightarrow R}. \end{aligned} \quad (6)$$

Как следует из (6), это можно сделать для первичных КЛ, приходящих в вертикальном направлении, с жёсткостью вплоть до ≈ 17 ГВ и для первичных КЛ, приходящих в наклонном направлении, с жёсткостью вплоть до ≈ 69 ГВ (см. [8–10] и расширенный обзор в монографии [4]).

Согласно [11] функции связи для любых вторичных компонент КЛ могут быть аппроксимированы аналитически с достаточно хорошей точностью специальной функцией (получившей в литературе название функции

Дормана):

$$\begin{aligned} W_{ik}(R, t) = & \\ = & \begin{cases} 0, & \text{если } R < R_k, \\ \alpha_i \beta_i R^{-(\beta_i+1)} (1 - \alpha_i R_k^{-\beta_i})^{-1} \exp(-\alpha_i R^{-\beta_i}), & \text{если } R \geq R_k. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Легко видеть, что условие нормировки (5) выполняется при любых значениях параметров α_i и β_i . Параметры α_i и β_i для нейтронных мониторов при регистрации различных кратностей m (параметры α_m и β_m , где $m = 1, 2, 3, \dots$) и полной нейтронной интенсивности (параметры α_n и β_n) были определены с помощью широтных экспедиций на кораблях [8–10], и они оказались в хорошем согласии с результатами теоретических расчётов [5–7]. Зависимость этих параметров от давления h [атм] на станции КЛ и уровня солнечной активности, определяемого натуральным логарифмом от среднемесячной часовой скорости счёта старейшего (существующего с 1953 г.) высокогорного нейтронного монитора на станции Climax, $\ln(N_{Cl})$, определяется следующими функциями (см. [2, гл. 3]):

$$\begin{aligned} \alpha_n = & (-2,915h^2 - 2,237h - 8,654) \ln N_{Cl} + \\ & + (24,584h^2 + 19,460h + 81,230), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \beta_n = & (0,180h^2 - 0,849h + 0,750) \ln N_{Cl} + \\ & + (-1,440h^2 + 6,403h - 3,698), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \alpha_m = & [(-2,915h^2 - 2,237h - 8,638) \ln N_{Cl} + \\ & + (24,584h^2 + 19,46h + 81,23)] \times \\ & \times \frac{0,987m^2 + 0,225m + 6,913}{9,781}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta_m = & [(0,180h^2 - 0,849h + 0,750) \ln N_{Cl} + \\ & + (-1,440h^2 + 6,403h - 3,698)] \frac{0,081m + 1,819}{1,940}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ Вместо данных нейтронного монитора на станции Climax можно использовать данные любой другой станции, применяя соответствующий коэффициент пересчёта. Например, для Обсерватории Emilio Segre в Израиле (ESOI) на горе Hermon (нейтронный монитор 6NM-64) пересчёт для (8)–(11) определяется соотношением (которое находится путём корреляции за много лет):

$$\ln N_{Cl} = 2,161 \ln N_{ESOI} - 9,665. \quad (12)$$

Для нейтронного монитора 17NM-64 на станции Rome соответствующее соотношение имеет вид

$$\ln N_{Cl} = 1,767 \ln N_{Rome} - 3,857. \quad (13)$$

Согласно [12, 13] для некоторых других вторичных компонент КЛ были найдены следующие значения параметров α_i , β_i в (7): 1) для нейтронной компоненты $\alpha_n = 8,30$, $\beta_n = 1,45$ на высоте со средним давлением $h_0 = 312$ мбар; 2) для той же компоненты $\alpha_n = 13,62$, $\beta_n = 1,26$ при $h_0 = 680$ мбар; 3) для мюонной компоненты $\alpha_\mu = 35,3$, $\beta_\mu = 0,95$ на уровне моря при $h_0 = 1030$ мбар; 4) для мюонной компоненты $\alpha_\mu = 58,5$,

$\beta_\mu = 0,94$ под землёй на глубине 7 метров водного эквивалента.

Выше мы рассматривали прямые задачи, дающие ответ на вопрос, как отражаются в данных наблюдений КЛ изменения в магнитосфере, атмосфере и в пространстве вне магнитосферы. Но можно ли решить обратные задачи? А если да, то как? То есть, как определить по данным наблюдений вариаций КЛ изменения условий в магнитосфере, атмосфере и космосе? Эти изменения описываются в (3) соответственно величинами $\delta R_k(t)$, $\delta m_i(R, t)/m_i(R, t)$ и $\delta D(R, t)/D(R, t) = a(t) R^{-b(t)}$, где $a(t)$ и $b(t)$ — функции, определяемые из данных по вариациям КЛ. С этой целью для случая, когда предварительно введены поправки на метеорологические эффекты, т.е. предварительно в (3) определён член с $\delta m_i(R, t)/m_i(R, t)$ (согласно метеорологическим данным наблюдений с помощью теории метеорологических эффектов [14]), был разработан спектрографический метод, позволяющий (при наличии данных наблюдений, как минимум, по трём вторичным компонентам КЛ с различными функциями связи) путём решения системы уравнений типа (3) определить для каждого момента времени $\delta R_k(t)$, $a(t)$ и $b(t)$.

Иногда поправки на метеорологические эффекты ввести не удаётся, особенно для периодов сильных ветров (когда вследствие эффекта Бернулли искажаются показания барометра), обильных снегопадов и при отсутствии данных температурного зондирования. Поскольку тогда число неизвестных существенно увеличивается (добавляются изменение барометрического давления δh_0 , толщина выпавшего снега δS , изменение вертикального температурного разреза атмосферы $\delta T(h, t)$, изменение разреза влажности $\delta e(h, t)$ и атмосферного электрического поля $\delta E(h, t)$), для решения обратной задачи необходимо использовать достаточно большое число вторичных компонент КЛ с различными функциями связи. С этой целью мной был разработан так называемый обобщённый спектрографический метод. Детальное описание этих двух методов дано в книге [2, гл. 3].

В настоящее время широкое распространение получил также глобально-спектрографический метод, позволяющий с помощью сферического анализа данных наблюдений вариаций КЛ мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов с учётом траекторий частиц в геомагнитном поле определять распределение первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли (см. детальное описание в [2, гл. 3]).

3. Космические лучи в земной атмосфере

Проблема космических лучей в земной атмосфере имеет два аспекта.

Первый аспект: как атмосфера влияет на КЛ галактического и солнечного происхождения. Воздействию атмосферы подвержены:

1) каскадные процессы КЛ в атмосфере и формирование различных вторичных компонент (это определяет функции связи и интегральные кратности) (см. [5–7] и детальный обзор в монографии [2, гл. 3]);

2) метеорологические эффекты КЛ (эффекты атмосферного электрического поля [15], барометрический, ветра и снега, температурный, влажности и гравитационный) (см. [1, 14] и детальный обзор в [2, главы 5–9]).

Второй аспект: как КЛ галактического и солнечного происхождения влияют на земную атмосферу и различные процессы в ней. Это влияние осуществляется через следующие процессы:

1) ядерные реакции первичных и вторичных КЛ с веществом воздуха и аэрозолей с образованием многих радиоактивных и стабильных изотопов, в том числе исключительно важных для исследований КЛ, существовавших в далёком прошлом, ^{14}C (радиоуглерода) и ^{10}Be (см. [16–24] и детальный обзор в [2, главы 10 и 17]);

2) генерацию космическими лучами в атмосфере вторичных релятивистских электронов и широких атмосферных ливней (ШАЛ), играющих ключевую роль в явлениях атмосферного электричества, таких как грозовые бури, молниевые разряды, формирование электрического зарядового баланса Земли (см. [25–32] и детальный обзор в [2, гл. 11]);

3) ионизацию воздуха с существенным влиянием на нижнюю ионосферу и распространение радиоволн, а также на формирование облаков и, следовательно, на изменение климата и производство сельскохозяйственной продукции (см. [33, 34], а также [2, главы 12, 14]). Следует подчеркнуть, что поскольку мы теперь знаем, как предсказывать вариацию интенсивности галактических КЛ на несколько лет вперед (вплоть до 11 лет), то становится возможным предсказывать также изменение части глобального климата, обусловленной долговременной вариацией интенсивности КЛ [35–39].

4) химические реакции, индуцированные взаимодействием галактических и солнечных КЛ с атмосферой, включая образование нитратов и влияние на озоновый слой (см. расширенный обзор в [2, гл. 13]).

4. Вариации космических лучей и магнитосфера Земли

В магнитосфере Земли сейчас находится огромное число спутников, играющих исключительно важную роль в нашей жизни: телевидение, связь, навигация и многое другое. Особенно важна система GPS (Global Positioning System), использующая мировую сеть спутников. Спутники обычно проводят несколько лет на разных орбитах, подвергаясь кратковременным и долговременным воздействиям солнечных и галактических КЛ и многих других факторов космической погоды. Конечно, все спутники застрахованы, так что в связи с воздействием аномалий (особенно сильных, вызывающих сильные повреждения спутников, вплоть до их полного выхода из строя) страховые компании выплачивают ежегодно многие сотни миллионов долларов. Можно ли предсказывать периоды, в которые аномалии ожидаются с большой вероятностью и можно ли что-то сделать для их предотвращения? Для того чтобы ответить на этот вопрос, международный коллектив исследователей из Италии, России, Казахстана, Украины и Израиля проанализировал огромный массив данных по всем известным аномалиям (всего около 6000) в зависимости от орбит спутников (высота и наклонение к экватору) и условий космической погоды [39–48] (см. также краткий обзор в монографии [2, гл. 18, раздел 18.17]), а именно:

1) интенсивность солнечных и галактических КЛ по данным измерений на мировой сети нейтронных мониторов;

2) потоки протонов (> 10 МэВ и > 60 МэВ) и электронов (> 2 МэВ) по данным измерений на спутниках;

3) параметры солнечной активности: числа солнечных пятен, потоки радиоизлучения на частоте 2800 МГц (10,7 см);

4) параметры геомагнитной активности — индексы Ap, AE и Dst.

В качестве примера на рис. 1, 2 показано как возрастает частота аномалий с увеличением потока энергичных протонов для спутников на различных орбитах. Если с большой вероятностью ожидается аномалия, способная расстроить нормальную работу спутника, то эксперты должны что-то предпринять. Например, в случае ожидаемого резкого возрастания ионизации (при больших потоках протонов (см. рис. 1 и 2)), можно на короткое время обесточить особенно важные участки электронной аппаратуры, для того чтобы избежать её повреждений вследствие электрических разрядов вдоль треков энергичных частиц.

Магнитосфера Земли вместе с основным геомагнитным полем формирует траектории первичных КЛ, приёмные конусы и жёсткости обрезания КЛ (см. расширенный обзор в [4, гл. 4]). Изменение магнитного поля Земли обусловлено долговременными вариациями основного геомагнитного поля (внутренние источники) и электрическими токами в магнитосфере и ионосфере. Важно, что по данным наблюдений интенсивности КЛ на мировой сети станций можно с помощью упомянутого выше спектрографического метода определять планетарное распре-

деление изменений жёсткости геомагнитного обрезания КЛ $(\delta R_k)_{\text{obs}}$ для любого момента времени (особенно в периоды магнитных бурь, когда эти изменения очень велики). Эта информация вместе с данными о вариациях геомагнитного поля позволяет определить параметры токового кольца и их изменение со временем (основная причина Dst-вариации), а также токов магнитопаузы. Это было сделано в [49–68] (см. расширенный обзор в [4, гл. 6]). С другой стороны, в рамках любой теоретической модели магнитосферы (включая основное магнитное поле Земли) для любого момента времени с помощью траекторных расчётов может быть вычислено ожидаемое планетарное распределение жёсткостей геомагнитного обрезания КЛ $(\delta R_k)_{\text{theor}}$. Сравнивая планетарные распределения $(\delta R_k)_{\text{obs}}$ и $(\delta R_k)_{\text{theor}}$ можно оценить, какая из теоретических моделей магнитосферы наиболее адекватно описывает реальность; это может быть сделано не только с помощью галактических, но и солнечных КЛ [69–89] (см. также расширенный обзор в [4, гл. 7]).

5. Вариации космических лучей и радиационная опасность от энергичных частиц солнечных вспышек

Хорошо известно, что события солнечных КЛ в начальной стадии являются сильноанизотропными, особенно во время больших событий, таких как события, произошедшие в феврале 1956 г., июле 1959 г., августе 1972 г., сентябре–октябре 1989 г., июле 2000 г., январе 2005 г. и др. [1, 90–95]. В этих случаях для определения на основе наблюдений вариаций КЛ свойств солнечных первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли (с помощью спектрографического метода и функций связи), а затем определения функции источника солнечных КЛ на Солнце и параметров их распространения в межпланетном пространстве (путём решения обратной задачи) необходимы одномоментные данные интенсивности КЛ одновременно на многих станциях мировой сети в реальном масштабе времени. Надо сказать, что эта проблема является чрезвычайно сложной как с теоретической точки зрения (необходимо решение обратных задач в рамках кинетического уравнения Больцмана и уравнения Фоккера–Планка для анизотропной диффузии (см. возможные пути приближённого решения этой задачи в книге [3, гл. 2])), так и с экспериментальной (фактически необходимо создание Мировой службы вариаций КЛ, подобной Мировой метеорологической службе; надо сказать, что в этом направлении предпринимаются большие усилия и в течение последних нескольких лет удалось создать Европейскую часть такой службы — NMDB (Neutron Monitor Data Base), в работе которой кроме ряда европейских стран участвуют Армения, Казахстан и Израиль).

С помощью процедуры, развитой в [96–100], для каждой станции КЛ может быть автоматически определено начало возрастания солнечных КЛ, а затем с помощью спектрографического метода и функций связи для различных моментов времени можно определить спектр солнечных КЛ за пределами земной атмосферы, а потом и за пределами магнитосферы Земли (с учётом влияния геомагнитного поля на траектории частиц). На основе такого огромного экспериментального материала в рамках теории анизотропного распространения солнечных КЛ может быть решена обратная задача [101].

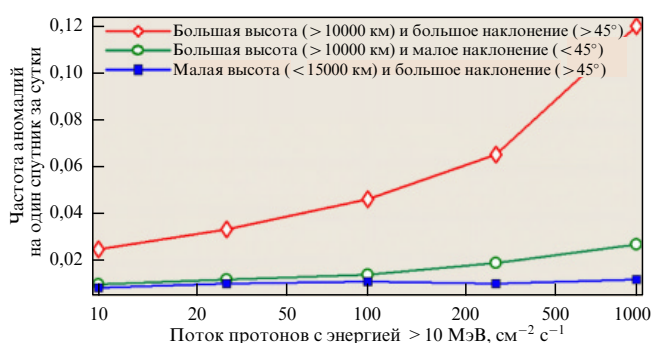


Рис. 1. Средняя частота аномалий спутников на разных орбитах в первые двое суток возрастания потока протонов с энергией более 10 МэВ в зависимости от потока протонов в максимуме его возрастания.

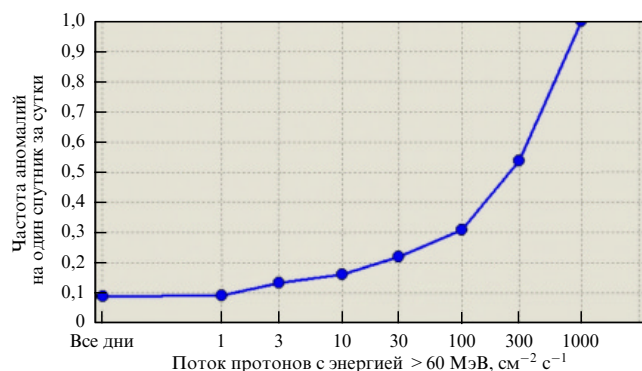


Рис. 2. Частота аномалий спутников на орбитах с большой высотой (> 10000 км) и большим наклонением ($> 45^\circ$) в зависимости от потока протонов с энергией более 60 МэВ.

Однако следует учесть, что через одно-два рассеяния (т.е. через 10–15 мин после начала события) распределение солнечных КЛ становится практически изотропным, так что временной ход интенсивности солнечных КЛ на станциях будет различаться только за счёт различия в функциях связи и жёсткостях геомагнитного обрезания. Итак, мы будем опираться на два следующих хорошо установленных факта:

а) время ускорения частиц на Солнце и их инжекции в солнечный ветер очень мало по сравнению со временем их распространения до Земли, так что функция источника солнечных КЛ в зависимости от времени может рассматриваться как δ -функция;

б) резко анизотропное распределение солнечных КЛ в начальной стадии события с течением времени после нескольких рассеяний в межпланетном пространстве становится практически изотропным (хорошо известные примеры событий в феврале 1956 г., в сентябре 1989 г. и многие другие).

Поэтому сейчас (пока ещё не создана Мировая служба космических лучей, собирающая одномоментные данные наблюдений с многих станций мировой сети в реальном масштабе времени) мы основываемся на решении обратной задачи в рамках простой модели изотропной диффузии солнечных КЛ в межпланетном пространстве (в этом случае достаточно использовать данные наблюдений нескольких вторичных компонент КЛ на одной или на очень небольшом числе станций). Итак, рассмотрим изотропную диффузию с точечным мгновенным источником, т.е. с функцией источника в виде

$$Q(R, r, t) = N_0(R) \delta(r) \delta(t). \quad (14)$$

Коэффициент диффузии выберем зависящим от жёсткости частиц R и расстояния от Солнца r :

$$\kappa(R, r) = \kappa_1(R) \left(\frac{r}{r_1} \right)^\beta, \quad (15)$$

где $r_1 = 1$ а.е. — радиус земной орбиты. В этом случае решение диффузионного уравнения Фоккера–Планка для дифференциальной плотности солнечных КЛ $N(R, r, t)$ согласно [101] имеет вид

$$N(R, r, t) = \frac{N_0(R) r_1^{3\beta/(2-\beta)} (\kappa_1(R) t)^{-3/(2-\beta)}}{(2-\beta)^{(4+\beta)/(2-\beta)} \Gamma(3/(2-\beta))} \times \exp \left(- \frac{r_1^\beta r^{2-\beta}}{(2-\beta)^2 \kappa_1(R) t} \right), \quad (16)$$

где t — время с момента инжекции солнечных КЛ в солнечный ветер. Для решения обратной задачи нам надо найти по данным наблюдений $N(R, r, t)$ четыре неизвестных параметра: время инжекции солнечных КЛ в солнечный ветер (по мировому времени UT) T_e , β , $\kappa_1(R)$, $N_0(R)$. Это означает, что мы должны иметь данные наблюдений КЛ, по крайней мере, на четыре момента времени. Предположим, что согласно наземным и спутниковым измерениям на расстоянии от Солнца $r = r_1 = 1$ а.е. определены дифференциальные плотности КЛ $N_1(R)$, $N_2(R)$, $N_3(R)$, $N_4(R)$ в моменты мирового времени T_1 , T_2 , T_3 , T_4 . В этом случае моменты времени после инжекции солнечных КЛ в солнечный

ветер:

$$\begin{aligned} t_1 &= T_1 - T_e = x, & t_2 &= T_2 - T_1 + x, \\ t_3 &= T_3 - T_1 + x, & t_4 &= T_4 - T_1 + x. \end{aligned} \quad (17)$$

Для каждой измеренной плотности КЛ $N_i(R, r = r_1, T_i)$ мы получим согласно (16) и (17)

$$\begin{aligned} N_i(R, r = r_1, T_i) &= \\ &= \frac{N_0(R) r_1^{3\beta/(2-\beta)} (\kappa_1(R) (T_i - T_1 + x))^{-3/(2-\beta)}}{(2-\beta)^{(4+\beta)/(2-\beta)} \Gamma(3/(2-\beta))} \times \\ &\times \exp \left(- \frac{r_1^2 (2-\beta)^{-2}}{\kappa_1(R) (T_i - T_1 + x)} \right), \end{aligned} \quad (18)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$. Для определения x шаг за шагом будем исключать неизвестные $N_0(R)$, $\kappa_1(R)$ и затем β . Вначале исключим $N_0(R)$ путём формирования из четырёх уравнений типа (18) трёх следующих уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{N_1(R, r = r_1, T_1)}{N_i(R, r = r_1, T_i)} &= \left(\frac{x}{T_i - T_1 + x} \right)^{-3/(2-\beta)} \times \\ &\times \exp \left[- \frac{r_1^2}{(2-\beta)^2 \kappa_1(R)} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{T_i - T_1 + x} \right) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

где $i = 2, 3, 4$. Для исключения $\kappa_1(R)$ прологарифмируем левую и правую части уравнений (19) и затем разделим одно уравнение на другое. В результате получим следующие два уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\ln(N_1/N_2) + [3/(2-\beta)] \ln [x/(T_2 - T_1 + x)]}{\ln(N_1/N_3) + [3/(2-\beta)] \ln [x/(T_3 - T_1 + x)]} &= \\ &= \frac{1/x - 1/(T_2 - T_1 + x)}{1/x - 1/(T_3 - T_1 + x)}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\ln(N_1/N_2) + [3/(2-\beta)] \ln [x/(T_2 - T_1 + x)]}{\ln(N_1/N_4) + [3/(2-\beta)] \ln [x/(T_4 - T_1 + x)]} &= \\ &= \frac{1/x - 1/(T_2 - T_1 + x)}{1/x - 1/(T_4 - T_1 + x)}. \end{aligned} \quad (21)$$

После исключения из уравнений (20) и (21) неизвестного параметра β , мы получим уравнение для определения x :

$$\begin{aligned} x^2(a_1 a_2 - a_3 a_4) + x d(a_1 b_2 + b_1 a_2 - a_3 b_4 - b_3 a_4) + \\ + d^2(b_1 b_2 - b_3 b_4) = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$d = (T_2 - T_1)(T_3 - T_1)(T_4 - T_1), \quad (23)$$

$$a_1 = (T_2 - T_1)(T_4 - T_1) \ln \frac{N_1}{N_3} - (T_3 - T_1)(T_4 - T_1) \ln \frac{N_1}{N_2}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} a_2 &= (T_3 - T_1)(T_4 - T_1) \ln \frac{x}{T_2 - T_1 + x} - \\ &- (T_2 - T_1)(T_3 - T_1) \ln \frac{x}{T_4 - T_1 + x}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$a_3 = (T_2 - T_1)(T_3 - T_1) \ln \frac{N_1}{N_4} - (T_3 - T_1)(T_4 - T_1) \ln \frac{N_1}{N_2}, \quad (26)$$

$$a_4 = (T_3 - T_1)(T_4 - T_1) \ln \frac{x}{T_2 - T_1 + x} - (T_2 - T_1)(T_4 - T_1) \ln \frac{x}{T_3 - T_1 + x}, \quad (27)$$

$$b_1 = \ln \frac{N_1}{N_3} - \ln \frac{N_1}{N_2},$$

$$b_2 = \ln \frac{x}{T_2 - T_1 + x} - \ln \frac{x}{T_4 - T_1 + x}, \quad (28)$$

$$b_3 = \ln \frac{N_1}{N_4} - \ln \frac{N_1}{N_2},$$

$$b_4 = \ln \frac{x}{T_2 - T_1 + x} - \ln \frac{x}{T_3 - T_1 + x}. \quad (29)$$

Как можно видеть из (25) и (27)–(29), коэффициенты a_2 , a_4 , b_2 , b_4 очень слабо (логарифмически) зависят от x . Поэтому мы решаем уравнение (22) итерационным методом: в качестве первого приближения выбираем $x_1 = T_1 - T_e \approx 500$ с (что соответствует минимальному времени распространения релятивистских частиц от Солнца до Земли без рассеяния). Затем с помощью (25) и (27)–(29) определяем $a_2(x_1)$, $a_4(x_1)$, $b_2(x_1)$, $b_4(x_1)$ и с помощью (22) находим второе приближение x_2 . Подставляя x_2 в (25), (27)–(29), находим $a_2(x_2)$, $a_4(x_2)$, $b_2(x_2)$, $b_4(x_2)$ и с помощью (22) определяем третье приближение x_3 и т.д. После определения x мы с помощью (17) находим t_1 , t_2 , t_3 , t_4 . После этого легко находятся неизвестные параметры β , $\kappa_1(R)$, $N_o(R)$. Параметр β мы определяем из уравнений (20) и (21):

$$\beta = 2 - 3 \left[\ln \frac{t_2}{t_1} - \frac{t_3(t_2 - t_1)}{t_2(t_3 - t_1)} \ln \frac{t_3}{t_1} \right] \times$$

$$\times \left[\ln \frac{N_1}{N_2} - \frac{t_3(t_2 - t_1)}{t_2(t_3 - t_1)} \ln \frac{N_1}{N_3} \right]^{-1}. \quad (30)$$

Затем мы находим параметр $\kappa_1(R)$ из уравнения (19):

$$\kappa_1(R) = \frac{r_1^2(t_1^{-1} - t_2^{-1})}{3(2 - \beta) \ln(t_2/t_1) - (2 - \beta)^2 \ln(N_1/N_2)} =$$

$$= \frac{r_1^2(t_1^{-1} - t_3^{-1})}{3(2 - \beta) \ln(t_3/t_1) - (2 - \beta)^2 \ln(N_1/N_3)}. \quad (31)$$

После определения параметров β и $\kappa_1(R)$ мы можем найти последний неизвестный параметр $N_o(R)$ из уравнения (18):

$$N_o(R) = N_i(2 - \beta)^{(4+\beta)/(2-\beta)} \Gamma\left(\frac{3}{2-\beta}\right) r_1^{-3\beta/(2-\beta)} \times$$

$$\times (\kappa_1(R) t_i)^{3/(2-\beta)} \exp\left(\frac{r_1^2}{(2-\beta)^2 \kappa_1(R) t_i}\right), \quad (32)$$

где $i = 1, 2$ или 3 .

Итак, по найденному x мы определяем время инжекции $T_e = T_1 - x$, а затем переходим от мирового времени наблюдений T ко времени после инжекции $t = T - T_e$. Теперь, подставляя найденные параметры β , $\kappa_1(R)$,

$N_o(R)$ в уравнение (16), легко предсказать, как будет меняться со временем дифференциальная плотность солнечных КЛ $N_o(R, r, t)$ на любом расстоянии от Солнца.

Описанные выше результаты мы использовали в методе предсказания и оценки ожидаемой радиационной опасности по одномоментным данным наземных и спутниковых наблюдений интенсивности КЛ в реальном масштабе времени [99, 100]. Для контроля метода и оценки того, сколько минут наблюдений после начала события требуется для того, чтобы достаточно точно предсказать ожидаемый ход интенсивности солнечных КЛ, мы использовали одномоментные данные нейтронного монитора на вершине горы Гран Сассо в Италии, а также одномоментные спутниковые данные о потоках протонов с энергией $\geq 0,1$ ГэВ во время сильноанизотропного события солнечных КЛ в сентябре 1989 г. Важно, что нейтронный монитор детектировал не только полную интенсивность нейтронов, но также кратности (≥ 1 , ≥ 2 , ≥ 3 и т.д., вплоть до ≥ 8), имеющие различные функции связи (см. формулы (7)–(11)). Это позволило с учётом спутниковых данных для каждой минуты наблюдений с помощью спектрографического метода и функций связи определить спектр солнечных КЛ за пределами магнитосферы, т.е. функции $N_i(R, r = r_1, T_i)$. Далее по описанной выше процедуре находились неизвестные параметры x , β , $\kappa_1(R)$, $N_o(R)$, а затем по уравнению (16) определялся ожидаемый ход интенсивности солнечных КЛ в межпланетном пространстве на орбите Земли. С помощью функций связи и интегральных кратностей генерации согласно формулам (1) или (3) производится пересчёт к наблюдениям на нейтронном мониторе или на спутнике GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite).

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты такого сравнения для нейтронного монитора. Из рисунка видно, что для получения надёжного и достаточно точного предсказания временного хода интенсивности солнечных КЛ (а следовательно, и уровня радиационной опасности) даже в случае сильноанизотропного события достаточно в первом приближении около 15 мин от начала возрастания, а для получения довольно точного предсказания — около 35 мин. Около 45 мин требуется для предсказания на всё время события (около 2–3 сут) временного хода интенсивности солнечных КЛ в области малых энергий (около 100 МэВ) по данным спутников. За это время происходит несколько рассеяний солнечных КЛ в межпланетном пространстве, что приводит к практически полной изотропизации направлений прихода солнечных КЛ к Земле.

6. Заключение

В течение многих лет наука о вариациях космических лучей, относящаяся к области между ядерной физикой, астрофизикой, физикой Солнца, гелиосферы и магнитосферы, геофизики и метеорологии, имела в основном чисто фундаментальный характер. Лишь в последние 15–20 лет в связи с освоением космоса, развитием космонавтики, широким использованием искусственных спутников, созданием системы GPS, развитием авиалиний на высотах около 10 км и особенно в связи с бурным развитием микроэлектроники (уязвимой для космической радиации) стали интенсивно развиваться приклад-

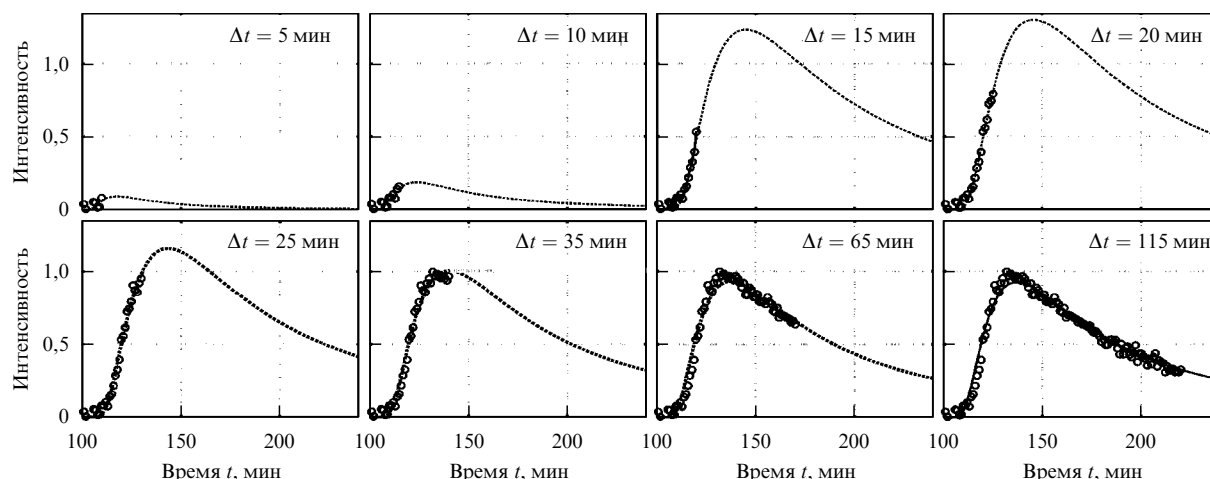


Рис. 3. Результаты вычисления параметров χ , β , $\kappa_1(R)$, $N_0(R)$ по первым 5, 10, 15, ... минутам наблюдений на нейтронном мониторе ($\Delta t = 5$ мин, $\Delta t = 10$ мин, $\Delta t = 15$ мин, ...) и расчёта по формуле (16) ожидаемого временного хода интенсивности солнечных КЛ с последующим пересчётом с помощью функций связи к ожидаемой вариации скорости счёта в нейтронном мониторе. Единица измерения по оси ординат соответствует наблюдаемому максимуму возрастания интенсивности потока солнечных КЛ по данным нейтронного монитора на вершине горы Гран Сассо. По оси абсцисс отложено время t в минутах от 10.00 UT 29 сентября 1989 г.

ные аспекты вариаций КЛ, тем более что теперь для этого, кроме созданной ещё около 50–60 лет назад мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов, имеются доступные благодаря Интернету одноминутные спутниковые данные об интенсивности КЛ в области малых и очень малых энергий. Описанные выше методы имеют важные перспективы развития для использования в самой начальной, анизотропной, части возрастаний солнечных КЛ [101]. В этом случае с созданием в ближайшем будущем Мировой службы вариаций КЛ (как мы отмечали выше, первый шаг уже сделан, в последние два года была создана её Европейская часть, которая успешно функционирует) можно будет делать предсказания временного изменения радиационной дозы на период около двух суток не после 20–40 мин от начала события (как было описано выше), а значительно раньше, после 5–15 мин от начала события [101], что может иметь большое прикладное значение. Более того, создание полномасштабной Мировой службы вариаций КЛ позволит по изменению со временем углового и энергетического распределения галактических КЛ за пределами магнитосферы Земли, определяемому с помощью упомянутого выше глобально-спектрографического метода на основе одночасовых значений интенсивности КЛ на мировой сети станций (см. [3, гл. 3]), предсказывать подход к Земле мощных ударных волн и извержений корональных масс (Coronal Mass Ejection, CME), вызывающих большие магнитные бури, опасные для здоровья людей (возрастание частоты инсультов, инфарктов миокарда, автомобильных катастроф с тяжёлым исходом) и ответственные за возникновение определённой части аномалий (неисправностей) в работе спутников [42–48] и больших индукционных токов на высоких широтах, нарушающих работу электрических силовых сетей высокого напряжения и магистральных трубопроводов [42, 102]. К сожалению, в кратком сообщении мы не имели возможности остановиться более подробно на этом важном аспекте использования вариаций КЛ, но планируем в ближайшем будущем посвятить этой проблеме отдельную статью.

Список литературы

1. Дорман Л И *Вариации космических лучей* (М.: Гостехтеориздат, 1957) [Dorman L I *Cosmic Ray Variations* (Washington, DC: US Department of Defence, Ohio Air-Force Base, 1957)]
2. Dorman L I *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004)
3. Dorman L I *Cosmic Ray Interactions, Propagation, and Acceleration in Space Plasmas* (Dordrecht: Springer, 2006)
4. Dorman L I *Cosmic Rays in Magnetospheres of the Earth and other Planets* (Dordrecht: Springer, 2009)
5. Dorman L I, Yanke V G, in *Proc. of the 17th Intern. Cosmic Ray Conf., Paris, France* Vol. 4 (1981) p. 326
6. Dorman L I, Yanke V G, V K Korotkov V K, in *Proc. 17th of the Intern. Cosmic Ray Conf., Paris, France* Vol. 4 (1981) p. 330
7. Clem J M, Dorman L I *Space Sci. Rev.* **93** 335 (2000)
8. Aleksanyan T M, Dorman L I, Yanke V G, Korotkov V K, in *Proc. of the 19th Intern. Cosmic Ray Conf., La Jolla, USA* Vol. 5 (1985) p. 300
9. Moraal H et al. *J. Geophys. Res.* **94** (A2) 1459 (1989)
10. Dorman L I et al. *J. Geophys. Res.* **105** (A9), 21047 (2000)
11. Dorman L I, in *Proc. of the 11th Intern. Cosmic Ray Conf., Budapest, Invited Papers and Rapporteur Talks* (1969) p. 381
12. Дорман Л И и др. *Эффективные жесткости обрезания космических лучей* (М.: Наука, 1972)
13. Dorman L I *Cosmic Rays: Variations and Space Explorations* (Amsterdam: North-Holland, 1974)
14. Дорман Л И *Метеорологические эффекты космических лучей* (М.: Наука, 1972)
15. Dorman L I et al. *J. Geophys. Res.* **108** (A5) 1181 (2003)
16. Dorman L I, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv* Vol. 4 (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 374
17. Dorman L I, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv* Vol. 4 (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 378
18. Dorman L I, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv* Vol. 4 (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 383
19. Dorman L I, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv* Vol. 4 (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 387
20. Dorman L I, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv* Vol. 4 (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 395

21. Dorman L I, in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv Vol. 4* (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 400
22. Дорман Л И, в сб. *Труды 6-го Всесоюз. совещ. по проблеме "Астрофизические явления и радиоуглерод"*, Тбилиси, 1976 (Тбилиси: Изд-во Тбил. ун-та, 1978) с. 49
23. Dorman L I, in *Towards the Millennium in Astrophysics: Problems and Prospects. Intern. School of Cosmic Ray Astrophysics 10th Course, Erice, Italy, 1996* (Eds M M Shapiro, R Silberberg, J P Wefel) (Singapore: World Scientific, 1998) p. 303
24. Dorman L I, in *Towards the Millennium in Astrophysics: Problems and Prospects. Intern. School of Cosmic Ray Astrophysics 10th Course, Erice, Italy, 1996* (Eds M M Shapiro, R Silberberg, J P Wefel) (Singapore: World Scientific, 1998) p. 323
25. Gurevich A V, Zybin K P, Roussel-Dupre R *Phys. Lett. A* **165** 463 (1992)
26. Gurevich A V, Zybin K P, Roussel-Dupre R *Phys. Lett. A* **254** 79 (1999)
27. Gurevich A V, Milikh G M *Phys. Lett. A* **262** 457 (1999)
28. Gurevich A V et al. *Phys. Lett. A* **282** 180 (2001)
29. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **171** 1177 (2001) [Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **44** 1119 (2001)]
30. Ermakov V I, Stozhkov Y I, in *Proc. 11th Intern. Conf. Atmospheric Electricity, Alabama, USA* (1999) p. 242
31. Ермаков В И, Стожков Ю И "Механизм образования электричества грозных облаков", Препринт № 25 (М.: ФИАН, 2002)
32. Ermakov V I, Stozhkov Y I, in *Proc. 28th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba Vol. 7* (2003) p. 4157
33. Велинов П, Несторов Г, Дорман Л *Воздействие космических лучей на ионосферу и распространение радиоволн* (София: Изд-во Бол. акад. наук, 1974)
34. Dorman L I, in *Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth* (Ed. T M Letcher) (Amsterdam: Elsevier, 2009) p. 43
35. Dorman L I *Ann. Geophys.* **23** 3003 (2005)
36. Dorman L I, in *Proc. of the 18th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Visby, Sweden, 3–7 June 2007* (ESA SP-647, Ed. L Conroy) (Noordwijk: ESTEC, 2007)
37. Dorman L I *Adv. Space Res.* **35** 496 (2005)
38. Belov A V et al. *Adv. Space Res.* **35** 491 (2005)
39. Dorman L I *Adv. Space Res.* **37** 1621 (2006)
40. Dorman L I, in *Proc. of the 26th Intern. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, Utah, USA August 17–25, 1999 Vol. 6* (Eds D Kieda, M Salamon, B Dingus) (1999) p. 382
41. Dorman L I, in *European Rocket and Balloon Programs and Related Research: Proc. of the 14th European Space Agency Symp., Potsdam, Germany, 31 May–3 June 1999* (ESA-SP, Vol. 437, Ed. B Schürmann) (1999) p. 207
42. Dorman L I, in *Proc. of the 22nd ISTC Japan Workshop on Space Weather Forecast in Russia/CIS Vol. 2* (Ed. Y Muraki) (Nagoya: Nagoya Univ., 2002) p. 133
43. Belov A et al., in *Proc. of the 28th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, Japan, July 31–August 7 Vol. 7* (Eds T Kajita et al.) (2003) p. 4213
44. Belov A et al., in *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure* (Ed. I A Daglis) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004) p. 147
45. Белов А В и др. *Геомагнетизм и аэронавигация* **44** 502 (2004) [Belov A V et al. *Geomagn. Aeron.* **44** 461 (2004)]
46. Dorman L I et al. *Ann. Geophys.* **23** 3009 (2005)
47. Dorman L I et al. *Adv. Space Res.* **36** 2530 (2005)
48. Iucci N et al. *Space Weather* **3** S01001 (2005)
49. Дорман Л И и др. *Изв. АН СССР, Сер. физ.* **32** 1896 (1968)
50. Дорман Л И и др., в сб. *Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца* Т. 20 (М.: Наука, 1971) с. 367
51. Дворников В М и др. *Изв. АН СССР, Сер. физ.* **36** 2427 (1972)
52. Dorman L I et al., in *Proc. of the 13th Intern. Cosmic Ray Conf., Denver, Colorado, USA Vol. 2* (1973) p. 1032
53. Dorman L I et al., in *Proc. of the 13th Intern. Cosmic Ray Conf., Denver, Colorado, USA Vol. 2* (1973) p. 1690
54. Dorman L I et al., in *Proc. of the 15th Intern. Cosmic Ray Conf., Plovdiv Vol. 3* (Budapest: Dept of Cosmic Rays Central Research. Institute for Physics of the Hungarian Acad. of Sci., 1977) p. 347
55. Debrunner H et al. *Planet. Space Sci.* **27** 577 (1979)
56. Dorman L I, Krestyannikov Yu Ya, Sergeev A V, in *Proc. of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan Vol. 3* (Eds S Miyake, N G Kaigi) (Tokyo: Inst. for Cosmic Ray Res., Univ. of Tokyo, 1979) p. 535
57. Дорман Л И и др., в сб. *Труды Международного семинара по космофизическим аспектам космических лучей, Алма-Ата*, (1980) с. 45
58. Dorman L I, Krestyannikov Yu Ya, Sergeev A V, in *Proc. of the 17th Intern. Cosmic Ray Conf., Paris, France Vol. 4* (1981) p. 241
59. Belov A V, Dorman L I, Yanke V G, in *Proc. of the 18th Intern. Cosmic Ray Conf., Bangalore Vol. 10* (1983) p. 144
60. Flückiger E O, Smart D F, Shea M A *J. Geophys. Res.* **91** (A7) 7925 (1986)
61. Flückiger E O, Shea M A, Smart D F, in *Proc. of the 20th Intern. Cosmic Ray Conf., Moscow Vol. 4* (1987) p. 216
62. Baisultanova L M, Belov A V, Dorman L I, Yanke V G, in *Proc. of the 20th Intern. Cosmic Ray Conf., Moscow Vol. 4* (1987) p. 231
63. Dvornikov V M, Sdobnov V E, Sergeev A V, in *Proc. of the 20th Intern. Cosmic Ray Conf., Moscow Vol. 4* (1987) p. 220
64. Flückiger E O, Smart D F, Shea M A *J. Geophys. Res.* **95** (A2) 1113 (1990)
65. Baisultanova L M, Belov A V, Yanke V G, in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy, August 28–September 8 Vol. 4* (Eds N Inucci, E Lamanna) (1995) p. 1090
66. Boberg P R et al. *Geophys. Res. Lett.* **22** 1133 (1995)
67. Danilova O A, Tyasto M I, in *Proc. of the 24th Intern. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy, August 28–September 8 Vol. 4* (Eds N Inucci, E Lamanna) Vol. 4 (1995) p. 1066
68. Bobik P, Kudela K, Usoskin I, in *Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, 7–15 August Vol. 10* (2001) p. 4056
69. Belov A et al. *J. Geophys. Res.* **110** (A9) A09S20 (2005)
70. Desorgher L "MAGNETOCOSMICS: Geant4 application for simulating the propagation of cosmic rays through the Earth's magnetosphere", <http://reat.space.qinetiq.com/septimes/magcos/> (2004)
71. Flückiger E O et al. "The ground level enhancement on January 20, 2005, in the context of extreme solar cosmic ray particle events and geomagnetic super storms", *AOGS-2006 Abstract 59-ST-A1215*, Singapore (2006)
72. Smart D F, Shea M A *Adv. Space Res.* **28** 1733 (2001)
73. Smart D F, Shea M A, Flückiger E O *Space Sci. Rev.* **93** 305 (2000)
74. Struminsky A, in *Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, 7–15 August, 2001 Vol. 9* (2001) p. 3558
75. Struminsky A, Manohar L, in *Proc. of the 27th Intern. Cosmic Ray Conf., Hamburg, Germany, 7–15 August, 2001 Vol. 10* (2001) p. 4052
76. Tsyganenko N A, Usmanov A V *Planet. Space Sci.* **30** 985 (1982)
77. Tsyganenko N A *Planet. Space Sci.* **35** 1347 (1987)
78. Tsyganenko N A *Planet. Space Sci.* **37** 5 (1989)
79. Stern D P, Tsyganenko N A *EOS Trans. AGU* **73** No. 46, 489, 493, 494 (1992)
80. Alexeev I I et al. *J. Geophys. Res.* **106** (A11) 25683 (2001)
81. Alexeev I I et al. *Space Sci. Rev.* **107** 7 (2003)
82. Мальцев Ю П, Остапенко А А *Геомагнетизм и аэронавигация* **41** 761 (2001) [Maltsev Yu P, Ostapenko A A *Geomagn. Aeron.* **41** 726 (2001)]
83. Maltsev Y, Ostapenko A *Ann. Geophys.* **22** 2989 (2004)
84. Tsyganenko N A *J. Geophys. Res.* **107** (A8) 1179 (2002)
85. Tsyganenko N A *J. Geophys. Res.* **107** (A8) 1176 (2002)
86. Tsyganenko N A, Sitnov M I *J. Geophys. Res.* **112** (A6) A06225 (2007)
87. Tsyganenko N A, Stern D P *J. Geophys. Res.* **101** (A12) 27187 (1996)
88. Tsyganenko N A, Singer H J, Kasper J C *J. Geophys. Res.* **108** (A5) 1209 (2003)
89. Tyasto M I et al. *Adv. Space Res.* **42** 1556 (2008)
90. Dorman L I *Geophysical and Astrophysical Aspects of Cosmic Rays* (Progress in Physics of Cosmic Ray and Elementary Particles, Vol. 7, Eds J G Wilson, S A Wouthuysen) (Amsterdam: North-Holland, 1963) p. 1
91. Дорман Л И *Вариации космических лучей и исследование космоса* (М.: Наука, 1963)
92. Дорман Л И *Ускорительные процессы в космосе* (М.: ВИНТИ, 1972)
93. Дорман Л И *Космические лучи солнечного происхождения* (М.: ВИНТИ, 1978)

94. Дорман Л И, Мирошниченко Л И *Солнечные космические лучи* (М.: Физматгиз, 1968) [Dorman L I, Miroshnichenko L I *Solar Cosmic Rays* (Washington, DC: NASA, 1976)]
95. Miroshnichenko L I *Solar Cosmic Rays* (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001)
96. Dorman L, Zukerman I *Adv. Space Res.* **31** 925 (2003)
97. Dorman L I, in *Proc. of the 29th Intern. Cosmic Ray Conf., Pune, India, August 3–10, 2005* Vol. 1 (Eds B S Acharya et al.) (Mumbai: Tata Inst. of Fundamental Res., 2005) p. 281
98. Dorman L I "Using cosmic rays for monitoring and forecasting dangerous solar flare events", in *Neutrinos and Explosive Events in the Universe* (Eds M M Shapiro, T Stanev, J P Wefel) (Dordrecht: Springer, 2005) p. 131
99. Dorman L I, in *Proc. of the 17th ESA Symp. on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Sanefjord, Norway, 2005* (Ed. B Warmbein) (Noordwijk: ESA Publ. Division, 2005) p. 219
100. Dorman L I et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1478 (2004)
101. Dorman L I, in *Proc. of the 30th Intern. Cosmic Ray Conf., Merida, Mexico, July 3–11* Vol. 1 (Eds R Caballero et al.) (Mexico City: Univ. Nacional Autónoma de México, 2008) p. 175
102. Dorman L I et al., in *Proc. of the 28th Intern. Cosmic Ray Conf., Tsukuba, Japan, July 31–August 7* Vol. 6 (Eds T Kajita et al.) (2003) p. 3553

PACS numbers: 92.60.Pw, 93.85.Jk, 94.20.Ss
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005h.0527

Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи

Е.А. Мареев

1. Введение

Атмосфера — это наиболее подвижная и уязвимая из оболочек Земли, формирующих среду обитания человека, поэтому физика атмосферных процессов привлекает всё возрастающее внимание в связи с проблемами экологии, прогноза погоды (в том числе, космической), изучения климата. Вместе с тем атмосфера Земли представляет собой замечательный объект физико-математических исследований в области гидродинамики и теории турбулентности, теории динамических систем, оптики, физики космических лучей, атмосферного электричества [1–7]. Исследование атмосферного электричества, являясь одним из фундаментальных направлений атмосферной физики, в последнее время привлекает особое внимание в связи с появлением новых экспериментальных данных, полученных с помощью наземных и спутниковых наблюдений, баллонного зондирования, измерений на борту самолётов, экспериментов по инициированию грозового разряда (triggering lightning), лабораторного моделирования [7–9].

Новый импульс развитию представлений о грозовом электричестве дали наблюдения оптических явлений в верхней атмосфере, коррелирующих с грозовой активностью, — спрайтов (sprites), эльфов (elves) и джетов (jets) [8]. Отдельные проблемы физики грозового электричества обсуждались, в частности, в обзорах, опубликованных в *УФН* [10, 11]. Последние экспериментальные и

теоретические работы привели к более глубокому пониманию физических процессов и в классической области исследования атмосферного электричества — изучении глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Поэтому вполне закономерно появление ряда новых обзоров, посвящённых ГЭЦ, в ведущих зарубежных и отечественных журналах [12–15], хотя ни один из них не даёт целостной картины экспериментальных и теоретических достижений в данной области. В настоящем кратком сообщении, по сути, изложен развёрнутый план такого обзора.

2. Концепция глобальной электрической цепи. Наблюдения глобальной электрической цепи и её вариаций

Глобальная электрическая цепь — распределённый токовый контур, образованный высокопроводящими слоями верхнего слоя океана и земной коры и атмосферой, проводимость которой ничтожно мала в пограничном слое, но резко (экспоненциально) возрастает с увеличением высоты (рис. 1).

Согласно концепции Вильсона, сформулированной 90 лет назад [16], основными источниками электродвижущей силы (э.д.с.), поддерживающей потенциал ионосферы, служат облака, обладающие электрической структурой (прежде всего, кучево-дождевые и слоисто-дождевые), а зонами возвратных токов — области хорошей погоды (рис. 2). Как известно, фундаментальное экспериментальное подтверждение концепция Вильсона получила уже в конце 20-х годов XX в. при сравнении суточной вариации атмосферного электрического поля над океанами, измеренной в условиях хорошей погоды (так называемая кривая Карнеги (рис. 3)), с суточной вариацией количества грозовых событий на земном шаре [17]. Оказалось, что обе кривые имеют максимум при значении времени около 19–20 ч UT и минимум при значении около 4 ч UT, поэтому суточную вариацию атмосферного электрического поля и тока стали называть унитарной (см. широко известный раздел "Электричество атмосферы" в 5-м томе *Фейнмановских лекций по физике* [18]). Многочисленные последующие наземные измерения электрического поля и тока показали, однако, что при наблюдениях над сушей вблизи поверхности Земли целый ряд факторов затрудняет выделение унитарной

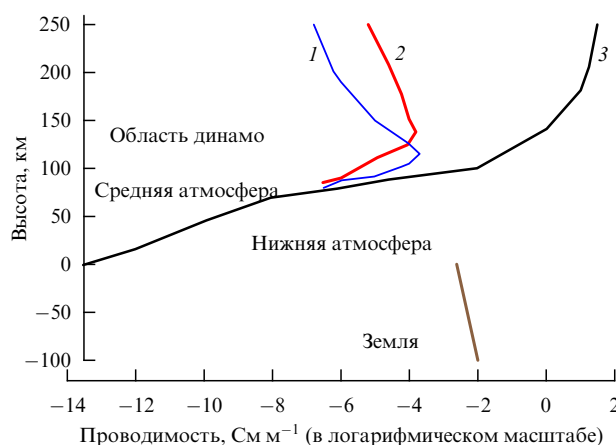


Рис. 1. Типичные профили поперечной (1 — холловской, 2 — педерсоновской) и продольной (3) проводимости ГЭЦ [13].

Е.А. Мареев. Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, РФ
E-mail: mareev@appl.sci-nnov.ru