

УДК 523.9, 551.509.336

**Л. И. Мирошниченко**

Институт земного магнетизма, ионосферы і поширення радіохвиль ім. М. В. Пушкова  
Російської академії наук, Тройцьк, Росія

## **ПРОБЛЕМА «СОЛНЦЕ — ЗЕМЛЯ»: СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ И ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ**

---

*Представлено короткий огляд сучасних даних і концепцій проблеми «Сонце — Земля», актуальних напрямків досліджень і передбачуваних механізмів сонячно-земних зв'язків. Ця широка область охоплює низку дуже важливих фундаментальних і прикладних проблем (фізика Сонця, динаміка міжпланетного середовища і властивості ближнього навколосонячного простору, космічна погода, радіаційна небезпека в космосі, функціонування космічних і наземних технологічних систем, геліобіологія та ін.). Сонячно-земна фізика в цілому також тісно пов'язана з деякими глобальними світоглядними проблемами. Приведено окремі найхарактерніші приклади сонячно-земних зв'язків.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Интерес к космическим влияниям на Землю был всегда [12], но лишь в середине 20-го века эта неопределенная область космофизики вооружилась запасом необходимых знаний и получила концептуальную основу [1, 2, 7]. Особое место в проблеме «Земля — Космос» занимают солнечно-земные связи (СЗС), которые, конечно, являются частью цепочки солнечно-планетных связей в целом. По существу речь идёт о воздействии центрального светила Солнечной системы на всю околосолнечную среду (гелиосферу), включая и нашу Землю. При таком подходе удаётся правильно понять место солнечно-земных связей в общей проблеме «Солнце — планеты». По понятным причинам, однако, проблема «Солнце — Земля» занимает исключительное место в космофизических и геофизических исследованиях, так как всё межпланетное и околоземное пространство представляют собой необходимую часть «среды обитания» для человечества.

### **ОСНОВНЫЕ ЭФФЕКТЫ**

Обычно в цепочке солнечно-земных связей рассматривают следующие каналы влияния Солнца

на Землю: 1) воздействие на магнитосферу и ионосферу; 2) солнечно-тропосферные связи; 3) гелиобиология (Солнце и биосфера); 4) солнечная активность и процессы в литосфере (неравномерность вращения Земли, сейсмические явления); 5) резонансная структура и ритмы Солнечной системы; 6) энергетический и информационный аспекты солнечно-земных связей.

Изучение отдельных звеньев солнечно-земных связей идёт, разумеется, в необходимом контексте с практическими (прогностическими) аспектами. И тут часто и неожиданно обнаруживаются нерешённые проблемы даже в таких, казалось бы, хорошо изученных областях, как механизмы взаимодействия в цепочке «солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера — атмосфера». Например, ещё в 1981 г. для описания взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой была предложена эмпирическая формула (параметр Акасофу [13]), которая позволила физически связать долю энергии, отбираемой магнитосферой у солнечного ветра (т. е. эффективность её передачи), с размерами магнитосферы, скоростью солнечного ветра, направлением и величиной межпланетного магнитного поля (ММП). Этот параметр даёт разумные оценки полной энергии, поступающей от солнечного ветра внутрь магнитосферы. Тем не менее, в последние годы применимость параметра Акасофу подвергается сомнению [14, 19]. Некоторые

исследователи считают, что для более точной оценки энергетического баланса магнитосферы необходимо учитывать эффект вязкого трения солнечного ветра с магнитосферой.

Более того, недавно было показано [11], что в прошлом роль скачков плотности солнечного ветра в геомагнитных возмущениях явно недооценивалась по сравнению с ролью скачков его скорости. Действительно, анализ предбуревых распределений параметров солнечного ветра даёт основания полагать, что плотность вносит основной вклад в изменения динамического давления солнечного ветра. Иными словами, плотность является важным геоэффективным фактором, сопровождающим начало бури, а скорость и направление вертикальной составляющей ММП ( $V_z$ ) влияют на интенсивность и последующее развитие магнитной бури. Можно даже предположить, что начало большинства бурь связано с изменением плотности солнечного ветра.

Значительное внимание в последние десятилетия обращается на ожидаемое или реально наблюдаемое воздействие геофизических возмущений на точность прецизионных физических измерений и лабораторных экспериментов [2], а также надёжность астрономических наблюдений [8]. Особое место занимает изучение гелиобиологических аспектов СЗС. При этом учитывается многофакторный характер проблемы, а также нестационарность и нелинейность так называемых магнитобиологических эффектов (МБЭ) [9], т. е. отклика биологических объектов на действие слабых естественных электромагнитных полей (ЭМП).

#### **ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ**

По современным представлениям физические механизмы и каналы воздействия солнечной активности (СА) отличаются большим разнообразием и сложностью. Некоторые механизмы СЗС взаимодействуют между собой, конкурируют или усиливают друг друга. Их далеко не полный перечень выглядит так: 1) электромагнитное излучение Солнца; 2) ударные волны в солнечном ветре; 3) ионизирующая радиация (галактические и солнечные космические лучи); 4) низкочас-

тотные пульсации магнитосферы; 5) генерация инфразвука в полярной атмосфере; 6) образование космогенных изотопов и нитратов; 7) триггерный механизм в различных явлениях СЗС; 8) резонансные связи в Солнечной системе и земных оболочках.

Среди физических агентов влияния рассматриваются в первую очередь полный поток солнечного излучения, электромагнитные волны и поля, солнечный ветер, энергичные солнечные частицы (солнечные космические лучи), а также галактические космические лучи (ГКЛ), космическая пыль и другие. При этом обсуждается применимость того или иного механизма к проблеме «Солнце — Земля». Принимаются также во внимание иерархия, нелинейный характер и реальная (или кажущаяся) неоднозначность СЗС. Большинство из действующих или предложенных механизмов всё ещё нуждаются в тщательной теоретической разработке, развитии и наблюдательном или экспериментальном подтверждении. Ниже приведены несколько характерных эффектов СЗС и дана их современная интерпретация с точки зрения возможных механизмов.

#### **СОЛНЕЧНО-ТРОПОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ**

Изменчивость земной погоды и долговременные колебания климата привлекают в последние десятилетия повышенное внимание астрономов и геофизиков. При этом исследования солнечно-тропосферных связей развиваются в нескольких направлениях: статистические данные, численное моделирование, физическое (лабораторное) моделирование на Земле и натурные эксперименты в околоземном пространстве.

Их результаты можно суммировать следующим образом.

1. Гелиосфера влияет на земной климат (солнечный ветер, ММП, космическая пыль и др.).
2. На климат могли влиять нерегулярные инверсии геомагнитного поля в далёком прошлом.
3. Есть аналогия с процессами, наблюдаемыми в камере Вильсона (образование капелек тумана вдоль следа проходящей заряженной частицы).
4. Важна нуклеация (конденсация паров воды), прежде всего на отрицательных зарядах в атмосфере.

5. Возможно искусственное влияние на осадки посредством ионизирующих излучений (экспериментальная метеорология).

6. Влияние ионизации на образование облаков может быть проверено в лабораторных условиях, как это делается в Институте оптики атмосферы в Томске [5], или на ускорителе заряженных частиц в ЦЕРНе (Experiment CLOUD [16]).

Рассмотрим воздействие солнечной активности на параметры атмосферы Земли на примере вариаций геопотенциала. Этот параметр описывает работу, совершаемую при поднятии единицы массы воздуха в поле силы тяжести Земли от исходного уровня с давлением  $P(0)$  на высоту с давлением  $P(h)$ . Пионерская работа [17] убедительно продемонстрировала изменения температуры в стратосфере, связанные с циклом солнечной активности. Были изучены среднегодовые значения высоты геопотенциальной поверхности с давлением 30 гПа над Гавайскими островами в субтропической зоне Тихого океана. Эти значения являются мерой среднего значения температуры атмосферы ниже уровня 24 км. Как выяснилось, температура варьирует в фазе с потоком солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см в течение 3.5 солнечных циклов (1957—1993 гг.). Амплитуда вариаций указывает на то, что нижняя атмосфера в максимуме цикла оказывается на 0.5—1.0 К теплее, чем в минимуме цикла. Это — весьма сильный отклик атмосферы на «солнечный сигнал». Из данных [17], однако, не ясно, является ли этот эффект локальным или глобальным. Неизвестно также, как эта температурная аномалия изменяется с высотой.

В 2010 г. появились косвенные свидетельства [15, 20] того, что солнечная активность оказывает долговременное воздействие на состояние термосферы Земли (интервал высот 200—800 км). На таких высотах вращается большинство искусственных спутников Земли (ИСЗ). Специалисты NASA проанализировали деградацию орбит 5000 спутников, обращавшихся в диапазоне высот 200—600 км над Землёй в 1967—2010 гг. (почти четыре цикла SA). Как известно, деградация орбит обусловлена аэродинамическим сопротивлением термосферы, т. е. её плотностью. Результаты анализа показывают, что на репер-

ной высоте около 400 км плотность термосферы испытывала значительные колебания, причём в течение последних четырёх циклов SA наблюдалась тенденция к её систематическому уменьшению. Более того, в 2008—2009 гг., т. е. в минимуме 23-го цикла плотность термосферы оказалась на 28 % ниже ожидаемой (если исходить из величины её систематического тренда в предыдущих циклах).

Согласно оценкам NASA в текущий, небывалый прежде «провал» (минимум) в солнечной активности, «коллапс» термосферы оказался в 2—3 раза более глубоким, чем когда бы то ни было прежде за всю историю космических полётов. Более того, коллапс термосферы оказался более глубоким, чем можно было бы объяснить современными моделями. Нельзя исключить, что вклад в изменение плотности термосферы могли внести парниковые газы. Однако в любом случае с привлечением всех мыслимых гипотез и моделей термосферы ожидаемый эффект не превысит 40 %. Пытаясь найти альтернативное объяснение, в работе [20] обращено внимание на аномальное уменьшение потока солнечного излучения в крайней ультрафиолетовой области (100—280 нм) в 2007—2009 гг. Такое уменьшение, зафиксированное в измерениях на борту космических аппаратов SOHO и TIMED, а также в суборбитальных полётах ракет, как раз и может быть истинной (солнечной) причиной уменьшения плотности.

#### КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ОБРАЗОВАНИЕ ОБЛАКОВ

Одним из возможных триггерных механизмов в цепочке СЗС может служить механизм влияния ГКЛ на тропосферные процессы [4]. В этом механизме взаимодействие между основным потоком солнечной энергии в тепловой машине «атмосфера» и потоком энергии ГКЛ происходит в тропосфере через ионизацию воздуха и образование облаков. Как известно, атмосфера — это открытая система, которая находится внутри магнитосферы и непрерывно взаимодействует с поверхностью Земли (континенты, моря и океаны) и обменивается энергией с другими (внешними) оболочками. При этом она подвергает-

ся также воздействию постоянных физических факторов (солнечное излучение, космические лучи, космическая пыль, метеориты и т. п.). Солнечная энергия определяет скорость парообразования в атмосфере, а космические лучи отвечают за образование центров конденсации. Важно подчеркнуть, что при этом космические лучи являются основным источником ионизации атмосферы на высотах образования облаков. Под действием ионизации воздуха от космических лучей происходит конденсация пара и образование облаков в соответствующих слоях атмосферы. Образование облаков регулирует альбедо атмосферы, т.е. поступление солнечной энергии к поверхности Земли. Таким образом, процесс происходит по схеме «двухкаскадного усилителя».

Поток энергии ГКЛ на орбите Земли составляет  $0.1 \text{ нВт/см}^2$ ; поток энергии типичного тропосферного возмущения может достигать значений  $1 \text{ мВт/см}^2$ . Отсюда следует, что коэффициент усиления в таком триггерном механизме должен быть огромным и оставаться на уровне около  $10^7$  на протяжении интервала 1 сут или менее [21]. Разумеется, эта упрощённая схема не учитывает многих важных звеньев, например роль электрических полей и ледяных кристаллов. С другой стороны, надёжно установлено, что в ускоренном росте дождевых капель основная роль принадлежит отрицательным зарядам (ионам). В свою очередь, это является, по-видимому, причиной грозовой активности и отрицательного заряда земной поверхности. В работе [4] обращается внимание на тот факт, что поток солнечной энергии максимален вблизи экватора, тогда как поток ГКЛ минимален на экваторе и максимален в полярных шапках Земли, на широтах выше  $\pm 60^\circ$ . Это должно способствовать возникновению или усилению меридиональной циркуляции атмосферы. Для понимания механизмов солнечно-атмосферных связей очень полезными оказались солнечные космические лучи [18]. Они служат своеобразным зондом в изучении таких явлений, как истощение озонового слоя, возмущения в глобальной цепи атмосферного электричества, вариации параметров шумановских резонансов, изменение прозрачности ат-

мосферы и её завихрённости, образование космогенных изотопов и нитратов и др.

### МАГНИТО-БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

До последнего времени в гелиобиофизических исследованиях для обработки и анализа наблюдений использовался математический аппарат, основанный на простейших статистических моделях. В таких моделях обычно не учитывается многофакторный характер проблемы, т. е. большая вероятность одновременного воздействия гелиогеомагнитных, метеорологических, социальных и других факторов. Не учитываются также нестационарность некоторых процессов, например, эффект блуждания фазы гелиогеофизических и биологических ритмов. При изучении МБЭ особую трудность представляет его нелинейность, например наличие биотропных амплитудно-частотных окон воздействия ЭМП.

Следует отметить, что в солнечно-земной физике в целом для изучения гелиогеофизических рядов данных уже давно применяются такие мощные современные методы, как вэйвлет-анализ, нейронные сети, распознавание образов. Однако гелиобиофизика (гелиобиология) до настоящего времени подобные подходы игнорировала. В работе [9] критически рассмотрена применимость этих методов к задачам гелиобиологии и показана их ограниченность. Было получено заключение, что при изучении МБЭ необходимо использовать современные методы ситуационного анализа. Одна из частных задач сводилась к выявлению биотропных областей для соответствующих характеристик космической и земной погоды с помощью методов распознавания образов. При этом исследователи опирались на концепцию линейной оболочки [10], являющуюся логическим продолжением и развитием методики сингулярного спектрального анализа.

Такой подход позволил получить корректные результаты в условиях сильного перекрывания выпуклых оболочек, построенных по данным о заболеваемости инфарктом миокарда и температуры/давления атмосферы (статистика по Москве за 1992—2005 гг.). Как выяснилось, быстрые скачки  $K_p$ -индекса, связанные с магнитными

бурями, обладают существенной биотропностью (18.05 %) в отношении острого инфаркта миокарда и острых нарушений мозгового кровообращения. Что касается больных гипертонической болезнью (ГБ), то удалось показать, что оба фактора — магнитное возмущение ( $K_p$ ) и колебания атмосферного давления ( $P_a$ ) — действуют одновременно, но их относительный вклад в это воздействие выражается соотношением 5 : 4. Не вызывает сомнения, что разработанные подходы [9] могут быть использованы для автоматического контроля влияния космической и земной погоды на человека в системах прогноза, основанных на спутниковой информации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами конспективно дана наиболее существенная, на наш взгляд, информация о последних достижениях и нерешённых задачах в очень перспективной области космофизики — проблеме «Солнце — Земля». Главные цели междисциплинарных исследований в этой области на сегодняшний день — это определение парциальных воздействий солнечной и геомагнитной изменчивости на окружающее Землю пространство (на различных уровнях) и корректная оценка относительного вклада отдельных факторов в очень разнообразные явления и многочисленные эффекты СЗС. При построении физических механизмов во многих случаях необходимо учитывать резонансный характер явлений (гелио-геофизическая ритмика, биоритмология). Последние два направления важны, несомненно, не только для солнечно-земной физики, но и для решения некоторых глобальных гносеологических проблем [3, 8]: «биологические часы», наше место и роль во Вселенной...

В заключение заметим, что полная библиография по различным аспектам СЗС насчитывает тысячи публикаций, так что приведенные ниже ссылки дают лишь начальную нить для более подробного поиска.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 07-02-01405, 08-02-92208, 09-02-98511), Программой фундаментальных исследований Президиума РАН (ОФН-VI.15) и грантами Президента*

*Российской Федерации (НШ-8499.2006.2, НШ-4573.2008.2).*

1. Акасофу С., Чепмен С. Солнечно-земная физика. — М.: Мир, 1974—1975. — Т. 1—2.
2. Владимирский Б. М., Темуриянц Н. А. Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу. — М.: МНЭПУ, 2000. — 374 с.
3. Владимирский Б. М., Темуриянц Н. А., Мартынюк В. С. Космическая погода и наша жизнь. — Фрязино: Век 2, 2004. — 230 с.
4. Крымский Г. Ф. Космические лучи и околоземное окружение // Солнечно-земная физика. — Иркутск, 2002. — № 2. — С. 42—45.
5. Крымский Г. Ф., Матвиенко Г. Г., Пенин С. Т., Колосов В. В. Влияние ионизации на облакообразование // Современные проблемы космической физики. — Якутск: ИКФИА, 2008. — С. 137—140.
6. Мигулин В. В., Мирошниченко Л. И., Обридко В. Н. Солнечно-земная физика: Проблемы и перспективы // Вестник АН СССР. — 1987. — № 10. — С. 83—89.
7. Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля. — М.: Наука, 1981. — 144 с.
8. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГУ, 2011.
9. Ожередов В. А., Бреус Т. К. Новые подходы к статистическому анализу рядов длительных наблюдений гелио-геомагнитной активности и медико-биологических показателей, реагирующих на нее // Геофизические процессы и биосфера. — 2008. — 7, № 1. — С. 27—32.
10. Пытьев Ю. П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. — М.: Физматлит, 2004. — 400 с.
11. Хабарова О. В., Руденчик Е. А. Геоэффективность изменений плотности солнечного ветра. Основы новой методики прогноза магнитных бурь // Актуальные проблемы физики солнечной и звёздной активности. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003. — Т. 2. — С. 520—523.
12. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1973. — 350 с.
13. Akasofu S.-I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Revs. — 1981. — 28. — P. 121—190.
14. Aoki T. On the validity of Akasofu's  $\epsilon$  parameter and of the Vasyliunas et al. general formula for the rate of solar wind-magnetosphere energy input // Earth Planets Space. — 2005. — 57. — P. 131—137.
15. Emmert J. T., Lean J. L., Picone J. M. Record-low thermospheric density during the 2008 solar minimum // Geophys. Res. Lett. — 2010. — 37. — P. L12102.

16. *Kirkby J.* Cosmic rays and climate presentation. — CERN Colloquium, 4 June 2009.
17. *Labitzke K., van Loon H.* Connection between the troposphere and stratosphere on a decadal scale // *Tellus A.* — 1995. — **47**. — P. 275—286.
18. *Miroshnichenko L. I.* Solar cosmic rays in the system of solar-terrestrial relations (review) // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* — 2008. — **70**. — P. 450—466.—(Special Issue of ISROSES Proceedings).
19. *Østgaard N., Germany G., Stadsnes J., Vondrak R. R.* Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107A**, N 9. — P. 1233. — SMP 9.1-9.14.
20. *Solomon S. C., Woods T. N., Didkovsky L.V., et al.* Anomalously low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum // *Geophys. Res. Lett.* — 2010. — **37**. — L16103. — P. 1—5.
21. *Tinsley B. A., Deen G. W.* Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercold water in high-level clouds? // *J. Geophys. Res.* — 1991. — **96D**, N 12. — P. 22283—22296.

*Надійшла до редакції 17.12.10*

*L. I. Miroshnichenko*

#### THE SUN – EARTH PROBLEM: MODERN CONCEPTS AND PHYSICAL MECHANISMS

We present a brief review of modern concepts for the Sun – Earth problem and proposed physical mechanisms of solar-

terrestrial relations (STR). This field covers a wide range of fundamental and applied problems of paramount importance (space weather, radiation hazard in space, operation of spaceborne and ground-based technological systems, heliobiology, etc.). Besides, it is closely connected with some general gnosiological problems (Weltanschauung). State-of-the-art information on existing problems is given and different channels for extraterrestrial influences are discussed at the up-to-date level: electromagnetic waves and fields, total solar irradiance, solar wind, energetic solar particles, galactic cosmic rays, cosmic dust, etc. Some of well-known and suggested STR effects and corresponding physical mechanisms are illustrated by several examples. In particular, we consider a number of different external «signals» in observed changes of terrestrial climate and weather. Especially, we analyse an expected impact of geophysical disturbances on the accuracy of some precise physical measurements and experiments. Due attention is paid to the heliobiological aspects of STR. Specifically, it is emphasized the multifactor nature of magneto-biological effect (MBE), its non-stationary and non-linear behaviour. We discuss the main features of different physical mechanisms (electromagnetic fields, ionising radiation, triggers, rhythmic and resonances in solar-terrestrial systems) and their applicability to the Sun – Earth problem. Most of them are still needed in more sophisticated theoretical development and experimental confirmation. The main goals of interdisciplinary studies in this field are to determine partial impacts of solar-geomagnetic variability on the terrestrial environments and to estimate (separate) relative contributions of different factors into various STR phenomena.