

УДК 0044; 004.78

Е. Б. Кудашев¹, А. Н. Филонов²¹Институт космических исследований РАН²Институт проблем информатики РАН

Распределенный доступ и поиск данных дистанционного зондирования Земли из космоса

Представлено 25.06.07

Рассматриваются актуальные задачи формирования электронной среды взаимодействия для объединения электронных архивов и on-line каталогов спутниковых данных. Выполнен анализ формирования национальной инфраструктуры пространственных данных в США и в Европейском Сообществе. Показано, что общими целями программ SDI и INSPIRE является обеспечение координированного распределенного доступа к спутниковым информационным ресурсам.

1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В мировой науке и в практических применениях космические исследования занимают одно из важных мест. Пятьдесят лет назад началась космическая эра исследования и использования космического пространства, после того как в 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый искусственный спутник Земли.

Началом дистанционного зондирования Земли с помощью спутников принято считать 1 апреля 1960 г. В этот день в США был запущен спутник «Tiros-1», в задачи которого входило исследование атмосферных явлений. В СССР метеорологический спутник «Космос-122» поднялся на орбиту 25 июня 1966 г. В 1970-х гг. на орбите Земли появились уже десятки различных автоматических спутников. Они выполняют самые разные задачи: следят за возникновением лесных пожаров, разливом рек и наводнениями, фиксируют различные природные и техногенные катастрофы и т. п.

В наши дни орбита Земли «патрулируется» множеством спутников дистанционного зондирования (ДЗЗ) различной специализации. Они оборудованы специальными сенсорными системами, которые способны улавливать отраженный от поверхности Земли свет и другие виды излучений. Обычно эти сенсоры автоматически включаются с интервалом в 5 минут. Каждый из них фиксирует излучение с определенной длиной волны. На борту спутника данные, поступившие с сенсоров, сводятся воедино,

оцифровываются и отсылаются на наземные приемные станции. В настоящее время ежедневно принимаются, обрабатываются, поставляются и архивируются огромные потоки спутниковых данных — цифровые спутниковые фотографии поверхности Земли. Исследователю доступны данные со спутников «Radarsat» (Канада), французских спутников SPOT 2 и SPOT 4; «Landsat-4, -5, -7» и серии EOS — «Terra» и «Aqua» (США); индийских космических аппаратов IRS-1C/1D и спутников «Ресурс-01» и «Метеор-3М» (Россия); с метеорологических спутников NOAA (США) и со спутников высокого разрешения EROS (Израиль) и первого немецкого спутника «Terra SAR-X»; с геостационарных спутников: японского GMS-5 и китайского FY-2B. Спутниковые данные широко используются для решения различных задач, связанных с организацией контроля состояния окружающей среды и безопасности от техногенных катастроф. Однако для реального использования спутниковых наблюдений требуется интеграция спутниковых данных и результатов их обработки с другими данными, уже используемыми в системах мониторинга окружающей среды.

Современный этап развития спутниковых методов наблюдения Земли открывает возможности построения систем мониторинга в задачах, которые требуют регулярно обновляемой информации о состоянии экосистем и происходящих в них динамических процессах. Реализованными примерами использования спутниковой информации являются система мониторинга лесных пожаров; мониторинг

вырубку лесов; мониторинг сельскохозяйственных земель; мониторинг состояния окружающей среды урбанизированных территорий. На основе оперативной работы со спутниковыми данными развиваются система спутникового метеорологического мониторинга, система мониторинга чрезвычайных ситуаций. Спутниковый мониторинг обеспечивает получение «сырых» спутниковых данных и после обработки данных дистанционного зондирования — получение законченных тематических информационных продуктов. Термин «информационные продукты» относится к результатам обработки и интерпретации космических снимков. Продукт представляет собой реальные данные космических наблюдений, которые могут быть заказаны пользователем и переданы ему. Например, тематическими информационными продуктами спутникового мониторинга являются карты тайфунов в тихоокеанском регионе; карты температуры поверхности океана и карты течений; электронные карты температуры подстилающей поверхности мегаполиса Москвы, на которых представлены результаты диагностики из космоса выбросов тепловых электростанций в Москве и обнаружение дымовых шлейфов тепловых электростанций.

После появления интернета и бурного развития новейших информационных технологий начался современный этап создания распределенных информационных ресурсов в области дистанционного зондирования Земли и космического мониторинга состояния окружающей среды. Web-технологии обеспечивают возможность разработки принципиально новых средств для доступа к данным, поиска и идентификации ресурса, заказа и распределения спутниковой информации.

В последние годы возникла проблема создания единой электронной среды информационного взаимодействия, в которой использование распределенных информационных систем и сетевое взаимодействие создают принципиально новые возможности. Сетевая интеграция обеспечивает возникновение хранилищ информационных спутниковых ресурсов. При обработке и анализе данных дистанционного зондирования определяющую роль играет создание и представление услуг удаленным пользователям, поддержка свободного распределенного доступа к крупномасштабным инфраструктурам, объединяющим распределенные интерактивные цифровые архивы.

2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим актуальные задачи формирования электронной среды взаимодействия для объедине-

ния электронных архивов и on-line-каталогов данных. За рубежом на основе GRID-технологий, e-infrastructure and e-collaboration началось формирование распределенной информационной инфраструктуры спутниковых данных, вызванное расширением использования спутниковой информации в международных программах экологического мониторинга и предупреждения техногенных катастроф. Это прежде всего такие программы, как Global Monitoring for Environment Security (GMES), Global Earth Observation System of Systems (GEOSS).

Национальная программа Spatial Data Infrastructure (SDI) в США была начата распоряжением президента Клинтона от 13 апреля 1994 г. «Координация в области получения и доступа к данным: национальная инфраструктура пространственных данных». Годовой бюджет программы SDI составляет 3,6 млн долларов. Федеральный комитет по географическим данным США (FGDC) — координатор программы, в которой участвуют 18 министерств. Аналогичные проекты теперь создаются в Китае — Geospatial Data Infrastructure, в Канаде — Canadian Geospatial Data Infrastructure (CGDI), в Испании — Spanish National Spatial Data Infrastructure (<http://www.idee.es>), в Индии — Indian National Spatial Data Infrastructure.

Новую фазу активной разработки инфраструктуры SDI вызвало формирование Global SDI Association и инициатива Европейской Комиссии — Программа INSPIRE — Infrastructure for Spatial Information in Europe (<http://www.inspire.org>), развивающая European Spatial Data Infrastructure (ESDI). Национальные инфраструктуры (National SDI) формализуют структуру и процесс организации, использования и распределения геопространственных данных для широкого спектра приложений и пользователей внутри страны. Концепция NSDI была признана всего несколько лет назад. Первые NSDI установлены в Великобритании, Австралии, Новой Зеландии, Японии, Корее и Канаде, а позже — более чем в 60 других странах.

Программа INSPIRE (2004—2013 гг.) Европейского Сообщества разрабатывает распределенную инфраструктуру географических данных в интересах защиты окружающей среды в Европе, мониторинга природных ресурсов и природных катастроф. Компонентами INSPIRE являются метаданные, коллекции и сервисы данных; сетевые сервисы и технологии; а также соглашения о распространении, доступе и использовании данных; механизмы координации и мониторинга.

Стандартизирующими организациями в программах SDI являются Open Geospatial Consortium (OGC), ISO TC/211 и W3C. Базовые стандарты разрабатывает Open Geospatial Consortium. Представление спутниковых данных основано на международных

открытых стандартах International Standards Organization (ISO) / TC 211 — Geographic information / Geomatics, разрабатываемых в кооперации W3C, Open Geospatial Consortium (OGC), European Committee for Standardization (CEN) / TC 287 — Geographic Information, Federal Geographic Data Committee (FGDC).

ISO/TC 211 объединяет 50 национальных организаций и сотрудничает с 25 международными комитетами по стандартизации. Деятельность ISO/TC 211 сконцентрирована на разработке стандартов географических данных. ISO/TC 211 имеет объединенную Рабочую группу Joint Advisory Group (JAG) с Open Geospatial Consortium (OGC), поддерживающей разработку Open GeoSpatial Software Interfaces (интерфейсов и открытого программного обеспечения).

Первое поколение стандартов 1994—2004 гг. состояло из семейства двадцати интегрированных стандартов на географические данные. Второе поколение стандартов ISO/TC 211 объединяет стандарты на космические снимки — изображения (imagery) и сервисы. Наиболее известные стандарты включают стандарты на метаданные ISO 19115-Metadata Standard, на язык разметки географических данных ISO 19136 Geography Markup Language и стандарт на картографический сервер ISO 19128 Web Mapping Server Interface WMS, разработанный и введенный Open Geospatial Consortium для стандартизации в ISO.

Общими целями программ SDI и INSPIRE являются обеспечение координированного распределенного доступа к спутниковым информационным ресурсам; поддержка решения фундаментальных и прикладных задач по ДЗЗ из космоса и экологическому спутниковому мониторингу. В настоящее время на базе инфраструктуры SDI и программы INSPIRE интенсивно развиваются системы, обеспечивающие отображение информационных ресурсов ДЗЗ и спутниковой информации экологического мониторинга в интернете. Многолетний опыт получения, хранения и обработки спутниковых данных, практика предоставления обработанных спутниковых данных многочисленным пользователям этих данных, показывает неуклонно возрастающее количество потенциальных пользователей спутниковой информации и все большее разнообразие запросов каждого конкретного пользователя на тот или иной вид обработки спутниковой информации. Такая тенденция связана с постепенным развитием задач, стоящих перед пользователями спутниковой информации, с развитием технических средств для получения спутниковой информации, главным образом с появлением нового поколения спутников и спутниковых приборов, позволяющих конечному пользователю привлекать для решения своих задач

новые виды спутниковой информации.

Спутники обеспечивают глобальный, постоянный и надежный мониторинг окружающей среды, включая атмосферу, сушу и океан. Оперативное обеспечение потребителей достоверной экологической информацией, возможность получать природно-ресурсную информацию в реальном масштабе времени и свободный доступ к экологической информации.

Методы дистанционного зондирования Земли играют решающую роль в международных геосферно-биосферных программах исследования изменений окружающей среды и климата. Прежде всего это Global Earth Observation System of Systems (GEOSS), объединившая Программу GMES, Программу глобального изменения климата IGOS (Integrated Global Observing Strategy), изучающую взаимосвязанные физические процессы в атмосфере, океане, на поверхности Земли и в полярных регионах; Программу DMSP (Disaster Manager), направленную на предупреждение опасности стихийных бедствий. Программа GMES развивается Европейским космическим агентством и Европейской комиссией и поддерживает глобальный экологический мониторинг и усилия европейского сообщества, направленные на устойчивое развитие. Инициатива GMES сосредоточена на качестве данных и информации в таких важных для Европы областях, как сельское хозяйство, леса, рыбный промысел.

Эффективное использование космической информации для изучения и мониторинга состояния и динамики природных объектов и техногенных процессов зависит от того, насколько доступны научному сообществу спутниковые данные и информационные ресурсы, созданные при исследовании Земли из космоса. Региональный аспект исследований окружающей среды важен как для понимания связей между изменениями региональных компо-

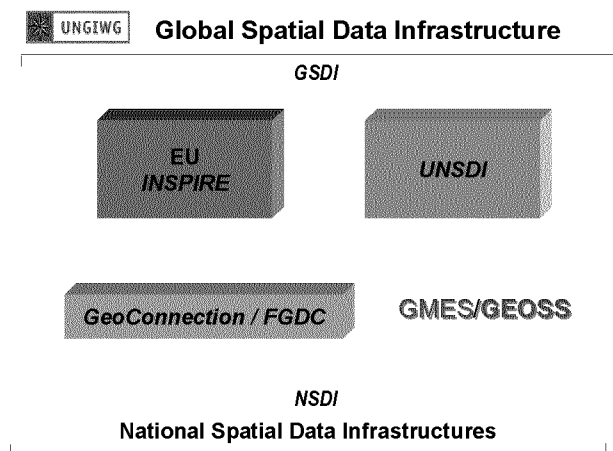


Рис. 1. Инфраструктура программ SDI

нентов и их последствиями на глобальном уровне, так и для поведения системы Земля в целом.

Рис. 1 иллюстрирует инфраструктуру Программ SDI: от национального уровня National SDI до международного уровня Global Spatial Data с представлением европейской программы INSPIRE, программы ООН UN SDI, программ GMES/GEOSS и задач Федерального комитета США по географическим данным FGDC. Эффективное использование космической информации для изучения и мониторинга состояния и динамики природных объектов и техногенных процессов зависит от того, насколько доступны научному сообществу спутниковые данные и информационные ресурсы, созданные при исследовании Земли из космоса. Спутниковые методы исследования окружающей среды важны как для понимания связей между изменениями региональных экосистем и их последствиями на глобальном уровне, так и для поведения экосистемы Земли в целом.

3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ INFEO И EOSDIS

Известны мировые системы спутниковой информации, оперирующие огромными массивами спутниковых данных о состоянии природной среды. В США построена многоуровневая система сбора, обработки и хранения данных EOS (Earth Observing System) — Исследование Земли из космоса и распределенная информационная система спутниковых данных EOSDIS (EOS Data and Information System), объединяющая активные архивы данных, получаемых со спутников. Данные дистанционного зондирования Земли, управляемые системой EOSDIS, доступны из восьми распределенных центров. Распределенные центры системы EOSDIS изначально были ориентированы на раздельное хранение данных по разным научным направлениям Программы «Исследования Земли из космоса EOS».

Центр NASA/Langley собирает, обрабатывает, архивирует и распределяет спутниковые данные по аэрозолям, облакам и тропосферная химия. Центр ASF на Аляске — полярные исследования и радарные данные. Центр EROS — данные по атмосфере, земной поверхности и взаимодействию океана и суши. NASA/Goddard Центр: верхняя атмосфера, глобальная биосфера. Лаборатория реактивного движения JPL: физическая океанография. NSIDC (National Snow and Ice Data Center) в Колорадо — снег и лед, криосфера и климат. Национальная Лаборатория Oak Ridge — данные по биохимии. Центр в Алабаме — глобальная гидрология.

Европейское космическое агентство (ESA) разработало информационную систему спутниковых данных INFEO (Information on Earth Observations),

являющуюся активным многоцелевым архивом космической информации на базе портала ESA (<http://eoportal.org/>). Для интеграции географически удаленных спутниковых архивов решена задача, как обеспечить работу пользователей с данными, которые получаются из различных источников и имеют разную структуру хранения. Была создана информационная система, в которой обеспечена возможность взаимодействия разнородных сервисов и каталогов данных. Основным результатом состоит в том, что при запросе в единой точке системы поиск данных осуществляется единым запросом одновременно в ресурсах распределенных мировых каталогов. INFEO ориентирована на работу со спутниковыми данными и объединяет спутниковые архивы. Активный многоцелевой архив космической информации INFEO развивается Европейским космическим агентством в сотрудничестве с Italian Space Agency (ASI), French Space Agency (CNES), German Space Agency (DLR), European Union Satellite Centre (EUSC) и консорциумом Open Geospatial Consortium (Open GIS) как единая система поиска по всем архивам данных. Система INFEO предлагает доступ к данным и сервисам Earth Observation, и каталогам данных по всему миру. Позволяет производить поиск спутниковых снимков и коллекций данных.

4. ИНФОРМАЦИОННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА РОССИЙСКИХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Разрабатываемая информационная инфраструктура должна состоять из данных, принадлежащих различным спутниковым центрам, и обеспечивать эффективный доступ, поиск и получение самой последней, наиболее актуальной спутниковой информации. Реализация информационной инфраструктуры включает формирование единого центра хранения спутниковых данных; интеграцию информационных систем спутникового мониторинга; использование общеприменимых мировых технологий и стандартов (Internet, WWW, Semantic Web, Grid); единую административную политику доступа к данным. Информационная и инфраструктура в нашем проекте создавалась на основе единых стандартов интернета: репозитории, Web-сервисы, XML. Поддерживается работа конечных пользователей со спутниковыми данными, которые получаются из различных источников и имеют разную структуру хранения. Сбор и обработка различных типов спутниковых данных происходит совершенно независимо; системы хранения данных могут находиться не только на разных серверах, но и в различных удаленных центрах.

Информационная инфраструктура в комплексе

рассматривает такие вопросы, как технологии организации доступа, интерфейс с пользователями, политика администрирования с данными, средства доступа и технологии распределенного хранения данных. Поддерживается идентификация каталогов спутниковых данных, организация доступа к данным и сервисам, обнаружение и запрос информационных продуктов спутникового мониторинга, предварительно обнаруженных в опознанных коллекциях.

Создание информационной инфраструктуры спутниковых данных позволяет осуществлять систематизированное хранение данных спутникового мониторинга, проводить обновление географических баз данных, обеспечить удаленный доступ к информации исследователей, выполняющих работы в данной области.

Основной целью нашего проекта является исследование научных приложений в распределенной информационной среде для интеграции цифровых архивов спутниковых данных с международными системами обмена космической информацией INFEO (Information about Earth Observation) и EOSDIS (EOS Data Information System). Разрабатываемый проект объединяет информационные ресурсы космического экологического мониторинга в единую информационную среду. Значительно сокращается время доступа к данным орбитального мониторинга природной среды. Использование спутниковой информации обеспечит многогранную трактовку динамики происходящих на Земле процессов, расширит изучение и прогноз природных кризисов и катастроф, позволит уменьшить ущерб от нежелательных последствий стихийных и техногенных явлений.

В отличие от системы распределенных Центров в EOSDIS (США), здесь мы отказались от сепаратного накопления космических данных по индивидуальным разделам науки, по конкретным проектам или отдельным космическим миссиям. Проект обеспечивает интеграцию спутниковых данных междисциплинарных исследований Земли из космоса, организацию к ним доступа и представление информации в распределенной информационной среде на основе интернет-технологий.

Поддерживается интеграция разрозненных региональных спутниковых архивов в единую информационную среду космического экологического мониторинга. Каталоги спутниковых данных региональных центров экологического мониторинга Сибири, Дальнего Востока, Арктики и Москвы будут интегрированы в мировую систему центров космической информации. Пользователь получает возможность распределенного доступа к данным региональных и международных центров космического мониторинга.

Объем информационных ресурсов в разрабатываемом проекте можно оценить на примере регио-

нального архива спутниковой информации во Владивостоке. В 2000 г. спутниковый архив Института автоматизации и процессов управления (ИАПУ) достигал объема 30 Гбайт. Развитие средств регионального спутникового мониторинга привело к резкому возрастанию потока спутниковых данных. В 2003—2006 гг. архив был пополнен данными со спутников NOAA, TERRA (MODIS), 36 каналов, GMS-5, FY-1C и FY-1D. Объем данных 72.6 Гбайт с геостационарных спутников GMS-5 и FY-2B; 63 Гбайт — со спутников NOAA. Проект ориентирован на создание средств коллективной работы с информационными ресурсами; поддерживается доступ удаленных пользователей к спутниковым данным и распределенный поиск данных. В разрабатываемом проекте метаданные будут использоваться для каталогизации спутниковых данных, поиска и вывода результатов поиска. Для обеспечения наиболее полного соответствия хранимой информации запросам пользователя определен список свойств (атрибутов) хранимых данных:

— набор метаданных для описания спутниковых данных включает краткое описание ресурса. Для каждого космического снимка будут храниться описывающие их метаданные. При реализации в системе хранения и поиска большого количества атрибутов метаданных становится возможным осуществлять более узкий поиск хранимой в архиве данных;

— метаданные космических снимков содержат следующие атрибуты: дата и время приема изображения; покрываемая снимком территория (может описываться как координатно, так и по названию местности); название спутника; идентификатор прибора; разрешение (в км) изображения; количество каналов (отсчетов на пиксел) в изображении; номера каналов, вошедших в данную выборку; данные, описывающие орбиту спутника.

Рассматриваемый проект решает задачу создания единой информационной среды [1—3], предоставления единой точки доступа для поиска данных по всем спутниковым архивам и каталогам, независимо от их географического расположения и внутреннего формата данных. Возможность взаимодействия гетерогенных сервисов и каталогов данных в рамках единой информационной системы основана на свойстве интероперабельности.

Технологии распределенной информационной системы INFEO дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используют сеть узлов Middleware Nodes (MWNDs) (см. рис. 2). Каждый из узлов MWNDs содержит метаданные коллекций, доступ к которым предоставляется через шлюзы (Gateways). Пользователь для поиска данных обращается к системе через WWW-сервер на одном из узлов MWND, где формируется распределенный запрос, рассылаемый

релевантным шлюзам. Результаты выполнения запроса объединяются и возвращаются пользователю.

Gateway представляет собой промежуточное звено между узлом MWND и каталогом или спутниковым архивом. Gateway обменивается сообщениями по протоколу CIP (Catalogue Interoperability Protocol) с узлом MWND, получая от него поисковые запросы и возвращая ему результаты поиска. Запросы передаются транслятору RDBMS, который преобразует их в SQL-запросы для непосредственного поиска в базе данных, либо формирует запрос для обращения к предоставляемому сервису (Web Map Server и т. п.).

Взаимодействие пользователей и каталогов данных ДЗЗ регламентирует протокол CIP. Для поддержки одновременного доступа пользователя к множеству каталогов используется трехуровневый принцип распределения запросов. Пользователь через web-интерфейс задает поисковый запрос и посылает его к узлу MWND, который направляет запрос множеству серверов каталогов данных. После завершения процедуры поиска ответы поступают на узел MWND, через который пользователь получает объединенный результат поиска.

Существует несколько стандартов, пригодных для поиска и извлечения информации в распределенных информационных системах (HTTP, Gopher и т. п.). Протокол Z39.50 имеет важное преимущество, ставшее решающим при выборе базового протокола для CIP. Преимущество заключается в том, что форма представления результатов поиска, как и способ ввода поисковых запросов, не зависит от источника информации. Это определяется тем, что Z39.50 использует качественно иную модель взаимодействия пользователя и поисковой системы, по-

зволяющую абстрагироваться от способа организации конкретной базы данных, сделать доступ к ее содержанию независимым от формы хранения последнего. Поисковые запросы всегда адресованы не к реальной базе данных, а к абстрактной. Эта абстрактная БД не имеет структуры и характеризуется только поисковыми атрибутами. При таком подходе к процедуре поиска все базы данных становятся для клиента одинаковыми, если поддерживают один и тот же набор поисковых атрибутов.

Различные вычислительные системы используют различные средства и методы описания, хранения и доступа к данным. Протокол Z39.50 избавляет пользователя от необходимости адаптации к каждому из источников информации. Z39.50 представляет собой общую абстрактную структуру для поиска и получения информации, требующую дополнительной настройки для каждой конкретной области применения. Возможность осуществления таких настроек — профилей, является одним из основных преимуществ протокола. Итак, протокол CIP является профилем Z39.50, ориентированным на работу с данными ДЗЗ.

Протокол CIP поддерживает концепцию параллельных операций. Это позволяет пользователю инициировать несколько поисковых запросов одновременно: нет необходимости дожидаться окончания выполнения предыдущей операции (получения ответа, соответствующего запросу), чтобы сделать следующий запрос.

Протокол CIP определяет разные принципы представления метаданных для пользователей и для поставщиков данных. Для пользователей базовой единицей структуры данных является понятие архива, для поставщиков — понятие коллекции.

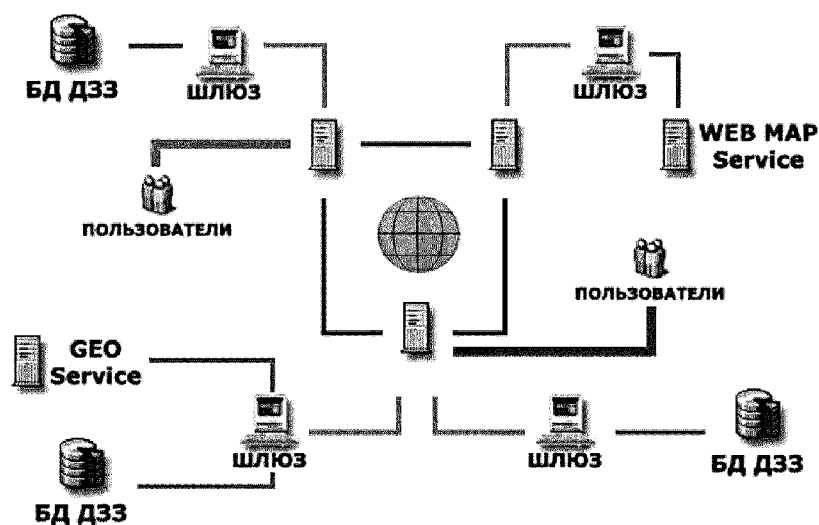


Рис. 2. Схема работы распределенной информационной системы

Архив может содержать различные типы данных: спутниковые изображения, результаты обработки изображений, температурные карты, статистические данные, алгоритмы их обработки, документацию и т. д. Коллекция — группа данных, объединенных на основе каких-либо общих атрибутов. Эти атрибуты являются описанием коллекции, которое может быть использовано для формирования дополнительных критериев поиска. Коллекция может содержать как описания (дескрипторы) конечных данных, так и описания других коллекций, образуя сложную иерархию коллекций. Все типы коллекций поддерживают поисковые методы, определенные стандартом SIP, а именно:

— *поиск коллекций*. Этот метод используется для поиска коллекций, удовлетворяющих заданным условиям (время, координаты, тип датчика и т. п.) Результат поиска может быть использован для дальнейшего поиска с измененными условиями;

— *поиск данных*. Этот метод используется для поиска дескрипторов, указывающих на конечный продукт — данные ДЗЗ.

Пользователь может дополнительно задавать область поиска: выполнять поиск только в одном каталоге (локальный поиск) или задать распространение поискового запроса на другие каталоги и архивы (распределенный поиск).

1. Кудашев Е. Б., Филонов А. Н. Интегрированная распределенная информационная система спутниковых данных в программах исследования Земли из космоса // Тр. Восьмой Всероссийской науч. конф. (RCDL 2006) «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции», Суздаль, 17—19 октября 2006. — Ярославль: Ярославский гос. ун-т им. П. Г. Демидова, 2006.—С. 131—139.
2. Кудашев Е. Б., Филонов А. Н. Геоинформатика на WEB: от локальных БД к распределенным информационным системам спутниковых данных // Тр. Всероссийской конф. «Научный сервис в сети интернет: технологии параллельного программирования», Новороссийск, 18—23 сентября 2006 г. — М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006.—С. 196—198.
3. Kudashev E. B., Filonov A. N. Environmental Monitoring Digital Library: Improving the accessibility of the Russian Satellite data // EnviroInfo Brno 2005. Informatics for Environmental Protection: Proc. of the 19th International Conf. Informatics for Environmental Protection, September 7—9, 2005. — Masaryk University in Brno, Czech Republic. 2005.— P. 230—238.

DISTRIBUTED ACCESS AND SEARCH FOR THE SATELLITE DATA OF REMOTE SENSING

E. B. Kudashev, A. N. Filonov

We consider the emerging standards designed for the elaboration of distributed service-oriented environments. The project of integration of the Russian Satellite data archive in International Information Systems of Remote Sensing is observed as an example.

УДК 550.388, 520.16+523.31+523.9; 520.86

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Физика и экология системы

Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера

Представлено 25.06.07

Обґрунтовано, що утворення Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) є складною відкритою динамічною нелінійною системою. Сформульовано основні положення системної парадигми. Показано, що високоенергійні явища в системі викликають у ній комплекс, як правило, нелінійних процесів, перебудову характеру взаємодії підсистем. Обговорюються екологічні наслідки аварій, катастроф і регіональних війн у системі ЗАІМ.

ВВЕДЕНИЕ. СИСТЕМНАЯ ПАРАДИГМА

Цель данной работы — обоснование необходимости системного подхода к образованию Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) и изучению процессов в нем. Статья представляет

собой краткий обзор результатов исследований автора, выполненных в последние годы.

Важнейшим достижением физики Земли, атмосферы и геокосмоса явилось осознание того факта, что качественно новое понимание наблюдаемых процессов во всех геосферах и построение их физи-

ко-математических моделей невозможно в рамках прежней парадигмы. Новая — системная — парадигма в четком виде сформулирована в 1980-х гг. автором [1, 7]. Ценность и плодотворность новой парадигмы состоит в том, что она предполагает рассмотрение образования ЗАИМ как открытой динамической нелинейной системы. Между подсистемами существуют прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. В систему как «сверху», так и «снизу» поступают излучение, вещество, энергия и негэнтропия. Негэнтропия поддерживает систему в неравновесном состоянии и обеспечивает протекание диссипативных процессов. Образование ЗАИМ — динамическая система. Ее параметры изменяются во времени и пространстве. Энергетика естественных и антропогенных процессов в системе ЗАИМ и ее подсистемах — значительна [1—7, 15]. Поэтому система описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Обмен между подсистемами излучением, веществом, энергией и негэнтропией столь велик, что система способна находиться в состояниях, далеких от равновесия. Для нелинейных систем характерны сложность процессов, множественность состояний, возможность возникновения детерминированного хаоса, самоорганизации, проявление триггерных эффектов, возникновение новых не присущих подсистемам свойств у системы и т. п. Нелинейным системам свойственны саморазвитие, усложнение и совершенствование за счет потребления внешних ресурсов.

ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЗАИМ

Выбросы корональной массы (СМЕ) и солнечные вспышки формируют состояние космической и, по видимому, атмосферной погоды. В системе ЗАИМ им сопутствует комплекс физических процессов, называемый геокосмической бурей. Энергия и мощность возмущенного солнечного ветра может достигать 10^{17} Дж и 10^{14} Вт [1, 7, 19]. Вспышки и СМЕ сопровождаются ростом интенсивности оптического, рентгеновского, корпускулярного излучений и солнечного ветра. При этом в систему ЗАИМ внедряется энергия $\sim 10^{16}$ Дж, электронная концентрация N в D-области ионосферы увеличивается на 1-2 порядка, возникают сильные геомагнитные возмущения (их энергия и мощность $\sim 10^{16}$ Дж и ~ 500 ГВт), а также генерируются волновые возмущения (в частности, акустические волны, внутренние гравитационные волны — ВГВ) в атмосфере, ионосфере и магнитном поле.

Геокосмические бури. Этот термин объединяет магнитную, ионосферную, атмосферную и электрическую бури, вызванные воздействием на систему

ЗАИМ возмущенного солнечного ветра. Энергетика бури — велика [1, 7, 17, 20—22]. Используя наши измерения, автор проанализировал эффекты геокосмических бурь в диапазоне высот ~ 60 — 1000 км, имевших место в течение цикла солнечной активности (1995—2006 гг.). Изучено вызываемое ими взаимодействие подсистем [17, 20—22]. Энергия солнечного ветра из магнитосферы по силовым линиям в виде электрических полей, потоков частиц и плазмы проникает в ионосферу и атмосферу, вызывая их нагрев, расширение и подъем. При этом возмущается система термосферных ветров, возникает перестройка химических реакций, генерируются и перемещаются волновые возмущения в атмосфере и ионосфере. Важно, что в волне $\Delta N/N$ может достигать 50 %. Такие волны относятся к нелинейным. В волновых пакетах (солитонах, уединенных волнах) преобладают гармоники с $T \approx 40$ — 120 мин, их скорость составляет 0.5 — 1 км/с.

Важно, что во время бурь среднеширотная ионосфера приобретает свойства высокоширотной ионосферы (возникает диффузность, усиливается ионосферно-магнитосферное электрическое поле и др.).

Затмение Солнца (ЗС). Это явление также обладает значительной энергетикой и вызывает комплекс физико-химических процессов на всех высотах и перестройку атмосферы и геокосмоса в течение 2—4 ч. Усиливается атмосферно-ионосферное, ионосферно-магнитосферное и ионосферно-плазмосферное взаимодействия [1, 7, 8].

Автором проанализированы эффекты в системе ЗАИМ, сопровождавшие четыре частных ЗС, имевших место вблизи г. Харькова: 11 августа 1999 г. (степень покрытия 73 %), 31 мая 2003 г. (64 %), 3 октября 2005 г. (24 %) и 29 марта 2006 г. (77 %). Например, во время затмения Солнца 11 августа 1999 г. имели место значительные (на 10—50 %) уменьшения N при $z = 70$ — 350 км, малоинерционное уменьшение температуры электронов, достигшее 400 — 600 К при $z = 200$ — 700 км, и инерционное уменьшение температуры ионов T_i от 100 до 600 К на высотах 400 — 700 км. Высыпание электронов привело к росту N на высотах 81 — 87 км через 100 — 40 мин после начала затмения. Время становления T_i составляло 40 — 20 мин соответственно. Во время ЗС нисходящий поток плазмы из плазмосферы достиг значений $-2.5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а до и после ЗС восходящие потоки составляли $(1-2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [1, 7].

Солнечный терминатор (СТ). Граница раздела день-ночь является мощным источником возмущений в атмосфере и геокосмосе [1, 7, 9—11]. СТ приводит к перестройке ионосферно-плазмосферного и ионосферно-магнитосферного взаимодействий,

вызывает выпадение частиц из радиационного пояса в нижнюю ионосферу, генерирует волновые процессы в E- и F-областях ионосферы и т. д. Относительная амплитуда $\Delta N/N$ этих процессов может достигать 20—30 %. Продолжительность волновых возмущений 1—3 ч, период $T \approx 15—60$ мин.

Метеорные потоки (МП). Приток метеорного вещества приводит к нагреву атмосферного газа, увеличению N в E-области ионосферы, существенному в ночное время, к генерации возмущений магнитного поля и ионосферного электрического поля и т. п. Эти эффекты относятся к эффектам интегрального типа. Результаты их расчета приведены в [1, 7].

Грозовая активность. Энергия и мощность молнии достигают 10^{10} Дж и 10^{10} Вт [1, 7]. Мощность P_{em} ОНЧ-излучения молнии составляет $10^6—10^7$ Вт, плотность потока энергии в магнитосферу — $10—100$ мкВт/м². Таких значений достаточно для перестройки ионосферно-магнитосферного взаимодействия, стимуляции выпадения заряженных частиц из радиационного пояса в результате развития циклотронной неустойчивости и генерации волн.

На Земле одновременно происходит около 2000 гроз, площадь каждого очага порядка 1000 км². При этом $P_{em} \sim 1—10$ ГВт. Мировая грозовая активность осуществляет «подпитку» подсистем в системе ЗАИМ, стимулируя взаимодействие между ними.

Локальные эффекты гроз сводятся к нагреву нижней ионосферы, выпадению энергичных частиц, свечению атмосферы, генерации акустико-гравитационных волн (АГВ) и другим эффектам [1, 7].

Мощные атмосферные процессы. Наиболее ярким и мощным атмосферным процессом является тропический циклон (ТЦ). Рассмотрены три механизма воздействия ТЦ на верхнюю атмосферу и геокосмос: акустико-гравитационный, электромагнитный и квазистатический [6]. Вычислены плотности потока энергии инфразвуковых волн и ВГВ. Мощность излучения ВГВ для сильнейшего ТЦ достигает $10^{11}—10^{12}$ Вт. В то же время мощность излучения ВГВ всеми горными системами планеты (мощность орографических возмущений) составляет в среднем около 10^{11} Вт.

Интересным результатом является возможность генерации возмущений геомагнитного поля не только на частоте ВГВ (что естественно), но и на удвоенной частоте в результате нагрева газа диссипируемой на высотах 80—200 км ВГВ. Важно, что этот вывод подкрепляется результатами наблюдений возмущения давления, имевших составляющие

с периодами T около 2 и 1 ч. При этом возмущения D -компонента геомагнитного поля содержали составляющие с периодами 1 и 0.5 ч. Время запаздывания вариаций геомагнитного поля на удвоенной частоте по сравнению с изменениями давления воздуха на поверхности должно быть около $55 \div 60$ мин. Установлено, что наиболее вероятное значение периода ВГВ составляло 1.5 ч. Показано, что интенсивность излучения резко увеличивается в окрестности частоты, которой соответствует период 1.45 ч (при турбулентных пульсациях скорости ветра 6 м/с и радиусе вихря 500 км).

На высотах $100 \div 150$ км ВГВ становятся нелинейными, здесь скорость частиц в волне сопоставима со скоростью звука. Имеет место диссипация энергии этих волн, что способствует возникновению целого комплекса динамических и тепловых эффектов. К ним относятся: всплывание нагретого воздуха, развитие гидродинамической неустойчивости в атмосфере, интенсификация турбулентности, возбуждение струйного течения и диссипативных структур, неустойчивость АГВ, стимулированная значительным увеличением электрического поля на ионосферных высотах, генерация АГВ-вихрей и др.

Возникновение электромагнитного излучения ТЦ обусловлено грозовой деятельностью в ядре циклона. Генерируемое при этом ОНЧ-излучение эффективно взаимодействует с запасенными в радиационном поясе электронами. Оценки триггерного эффекта выпадения частиц выполнены в [6, 7].

Механизм генерации квазистатических возмущений электрического поля и результаты соответствующих наблюдений обсуждаются в [6, 7]. В этих работах указаны причины увеличения тока в приводной атмосфере. По-видимому, его рост обусловлен активизацией процесса образования и электризации аэрозолей в результате значительного усиления ветра в развившемся циклоне.

До последнего времени роль крупномасштабной термодинамической неустойчивости и электрических процессов в ТЦ недооценивалась. Расчеты автора показали, что электрические силы могут быть не только существенными, но и определяющими [6, 7]. Последняя ситуация может возникнуть в циклоне лишь тогда, когда плотность заряда $Q \geq 1$ мкКл/м³, а плотность тока $j_a \geq 0.1$ мкА/м². В этом случае воздействие ТЦ на ионосферу и магнитосферу тоже должно увеличиться, так как $j_a/j_{a0} \geq 10^5$. При достаточно больших значениях Q воздух в ТЦ ведет себя как плазмopodobная среда, помещенная во внешнее магнитное поле. В такой среде следует ожидать появления вихрей электромагнитной природы, волновых низкочастотных процессов, электрических структур, неустойчивос-

тей и т. д. В результате развития таких процессов возникают новые каналы воздействия циклона на ионосферу и магнитосферу.

Сильные землетрясения (ЗТ). Энергия сильнейшего ЗТ около 10^{19} Дж, мощность — 10^{17} Вт. Сейсмические процессы сопровождаются генерацией электромагнитного излучения в диапазоне частот $f \leq 1$ МГц, квазистатических электрических и магнитных полей, инфразвука и ВГВ. Их энергетика — значительна [1, 7]. Сильные землетрясения также вызывают комплекс процессов в системе ЗАИМ, которые носят крупномасштабный и глобальный характер. Примерами таких процессов являются: генерация и распространение волновых возмущений, стимулированное высыпание электронов, усиление уровня шумового радиоизлучения, турбулизация атмосферы и ионосферы и др.

Вулканизм. Извержение вулканов (ИВ) относится к одному из высокоэнергичных источников, способных существенно повлиять на систему ЗАИМ. Энерговыделение для сильнейшего ИВ достигает 10^{20} Дж, а средняя мощность — 10^{15} Вт. Для взрывных вулканов в энергию воздушных волн переходит около 0.01 %, т. е. 10^{16} Дж, их мощность составляет 10^{14} — 10^{15} Вт. Примерно такая же энергетика ЗТ, сопровождающего ИВ.

Эффекты, возникающие при ИВ, отчасти подобны тем, что сопутствуют ЗТ. Однако есть и существенное отличие. ИВ приводит к выбросу большого (~ 10 — 100 км³) количества пепла, вулканических газов (прежде всего CO_2) и аэрозолей с размерами 0.1—1 мкм. Попав в стратосферу (высоты 20—30 км), эти частицы находятся там от 0.5 года до 3 лет. Выбросы CO_2 усиливают парниковый эффект. Запыление стратосферы способствует поглощению и рассеянию солнечного света, в результате чего поверхность Земли недополучает значительное (до 10^{23} — 10^{25} Дж) количество теплоты. На Земле наступает «вулканическая» зима. В системе ЗАИМ явление вулканизма относится к триггерным. В работах [1, 7] показано, что коэффициент триггерности достигает 10^6 .

Таким образом, извержения сильнейших вулканов приводят к существенной и длительной (~ 1 года) перестройке теплового (и не только теплового) режима в системе ЗАИМ.

АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В СИСТЕМЕ ЗАИМ

Активные эксперименты (АЭ) оказались удобными для изучения образования ЗАИМ как системы и взаимодействия его подсистем. При этом становится возможным дозировать величину энерговыделения, его время и место.

Воздействие мощного радиоизлучения (МР).

Этот источник оказывается наиболее удобным для проведения АЭ, он оказывает только электромагнитное воздействие на плазму и является экологически «чистым». Выполнен анализ измерений, проведенных нами в 1972—2000 гг. (более 3000 ч наблюдений [1, 7]). Для воздействия на систему ЗАИМ использовались установки, удаленные от места наблюдения (г. Харьков) на расстояния $R \approx 100, 700, 1100, 2000$ и 10000 км. Их эффективная мощность составляла 10—380 МВт, $f = 1$ —8 МГц.

Автором экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения интенсивных (100—1000 %) крупномасштабных и слабых (1—10 %) глобальных аперриодических возмущений N в нижней ионосфере и волновых возмущений в средней ионосфере, сопровождаемых вариациями геомагнитного поля, стимулированных воздействием на ионосферу мощного нестационарного радиоизлучения декаметрового и гектометрового диапазонов. Процессы в нижней ионосфере связаны с перестройкой взаимодействий в системе ЗАИМ и высыпанием частиц из радиационного пояса, в средней ионосфере — с генерацией и распространением волн плотности с периодом 10—30 мин, продолжительностью 1—2 ч и скоростью 0.5—0.7 км/с. При этом $\Delta N/N = 1$ —10 % [1, 2].

Старты и полеты космических аппаратов. Ракеты с включенными двигателями оказывают на среду гидродинамическое, тепловое, электромагнитное, акустическое и химическое воздействия. В результате возникают геофизические, радиофизические, оптические и другие эффекты. Автором выполнен анализ наших измерений для более чем 400 стартов КА (более 20 типов ракет мощностью 10^7 — 10^{11} Вт) с 12 космодромов, 55 посадок КА и падений трех орбитальных станций [1, 7, 9, 12, 13, 16, 18]. Имели место и аварийные запуски КА. Установлено, что старты КА могут вызывать крупномасштабные и глобальные возмущения в системе ЗАИМ, перестраивать взаимодействия между ее подсистемами. Определены типы волн, переносящие возмущения.

Мощные взрывы. Автором проведен анализ результатов наших наблюдений, выполненных в 1980-х гг. Взрывы производились в СССР (полигоны Н. Земля, Семипалатинск, Капустин Яр), США (полигон Невада) и Китае [1, 7]. Энерговыделение при подземных ядерных взрывах (всего 55) изменялось примерно от 1 до 200 кт, при химических взрывах (всего 11) — от 1 до 10 т и подрывах ракет СС-20 (всего 24) — от 0.01 до 0.1 кт. Выполнен также анализ наблюдений за взрывом КА «Челленджер» 28 января 1986 г. в 08.39 UT у мыса Канаверал, химическим взрывом (0.12 кт) в Арза-

массе-16 4 июня 1988 г. в 05.40 UT и химическим взрывом (0.01 кт) в Павлограде 12 мая 1988 г. в 03.15 UT. В этих наблюдениях $R \approx 200\text{--}10000$ км. Лучше других регистрировались возмущения с $v = 0.3\text{--}0.7$ км/с (в нижней и средней ионосфере соответственно) и только при $R \leq 1000$ км. Сравнительно редко наблюдались возмущения с $v = 2\text{--}4$ км/с при $R \sim 1000\text{--}10000$ км. Еще реже отмечались процессы с $v = 10\text{--}50$ км/с.

ЭФФЕКТЫ АВАРИЙ, КАТАСТРОФ И ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМЕ ЗАИМ

Аварии на военных складах детально исследованы автором на примере событий возле г. Артемовск (2003 г.) и г. Мелитополь (2004 г.) [3, 4]. На складах в Артемовске хранилось 3.2 кт боеприпасов, прореагировало 1.7 кт, под Мелитополем — соответственно 91.6 и 18 кт. Радиус разлета боеприпасов и осколков в первом случае редко превышал 3—4 км, во втором — достигал 10—11 км. В целом величины эффектов взрывов в течение катастрофы под Мелитополем были примерно в 3—10 раз больше. Пожары были в десятки раз сильнее. Примерно во столько же раз были больше и экологические последствия [3—5].

В течение катастрофы 6—16 мая 2004 г. на складах вблизи г. Мелитополь энерговыделение составило около 20 ТДж. При взрывах разрушено и перемещено около 360 кт вещества. При этом образовано десятки килотонн пыли, в том числе и порядка 0.1—1 кт аэрозолей (часто заряженных), заброшенных на достаточно большие высоты, где время их оседания составляет 1—10 сут. Масса разлетевшихся в зоне радиусом до 10 км останков боеприпасов превышала 10 кт. Взрывы привели к генерации акустического излучения с суммарной энергией около 14 ТДж, его средняя мощность была близка к 0.2—1.4 ГВт. В спектре акустического излучения преобладали составляющие с частотами порядка 1—10 Гц.

Суммарная энергия сейсмических волн, сгенерированных взрывами, не превышала 1—2 ГДж. Их средняя мощность составляла десятки — сотни киловатт.

Вблизи очага катастрофы напряженность атмосферного электрического поля должна была на 3—4 порядка превышать ее фоновое значение и составлять 0.1—1 МВ/м. Вариации индукции геомагнитного поля должны были достигать значений в несколько десятков пикотесла. Взрывы боеприпасов сопровождалась генерацией электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

Взрывы на складах привели к крупномасштабным интенсивным пожарам. Их горизонтальный и

вертикальный размеры достигали 100 и 300 м соответственно. Массы сгоревших материалов, дыма и сажи составили около 10000, 1000 и 500 т соответственно. Энерговыделение при пожарах и их мощность примерно равнялись 100 ТДж и 5 ГВт.

Пожары вызвали генерацию АГВ со средней мощностью 15 МВт и энергией 300 ГДж. Следовало ожидать усиления излучения вблизи частот 1.9 и 3 мГц, а также в диапазонах частот 0.02—0.2 и 0.01—1 Гц.

Массовые взрывы и пожары нарушили тепловой и динамический режим в системе подстилающая поверхность — атмосфера. Генерация, распространение и диссипация АГВ активизировали взаимодействие нижней и верхней атмосфер. Существовали и другие каналы воздействия процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу, т. е. на всю систему ЗАИМ.

Важнейший результат исследований заключается в подтверждении установленного ранее автором [2] факта возможности стимуляции вторичных, значительно более энергичных процессов. Они связаны с рассеянием аэрозолями и поглощением сажей солнечного излучения продуктами взрывов и горения, выброшенными в стратосферу, а значит, частичным экранированием земной поверхности. Важно, что коэффициент триггерности в случае описываемой катастрофы составлял $10^3\text{--}10^4$ [3, 4]. В результате экранирования солнечного излучения земная поверхность недополучила за 10 сут около $2 \cdot 10^{18}$ Дж энергии. Примерно такая же энергия выделилась в атмосфере. К счастью, такие нарушения энергетического баланса не имеют катастрофического значения ни для земной поверхности, ни для атмосферы.

Военные действия в Ираке (2003 г.). Результаты исследований [2, 7] показали, что воздействие на атмосферу в ходе современных региональных ядерных войн может быть значительным. Наиболее существенные по энергетике экологические последствия связаны с выбросами мелкой пыли, дыма и сажи, которые частично экранируют солнечное излучение. Энергия вторичных процессов на 3—6 порядков превосходит энергию первичного источника. Несмотря на это, вторичные процессы не приводят к катастрофическим последствиям, если военные действия не принимают затяжного характера.

Возникающие в приземной среде возмущения распространяются на большие (~ 1000 км) расстояния и охватывают не только нижнюю атмосферу, но и среднюю и верхнюю атмосферу, а также ионосферу с магнитосферой, т. е. всю систему ЗАИМ [1, 2].

На примере военных действий в Ираке показано, что мощность и энерговыделение отдельного город-

ского пожара достигали 10 МВт и порядка 1 ТДж. Суммарное энерговыделение было около 400 ТДж при средней мощности, близкой к 4 ГВт. При этом в атмосферу было выброшено около 1 кт дыма и 0.5 кт сажи [2].

Энергия и средняя мощность вторичных процессов, обусловленных частичным экранированием солнечного излучения, составили около 170 ПДж и 1.7 ТВт. Величина акустической энергии, сгенерированной городскими пожарами, достигала 1 ТДж при средней мощности 10 МВт.

Горение нефтяных скважин — самый интенсивный источник возмущения параметров околоземной среды и процессов в ней. Мощность, выделяемая при горении скважины в ходе военных действий в Ираке, составляла десятки ГВт, энерговыделение — десятки ПДж, а высота термика — 3 км. Суммарное количество сгоревшей нефти приблизилось к 40 Мт, энерговыделение — к 1000 ПДж при средней мощности около 1 ТВт. В результате горения нефтяных скважин (около 50 штук) в атмосферу было выброшено почти 4 Мт дыма и 2 Мт сажи. Массы этих выбросов сравнялись или даже превзошли (для сажи) массы дыма и сажи во всей атмосфере. Это привело к эффекту частичного экранирования солнечного излучения, из-за которого земная поверхность недополучила около 10^{22} Дж энергии солнечного излучения. Средняя мощность этого вторичного (триггерного) процесса составила около 7 ПВт. Горение нефтескважин сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 4.5 ПДж и средней мощностью около 2 ГВт.

При пожарах на нефтехранилищах Ирака сгорело почти 1 Мт нефти, в атмосферу выброшено около 80 кт дыма и 40 кт сажи. Суммарное энерговыделение составило 30 ПДж при средней мощности 100 ГВт. Энергия и мощность вторичных процессов, связанных с экранированием солнечного излучения, составили $4 \cdot 10^{19}$ Дж и 0.1 ПВт. Горение нефтехранилищ сопровождалось генерацией АГВ с энергией около 100 ТДж и мощностью 0.3 ГВт. При пожарах в частотном спектре АГВ должно было иметь место усиление составляющих на частотах около 0.002, 0.1 и 1 Гц при среднем диаметре пламени 10 м.

В ходе военных действий при лесных пожарах может сгореть до нескольких Мт древесины. В атмосферу при этом будет выброшено сотни кт дыма и сажи. Суммарное энерговыделение от лесных пожаров может достичь десятков ПДж при средней мощности в несколько ТВт.

Кроме нарушения теплового и динамического режимов в системе подстилающая поверхность — атмосфера, к негативным экологическим последствиям приводят выбросы углеводородов (10÷100 % от фонового значения во всей атмосфере) и кислот

HCl , H_2SO_4 и HNO_3 (10 % от фонового значения во всей атмосфере). Такие выбросы следует признать если не катастрофическими, то по крайней мере недопустимыми.

Интенсивные пожары, выбросы наэлектризованной пыли и аэрозолей, инъекция радиоактивного вещества в результате использования боеголовок из слабо обогащенного урана, изменяя проводимость достаточно больших объемов атмосферного газа, должны приводить к существенному возмущению электрических параметров атмосферы над регионом ВД и глобальной электрической цепи в целом.

Значительная энергетика АГВ обуславливает нарушение режима взаимодействия нижней и верхней атмосфер, а также возникновение вторичных процессов. Имеют место и другие каналы воздействия (электрического и электромагнитного типов) процессов в приземной атмосфере на ионосферу и магнитосферу, а значит, и на всю систему ЗАИМ.

ВОЛНОВЫЕ И КОРПУСКУЛЯРНЫЕ КАНАЛЫ ОБМЕНА ЭНЕРГИЕЙ

Взаимодействие между подсистемами в системе ЗАИМ осуществляется при помощи волн различной физической природы (квазистатических полей) и потоков частиц. Так, из литосферы и приземной атмосферы в геокосмос поступает энергия в виде электромагнитного излучения, квазистатических электрических и магнитных полей, АГВ и т. п. В частности, вдоль магнитных силовых линий переносятся энергия ионосферных электрических полей и потоки холодной плазмы из ионосферы (в дневное время), вниз устремляются потоки высокоэнергичных частиц и потоки холодной плазмы (в ночное время). Пример расчета плотностей потоков энергии Π_i и Π ионосферного электрического поля E_i и высыпавшихся электронов с энергией 10—100 кэВ приведен в [1, 7, 14]. Важно, что Π_i и Π могут быть одного порядка.

Волновые процессы. Перенос возмущений от источников энерговыделения до места наблюдения осуществляется при помощи волн (как линейных, так и нелинейных вблизи от источника) [1, 7, 10, 11, 19]. Разновидностью последних есть ударные волны и солитоны.

Стимулированное высыпание частиц. Автором предложен достаточно универсальный и эффективный механизм высыпания частиц из радиационного пояса, связанный с замедлением электронов в электрическом поле поляризации $PE_p = E_i |\Delta N/N|$, ΔN — возмущение N в E-области ионосферы с горизонтальным размером L_{\perp} . При $E_i \approx 3$ мВ/м, $L_{\perp} \sim 100$ —1000 км и $\Delta N/N \approx 1$ имеем $E_p \approx 3$ мВ/м и

изменение «поперечной» энергии электронов, захваченных в геомагнитную ловушку, $\Delta \varepsilon_{\perp} \approx eE_{\perp}L_{\perp} \approx 0.3-3$ кэВ. Такого уменьшения энергии часто достаточно для стимуляции высыпания электронов. Этот механизм, по-видимому, наблюдался нами при воздействии МР, ЗС, ЗТ, прохождении СТ и т. п. По измеренным значениям N и ΔN для различных событий оценены плотности потока $\Pi_{e,p}$ электронов и протонов. Оказалось, что $\Pi_e \approx 10^7-10^9$ м⁻²с⁻¹ [1, 7].

Второй эффективный механизм высыпания электронов связан с генерацией циклотронной неустойчивости. Число n энергичных частиц в силовой трубке и плотность w энергии ОНЧ-волн описывается нелинейными уравнениями, приведенными в [1, 7]. Например, при инжекции ОНЧ-энергии молнии с удельной мощностью $I_w = 0.1-1$ пВт/м³ имеем $n \approx 4 \cdot 10^{11}$ м⁻² и $\Pi_e \approx 2 \cdot 10^{10}-2 \cdot 10^{11}$ м⁻²с⁻¹.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обосновано, что образование ЗАИМ является сложной открытой динамической нелинейной системой. Сформулированы основные положения системной парадигмы.

2. Показано, что к важнейшим свойствам системы ЗАИМ относится появление триггерных механизмов высвобождения энергии. В ряде случаев коэффициент триггерности может достигать значений 10^5-10^{10} .

3. Продемонстрировано, что высокоэнергичные явления (землетрясения, вулканизм, мощные атмосферные процессы, грозы, терминатор, затмения Солнца, вспышки на Солнце, выбросы корональной массы, геокосмические бури и т.п.) вызывают комплекс процессов в системе ЗАИМ, приводят к перестройке характера взаимодействий подсистем, к накоплению и высвобождению энергии в них.

4. Установлены механизмы и каналы взаимодействия подсистем. Воздействие мощных источников на атмосферу, ионосферу и магнитосферу осуществляется, по крайней мере, по трем каналам: акустико-гравитационному, электромагнитному и электро- и магнитоквазистатическому, с которыми связаны генерация волн и полей соответствующей природы.

Заложены основы построения моделей главных процессов в системах тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ТАИМ) и океан — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ОАИМ).

5. Продемонстрировано, что подсистемы и вся система ЗАИМ в целом являются нелинейными.

6. Взаимодействие между подсистемами в системе ЗАИМ осуществляется при помощи волн раз-

личной физической природы, квазистатических полей, потоков частиц, тепла и т. п. Выявлены или отождествлены типы волн, переносящие возмущения в системе ЗАИМ на значительные и глобальные расстояния. Предложен достаточно универсальный механизм высыпания электронов из радиационного поля. Показано, что высыпание электронов в средних широтах сопровождается большинством нестационарных процессов в системе ЗАИМ. Их потоки — порядка 10^7-10^9 м⁻²с⁻¹.

7. Активные эксперименты оказались весьма эффективными для моделирования процессов в подсистемах и изучения механизмов их взаимодействия. Они показали ограниченность линейного описания реакции подсистем на мощное энерговыделение, позволили установить возможность возникновения крупномасштабных и глобальных возмущений при локальном и локализованном энерговыделении.

8. Крупномасштабные неядерные военные действия, а также аварии и катастрофы на военных складах и базах, являясь разновидностью активных экспериментов, приводят к комплексу эффектов не только на поверхности планеты и в приземной атмосфере, но и в остальных частях атмосферы, в ионосфере и в магнитосфере, т. е. в системе ЗАИМ в целом. Энергетика и экологические последствия соответствующих процессов могут быть значительными.

9. Системная парадигма должна стать основой теории, методом и методологией изучения системы ЗАИМ как сложного открытого диссипативного динамического нелинейного объекта.

1. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 59—106.
2. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март—апрель 2003 г.) // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С. 13—33.
3. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске // Геофиз. журн.—2004.—26, № 4.—С. 31—44.
4. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь // Геофиз. журн.—2004.—26, № 6.—С. 61.
5. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах — источник экологических катастроф в Украине // Экология и ресурсы.—2004.—№ 10.—С. 55—67.
6. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 16.
7. Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (Часть 1) // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697; Часть 2.—2007.—5, № 4.—С. 225—246.
8. Akimov L. A., Bogovskii V. K., Grigorenko E. I., et al. Atmospheric-Ionospheric Effects of the Solar Eclipse of May 31,

- 2003, in Kharkov // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2005.—45, N 4.—P. 494—518.
9. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric wave disturbances accompanied by rocket launches against a background of natural transient processes // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2004.—44, N 4.—P. 476—491.
 10. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 1. Kharkov incoherent scatter radar observations // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2006.—46, N 2.—P. 183—198.
 11. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave-like processes in the ionosphere under quiet and disturbed conditions. 2. Analysis of observations and simulation // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2006.—46, N 2.—P. 199—208.
 12. Burmaka V. P., Lysenko V. N., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. Wave-like processes in the ionospheric f region that accompanied rocket launches from the Baikonur site // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2006.—46, N 6.—P. 742—759.
 13. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U. S. powerful space vehicle launching // *Radio Physics and Radio Astronomy*.—1998.—3, N 2.—P. 181—190.
 14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // *Radio Physics and Radio Astronomy*.—1998.—3, N 2.—P. 191—197.
 15. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near-earth plasma // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2000.—N 3.—P. 514—516.
 16. Chernogor L. F., Kostrov L. S., Rozumenko V. T. Radio probing of the perturbations originating in the near-earth plasma from natural and anthropogenic energy sources // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2000.—N 3.—P. 497—500.
 17. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // *Int. J. Geomagn. Aeron.*—2007.—7, G13001.—doi:10.1029/2005GI000125.
 18. Garmash, K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., et al. Global ionospheric disturbances caused by a rocket launch against a background of a magnetic storm // *Geomagnetism and Aeronomy*.—1999.—39, N 1.—P. 69—75.
 19. Grigorenko E. I., Lazorenko S. V., Taran V. I., Chernogor L. F. Wave disturbances in the ionosphere accompanying the solar flare and the strongest magnetic storm of September 25, 1998 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2003.—43, N 6.—P. 718—735.
 20. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Specific features of the ionospheric storm of March 20—23, 2003 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2005.—45, N 6.—P. 745—757.
 21. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., et al. Dynamic processes in the ionosphere during the strongest magnetic storm of May 30—31, 2003 // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2005.—45, N 6.—P. 758—777.
 22. Panasenko S. V., Chernogor L. F. Event of the November 7—10, 2004 magnetic storm in the lower ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*.—2007.—47, N 5.—P. 608—620.

PHYSICS AND ECOLOGY OF THE EARTH-ATMOSPHERE-IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE SYSTEM

L. F. Chernogor

The Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system is proved to be a complex open dynamical nonlinear system. The basic ideas of the system paradigm are stated. The high-energy phenomena in the system are shown to be a cause of a myriad of, as a rule, nonlinear processes and of the rearrangement in the character of subsystem coupling. Ecological consequences of accidents, catastrophes, and regional wars in the Earth-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system are discussed.

А. А. Логинов, В. А. Ткаченко, О. К. Черемных

Институт космических исследований НАНУ и НКАУ, Киев.

О гидродинамическом механизме смены фаз динамо-цикла Солнца

Представлено 25.06.07

Запропоновано модель механізму зміни фаз генерації магнітного поля Сонця. Суть механізму згідно запропонованої моделі полягає в наступному. Через втрату стійкості тороїдального диференціального обертання Сонця при досягненні порогового значення залежності кутової швидкості від радіуса та широти $\Omega(r, \theta)$ виникає колоїдальна течія та пов'язаний з нею динамо-процес, який породжує змінне магнітне поле Сонця. Дія на полоїдальну течію сили Коріоліса гальмує диференційне обертання, наслідком чого буде зміна профілю $\Omega(r, \theta)$ та порушення умови нестійкості. Це призводить в свою чергу до зникнення колоїдальної течії і припинення динамо-процеса. Потім диференціальне обертання відновлюється, динамо-процес поновлюється та при досягненні порогового значення кутової швидкості знову виникає зародження змінного магнітного поля Сонця.

В последнее время достигнут определенный прогресс в понимании механизма генерации магнитного поля Солнца, который принято называть «динамо»-процессом [12]. Проблема происхождения и поддержания магнитного поля Солнца актуальна для объяснения изменения его полярности и физических процессов, сопровождающих цикл солнечной активности, а также при изучении ряда астрофизических явлений. Впервые она была сформулирована в знаменитой работе Лармора [21].

Значительную роль в развитии теории магнитного динамо и ее приложений сыграла теорема «вмороженности» магнитных силовых линий в движущуюся идеально проводящую среду, сформулированная Альвенем [13]. Эффект вмороженности силовых линий в плазменную среду приводит к тому, что при движении последней магнитное поле может нарастать. Простейшим примером такого процесса является усиление магнитного поля при сжатии проводящего вещества.

Обычно говорят, что первые результаты теории динамо были отрицательными. Так, широкую известность получила теорема Каулинга [7, 14] о невозможности поддержания магнитного поля осесимметричным движением проводящей жидкости и последующие ее обобщения на случай двумерного движения [6], а также других движений с простой симметрией. Сегодня, однако, уже можно говорить о позитивном значении работ этого периода. Именно после их опубликования стало ясно, что движения, способные поддерживать и генерировать магнитные поля, должны быть несимметричными и трехмерными. Кроме того, в этих работах были открыты некоторые эффекты, которые сейчас являются составной частью любой современной теории динамо-процесса, например диамагнитный эффект выталкивания силовых линий магнитного поля из турбулентной проводящей среды [6].

Таким образом, можно сказать, что теория динамо — это теория возбуждения магнитных полей трехмерными несимметричными движениями проводящей среды. Для реализации динамо должна быть нарушена отражательная симметрия движений, простейшей мерой которой служит спиральность [12] (произведение завихренности на скорость). Именно после того, как Паркером [22], Брагинским [1—4] и особенно Штейнбеком, Краузе и Редлером [27] было установлено, что проводящая среда, мелкомасштабные движения которой имеют спиралевидный характер, способна генерировать крупномасштабные магнитные поля, и начался современный этап развития теории динамо.

Приводным механизмом динамо-процесса на Солнце, по нашему мнению, является дифференциальное вращение плазмы, обусловленное неоднородным вращением Солнца, т. е. зависимостью уг-

ловой скорости от широты и от радиуса [8]. Помимо общефизического интереса к его происхождению, изучение неоднородного вращения является актуальным также и с той точки зрения, что оно, по-видимому, играет ключевую роль в формировании магнитной активности Солнца: одиннадцатилетний солнечный цикл, вспышки и пятна на солнечной поверхности и т. д. [25].

В последние годы повышенное внимание к дифференциальному вращению было обусловлено рядом экспериментальных и теоретических достижений. Во-первых, метод доплер-зеemanовских изображений позволил анализировать движение пятен по поверхности Солнца и определять вращения глубинных слоев Солнца. Во-вторых, развитие гелиосейсмологии [5] позволило по наблюдаемым частотам глобальных колебаний определить распределение угловой скорости не только на поверхности Солнца, но и в его глубине [24, 28]. В-третьих, развитие теории достигло определенной степени завершенности, о чем свидетельствует появление количественных характеристик дифференциального вращения. Можно сказать, что на сегодняшний день теория адекватно описывает внутреннее вращение Солнца и находится в хорошем согласии с данными гелиосейсмологии, а ее предсказания подтверждаются наблюдениями [8].

В настоящее время принято считать, что дифференциальное вращение на Солнце возникает из-за взаимодействия конвективного движения плазменной среды с ее глобальным вращением. Конвективная турбулентность во вращающейся среде испытывает влияние кориолисовых сил, которое модифицирует вращение, делая его неоднородным. Впервые эта идея была высказана в работе А. И. Лебединского [10], в которой было показано, что режим дифференциального вращения на Солнце устанавливается вследствие турбулентного переноса углового момента из внутренних областей наружу. Наличие ненулевых турбулентных потоков углового момента во вращающихся средах называют Λ -эффектом [23].

Известно, что в неоднородной вращающейся среде при определенных условиях возникает полоидальное течение [11, 16—18]. На Солнце полоидальное течение направлено от экватора к полюсам вблизи поверхности Солнца и от полюсов к экватору — в глубине конвективной зоны [8]. Полоидальная циркуляция на Солнце подтверждается наблюдениями. В частности, доплеровские измерения свидетельствуют о том, что течение плазмы от экватора к полюсам на солнечной поверхности происходит со средней скоростью порядка 10 м/с [19]. В последнее время данные гелиосейсмологии указывают на наличие глубинного полоидального течения [29].

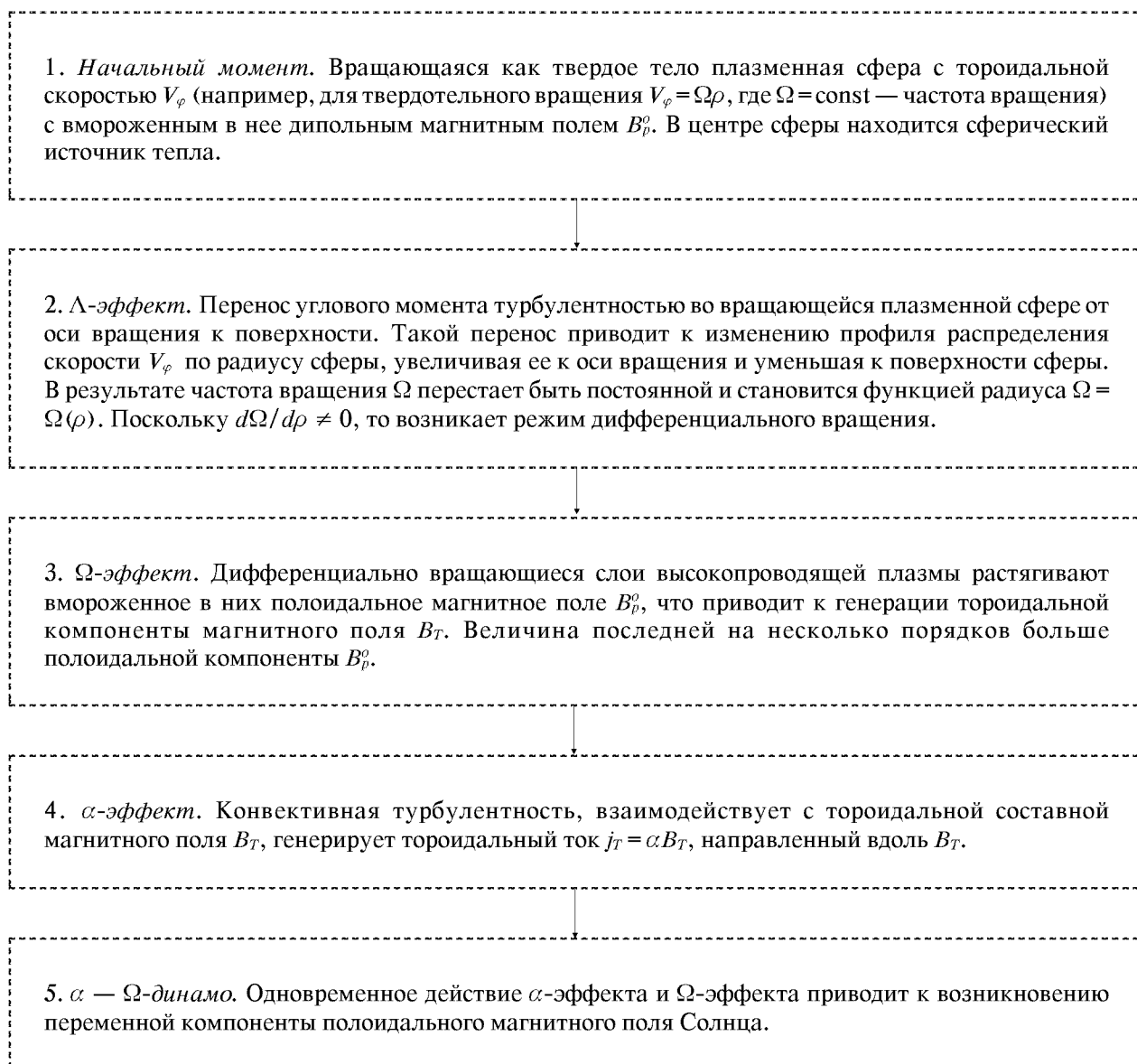


Рис. 1. Последовательность физических процессов при генерации магнитного поля Солнца

Дифференциальное вращение взаимодействует с постоянно присутствующим на Солнце полоидальным магнитным полем B_p^0 , (медленно затухающим реликтовым магнитным полем, захваченным при аккреции Солнца). Вследствие вмороженности B_p^0 в высокопроводящую плазму последнее увлекается тороидальным сдвиговым течением и усиливается, генерируя тороидальное магнитное поле B_T (так называемый Ω -эффект [22]). Известно, что спиральное турбулентное течение высокопроводящей

плазмы при наличии тороидального магнитного поля генерирует тороидальный ток $j_T = \alpha B_T$ [12] (так называемый α -эффект, где α — параметр турбулентных пульсаций [26]), который, в свою очередь, является источником переменного полоидального магнитного поля Солнца. Одновременное действие α -эффекта и Ω -эффекта называется $\alpha - \Omega$ -динамо. Схема, поясняющая суть динамо-процесса, приведена на рис. 1.

В весьма запутанной картине наблюдаемых на

Солнце процессов различных пространственно-временных масштабов и их сложном влиянии друг на друга нелегко выделить причины и следствия различных явлений во времени. Тем более что процесс, являющийся в данный момент причиной возникновения другого процесса, в последующем может являться причиной изменения динамики первого процесса вплоть до его полного исчезновения. В тоже время одно явление-причина может породить несколько явлений-следствий. Так, в приведенной выше схеме мелкомасштабная конвективная турбулентность во вращающейся плазме лежит в основе двух глобальных эффектов: Λ -эффекта и α -эффекта. Поэтому становится понятной трудность описания динамики простого процесса, и тем более такого сложного, как динамо-процесс. Обычно в теории солнечных процессов при их описании от возникновения до полного развития или исчезновения говорят об исчерпании причин, породивших эти процессы. Установление связи между наблюдаемыми процессами затрудняет также пороговый характер их проявления, когда достаточно заметное изменение наблюдаемых параметров вдали от их пороговых значений не приводит к качественным изменениям наблюдаемого явления, а вблизи пороговых значений незаметное для наблюдения изменение параметров качественно изменяет наблюдаемый процесс.

К пороговым явлениям относится, в частности, и генерация полоидального течения вследствие потери устойчивости дифференциально вращающейся плазменной сферы. По нашему мнению, приведенную выше общепринятую схему динамо-процесса следует уточнить и расширить, включив в нее явление полоидального течения, наблюдаемое на Солнце. Проанализируем качественно, к чему это может привести. В литературе известен критерий устойчивости неоднородного вращения жидкости — это критерий Тейлора для течения Куэтта [9]. В нашем случае вращение плазменной сферы будет устойчиво, если в любой ее точке выполняется неравенство

$$\mu(\rho) \frac{d\mu(\rho)}{d\rho} > 0,$$

где $\mu = m\rho V_\varphi$ — угловой момент единичной массы m , возрастающий с радиусом ρ . Такой режим вращения можно называть докритическим. Режим течения $d\mu(\rho)/d\rho = 0$ будем называть пороговым или критическим, поскольку условие $d\mu(\rho)/d\rho = 0$ определяет границу устойчивости. Течение, для которого неравенство нарушено, назовем надкритическим.

Численное моделирование, проведенное ранее в [11] для жидкости, заключенной между вращающимися сферами, показало, что в надкритическом

режиме вращения сферического слоя жидкости происходит потеря устойчивости в виде возникновения и быстрого нарастания полоидальной компоненты течения. Эта компонента отсутствует в докритическом и критическом режимах вращения. В гидродинамике этот эффект хорошо известен и, например, имеет место в уже упоминавшемся выше течении Куэтта. Таким образом переход в надкритическом режим вращения в солнечной конвективной зоне приводит к генерации полоидального течения, которое имеет форму «чечевицы»: на дне конвективной зоны оно направлено от полюсов к экватору, а на поверхности — от экватора к полюсам [8] (см. рис. 2). Отметим, что на рис. 2 показано, что направление скорости полоидального течения в плоскости экватора и на оси вращения имеет чисто радиальное направление. Вектор скорости V_p полностью лежит в меридиональной плоскости, и при обходе вдоль замкнутой линии тока совершает поворот на 360° .

На возникшее полоидальное течение действует сила Кориолиса $F_k \sim V_p \times \Omega$ (V_p — полоидальная скорость течения, Ω — частота вращения). Поскольку Ω и V_p лежат в меридиональной плоскости, то сила Кориолиса ей перпендикулярна, и имеет только φ -ю составляющую в сферической системе координат, связанных с Солнцем. Так как вектор скорости полоидального течения изменяет направление при движении вдоль любой линии тока полоидального течения, то сила Кориолиса действует в противоположных направлениях для приповерхностных и глубинных слоев плазмы. Поэтому весь объем плазмы условно делится на две области по отношению к направлению действия силы Кориолиса: объем, где F_k направлена на восток, и объем, где F_k направлена на запад. На рис. 3 эти области обозначены цифрами 1 и 2, соответственно.

На рис. 3 в плоскости экваториального сечения качественно представлено поведение тороидальной скорости и действие кориолисовых сил вне области твердотельного вращения. Заметим, что в экваториальной плоскости, где полоидальное течение строго радиально и направлено изнутри наружу, сила Кориолиса действует только в западном направлении. На полюсах сила Кориолиса отсутствует. Необходимо отметить, что в области 1 скорость V_φ меньше, чем в области 2, что является следствием Λ -эффекта. При этом во всей области полоидального движения имеет место конкуренция λ -эффекта и силы Кориолиса. В области 1 такая конкуренция приведет к увеличению тороидальной скорости, а в области 2 — к ее уменьшению. Можно сказать, что сила Кориолиса стремится устранить влияние Λ -эффекта, уменьшая угловой момент в глубинных слоях Солнца и увеличивая

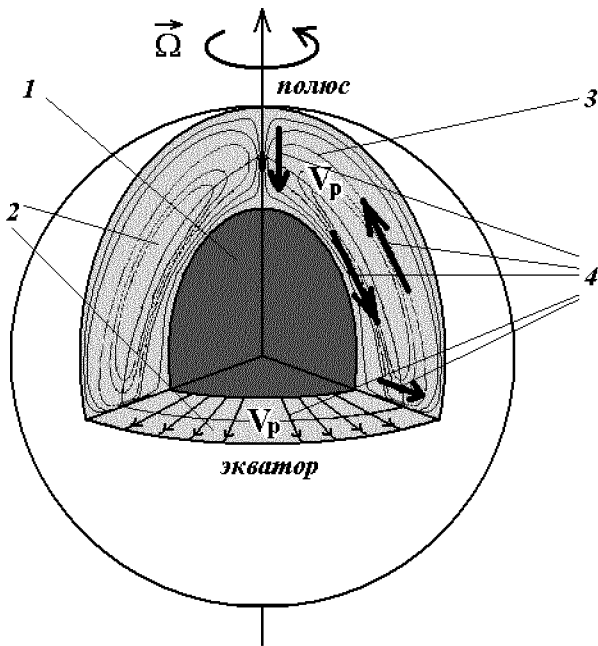


Рис. 2. Полоидальное течение на Солнце: 1 — область твердотельного вращения, 2 — область полоидального течения, 3 — линии тока полоидального течения, 4 — направление скорости V_p полоидального течения

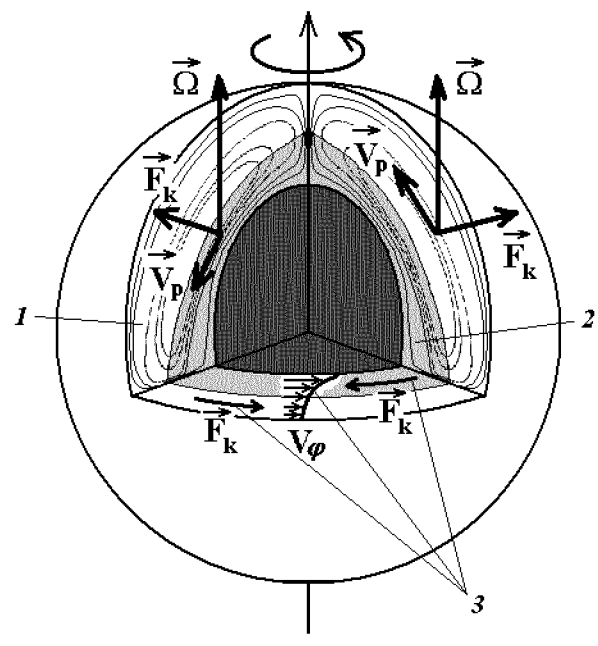


Рис. 3. Схема действия силы Кориолиса F_k на профиль распределения тороидальной скорости V_ϕ по радиусу: 1 — часть области полоидального течения, где F_k направлена на восток, 2 — часть области полоидального течения, где F_k направлена на запад, 3 — профиль распределения тороидальной скорости V_ϕ по радиусу и воздействующая на него сила Кориолиса F_k

угловой момент вблизи его поверхности. При определенных условиях сила Кориолиса переводит вращение плазмы из надкритического состояния в докритическое. Когда профиль зависимости частоты вращения от радиуса r и широты θ достигнет некоторого порогового значения [11], дифференциальное течение станет устойчивым и, как следствие, полоидальное течение исчезнет, а сила Кориолиса обратится в ноль. Переход вращения плазмы из надкритического состояния в докритическое приводит к срыву генерации тороидального магнитного поля и его исчезновению, т. е. к прекращению действия Ω -эффекта. Это в свою очередь приведет к исчезновению эффекта α — Ω -динамо, а вместе с ним — и генерации переменной составляющей полоидального магнитного поля. Затем динамоцикл возобновляется вследствие Λ -эффекта.

Подводя итоги проведенного качественного анализа, отметим, что в основе смены фаз динамо-процесса, по нашему мнению, лежит пороговый механизм потери устойчивости дифференциального вращения солнечной плазмы и генерации полоидальной компоненты глобального течения Солнца.

Остановимся еще на одном чисто гидродинамическом эффекте, вытекающем из проведенного анализа. Как отмечалось выше, действие Λ -эффекта

на некотором первоначальном промежутке времени приводит к переносу углового момента из глубин Солнца к его поверхности, что выражается в постепенном уменьшении тороидальной скорости V_ϕ на поверхности. Затем, по прошествии некоторого времени, имеет место переход дифференциального вращения из докритического состояния в надкритическое, что приводит к потере устойчивости тороидального течения и возникновению полоидального течения на Солнце. Полоидальное течение характеризуется нарастанием величины скорости и одновременным увеличением кориолисовой силы. Действие силы Кориолиса в области 1 приводит к постепенному увеличению тороидальной скорости V_ϕ на поверхности вплоть до момента перехода тороидального течения в устойчивое докритическое состояние. Этот переход сопровождается исчезновением полоидального течения и силы Кориолиса. По этой причине останавливается рост тороидальной скорости V_ϕ на поверхности и начинается ее уменьшение вследствие действия Λ -эффекта. Описанный процесс является протяженным во времени и, по видимому, периодическим. Заметим, что эффект

периодического нарастания и уменьшения скорости вращения поверхности Солнца подтвержден наблюдениями и получил название крутильных колебаний Солнца [15, 20]. Поскольку характерный период этих колебаний совпадает с периодом смены полярности магнитного поля Солнца, то можно предположить, что влияние сил Кориолиса на динамо-процесс необходимо учитывать в теории генерации магнитного поля Солнца.

1. Брагинский С. И. Кинематические модели земного магнитного динамо // Геомагн. Аэрон.—1964.—4.—С. 572—583.
2. Брагинский С. И. Магнитогидродинамика земного ядра // Геомагн. Аэрон.—1964.—4.—С. 698—711.
3. Брагинский С. И. Самовозбуждение магнитного поля при движении высокопроводящей жидкости // ЖЭТФ.—1964.—48.—С. 1084.
4. Брагинский С. И. Теория гидромагнитного динамо // ЖЭТФ.—1964.—48.—С. 2178.
5. Воронцов С. В., Жарков В. Н. // Итоги науки и техники. Астрономия.—1988.—Т. 38.—253 с.
6. Зельдович Я. Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей турбулентной жидкости // ЖЭТФ.—1956.—31.—С. 154—146.
7. Каулинг Т. Магнитная гидродинамика. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959.
8. Кичатинов Л. Л. Дифференциальное вращение звезд // Успехи физ. наук.—2005.—175, № 5.—С. 475—494.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1986.—733 с.
10. Лебединский А. И. Вращение Солнца // Астрон. журн.—1941.—18, № 1.—С. 10—25.
11. Логинов А. А., Самойленко Ю. И., Ткаченко В. А. Возмущение меридионального течения дифференциальным вращением в жидком ядре Земли // Космічна наука и технологія.—2000.—6, № 2/3.—С. 53—68.
12. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. — М.: Мир, 1980.—340 с.
13. Alfvén H. On the existence of electromagnetic-hydrodynamic waves // Arkiv. F. Mat. Astron. Fysic.—1942.—29B, N 2.—7 p.
14. Cowling T. G. The magnetic field of sunspots // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1934.—94.—P. 39—48.
15. Howard R. E., LaBonte B. J. The sun is observed to be a torsional oscillator with a period of 11 years // Astrophys. J. Lett.—1980.—239.—P. L33—L36.
16. Kippenhahn R. Differential rotation in stars with convective envelopes // Astrophys. J.—1963.—137.—P. 664—678.
17. Kitchatinov L. L., Rudiger G. Differential rotation in solar-type stars: revisiting the Taylor-number puzzle // Astron. and Astrophys.—1995.—299.—P. 446.
18. Kitchatinov L. L., Rudiger G. Differential rotation models for late-type dwarfs and giants // Astron. and Astrophys.—1999.—344.—P. 911—917.
19. Komm R. W., Howard R. E., Harvey J. W. Meridional flow of small photospheric magnetic features // Solar. Phys.—1993.—147, N 2.—P. 207—223.
20. LaBonte B. J., Howard R. Torsional waves on the Sun and the activity cycle // Solar Phys.—1982.—75.—P. 161—178.
21. Larmor I. How could a rotation body such as the Sun become a magnet // Rep. Brit. Assoc. Adv. Sci.—1919.—P. 159—160.
22. Parker E. N. Hydromagnetic dynamo models // Astrophys. J.—1955.—122.—P. 293—314.
23. Rudiger G. Reynolds stresses and differential rotation. I. On recent calculations of zonal fluxes in slowly rotating stars // Geophys. and Astrophys. Fluid Dynamics.—1980.—16, N 1.—P. 239—261.
24. Sehou J., et al. Helioseismic studies of differential rotation in the solar envelope by the solar oscillations investigation using the Michelson Doppler imager // Astrophys. J.—1998.—505, N 1.—P. 390—417.
25. Sokoloff D. D. The Maunder minimum and the solar dynamo // Solar Phys.—2004.—224.—P. 145—152.
26. Steenbeck M., Krause F. The generation of stellar and planetary magnetic fields by turbulent dynamo action // Z. Naturforsch.—1966.—21a.—P. 1285—1296.
27. Steenbeck M., Krause F., Radler K. A calculation of the mean electromotive force in an electrically conducting fluid in turbulent motion under the influence of Coriolis forces // Z. Naturforsch.—1966.—21a.—P. 369—376.
28. Wilson P. R., Burtonclay D., Li Y. The rotational structure of the region below the solar convection zone // Astrophys. J.—1997.—489.—P. 395—402.
29. Zhao J., Kosovichev A. G. Torsional oscillation, meridional flows, and vorticity inferred in the upper convection zone of the Sun by time-distance helioseismology // Astrophys. J.—2004.—603, N 2.—P. 776—784.

ON HYDRODYNAMIC MECHANISM OF PHASE CHANGE OF THE SUN'S DYNAMO-CYCLE

A. A. Loginov, V. A. Tkachenko, O. K. Cheremnykh

The model of phase change for the Sun's magnetic field generation is proposed. The mechanism of the change is as follows. Due to stability loss of toroidal differential rotation of the Sun at the threshold value of the relationship between the angular velocity and radius and latitude $\Omega(r, \theta)$ poloidal flows arise and the dynamo-process associated with them and generating the Sun's variable magnetic field occurs. Influence of the Coriolis force on the poloidal flows brakes the differential rotation, which causes a change in structure of $\Omega(r, \theta)$ and violation of the instability condition. This results in the disappearance of the poloidal flows and in the interruption of the dynamo-process. Then the differential rotation and dynamo-cycle are regained and when the angular velocity reaches the threshold value the Sun's variable magnetic field is generated again.