

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ БАРХАТОВ – МОМЕНТЫ БИОГРАФИИ

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ БАРХАТОВ – МОМЕНТЫ БИОГРАФИИ

Н.А. Бархатов

Научно-исследовательский радиофизический институт

Александр Николаевич Бархатов (13.02.1912 – 26.03.1993) – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой акустики радиофизического факультета ГГУ, декан радиофизического факультета ГГУ, проректор ГГУ по научной работе, участник Великой Отечественной войны, создатель первой в Советском Союзе научной лаборатории по изучению распространения акустических волн в неоднородных средах методом моделирования.

1. История семьи

Александр Николаевич Бархатов (А.Н.) родился 13 февраля (по новому стилю) 1912 года в Нижнем Новгороде. В то время его отец, Николай Александрович, был ветеринарным врачом и заведующим нижегородской бойней, мать, Таисия Петровна, – домохозяйкой.

7 октября 1916 г. родилась сестра А.Н., Наталья. Как часто бывает в семьях при рождении младших детей, о старших начинают понемногу забывать. К сожалению, в то революционное время это было особенно опасно, и только характер Александра



Николай Александрович и
Таисия Петровна



Шуре два года (1914)



Наташа, сестра

позволил ему «не сойти с пути». Более того, он с детства проявил интерес к познанию мира и стремление к порядку, а его усидчивость и ум сыграли положительную роль в школе, которую он закончил в 1928 г., сдав экзамены за последние два года экстерном. Сестра Наталья в дальнейшем закончила биологический факультет Горьковского университета вместе с подругой Катей Лукиной, которая впоследствии стала женой А.Н. Бархатова. Наталья Николаевна всю жизнь проработала врачом станции переливания крови в Нижнем Новгороде. А Екатерина Васильевна Лукина, став доцентом кафедры систематики растений и геоботаники биологического факультета ГГУ, внесла огромный вклад в дело изучения растительного покрова Нижегородской области и охраны ценных уголков ее природы.

Отец А.Н., Николай Александрович, в молодости был активным юношей, он получил должность секретаря Земского собрания, но финансовые неурядицы и неустойчивость положения на этом представительском поприще стимулировала его искать более надежной профессии. На накопленные деньги он получил высшее образование на ветеринарном отделении Казанского университета. По окончании стал ветеринарным врачом, вошел в Общественную организацию ветеринарных врачей России, а вскоре занял должность заведующего нижегородской бойней.

Как ветеринарный врач Николай Александрович имел большую частную прак-



Катя Лукина, впоследствии жена



Семья Бархатовых в 1928 г.

тику и вполне надежное финансовое положение, что позволило ему приобрести два доходных двухэтажных особняка на нынешней ул. Володарского (напротив роддома №1) и жениться. Особняки довольно долго простояли на улице Володарского, чему не в последнюю очередь способствовала табличка на одном из них «Здесь В.И. Ленин встречался с Нижегородскими марксистами».

Мать А.Н., Таисия Петровна, была дочерью Петра Федоровича Лествицина, протоиерея Арзамасского Алексеевского женского монастыря. Таисия Петровна имела значительное наследство, что по тем временам было важным козырем при замужестве. В семьях детей было много, и один из ее братьев, Михаил, породнился с приваловскими миллионерами – был женат на дочери известного сибирского предпринимателя Ивана Привалова. Таисия Петровна никогда не работала и была домохозяйкой. Конечно, принадлежность Бархатовых и их родственников к сословию священников ударила по ним уже в первые годы советской власти. Несколько священников сгинули в застенках ГПУ, из них, пожалуй, самый известный – Авенир Федорович Ильинский – настоятель Борисо-Покровской церкви на ул. Ильинской в Нижнем Новгороде.

2. Довоенные годы

В 1928 году Александр Николаевич окончил Канавинскую школу 2-ой ступени имени Карла Маркса и поступил на физико-техническое отделение педагогического факультета Нижегородского государственного университета. В то время в НГУ математику преподавали профессора: И.Р. Брайцев, Л.А. Люстерник и Л.И. Поливанов, а физику – профессор А.Н. Зильберман. В 1930 г. произошла реорганизация университета. Поэтому Александру Николаевичу пришлось продолжить курс обучения в Нижегородском педагогическом институте, который он закончил в 1932 г.

Получив квалификацию преподавателя средней школы по физике и математике, А.Н. Бархатов в течение двух лет преподавал эти предметы в школах: колхозной молодежи в с. Кай Нижегородского края (1932 г.), ФЗУ завода «Красная Этна» (1932 – 1933 гг.), № 8 г. Горького (1933 – 1934 гг.). События довоенных и предвоенных лет нашли свое отражение в первой части воспоминаний, которая получила название «В те тридцатые годы...» и была написана в 1987 г., когда, наконец, у А.Н. появилось свободное время для оценки прожитой жизни.

В сентябре 1934 г. А.Н. Бархатов поступил на работу в Горьковский индустриальный институт (ГИИ) в качестве ассистента кафедры физики. С этого времени начинается его научно-педагогическая деятельность в высшей школе. В Индустриальном институте он проработал до февраля 1942 г., т. е. включая первые военные месяцы. Кроме работы в качестве ассистента, А.Н. Бархатов некоторое время руководил учебной лабораторией по физике и был заместителем декана общетехнического факультета, а также читал лекции по курсу общей физики в Автозаводском филиале ГИИ. С 1940 г. он – старший преподаватель кафедры физики. Следует заметить, что А.Н. всегда много работал и часто сразу в нескольких местах.

Как перспективный труженик А.Н. был привлечен и к общественной работе, понимая, что многих организационных проблем можно избежать, умеренно сотрудничая с властью. Во время работы в ГИИ А.Н. Бархатов участвовал в общест-

венной жизни института в качестве агитатора, зам. председателя месткома, а также был членом президиума Горьковского областного комитета профсоюза работников высшей школы и научных учреждений. На активно занимавшегося педагогической, образовательной и научной деятельностью молодого человека было обращено внимание, и в 1939 г. А.Н. Бархатов был избран депутатом Горьковского городского Совета. Свои депутатские обязанности он исполнял до 1942 г., до призыва в Красную Армию, а затем после демобилизации из армии в 1946–47 годах. В ряды



Молодой кандидат наук (1941 г.)



А.Н. на фронте (1944 г.)

ВКП(б) А.Н. Бархатов был принят в июне 1941 года.

Научную работу А.Н. Бархатов начинал в Горьковском государственном университете, где работал с 1939 г. в должности ассистента кафедры квантовой физики. Под руководством профессора А.Г. Самойловича он выполнил кандидатскую диссертацию, которая была посвящена вопросам применения квантовой механики к теории металлов. Диссертация А.Н. Бархатовым была завершена в первые месяцы Великой Отечественной войны, и защита её состоялась 14 января 1942 года. А менее чем через месяц, 9 февраля, А.Н. Бархатов был призван в ряды Красной Армии.

3. Великая Отечественная война

В армии А.Н. Бархатов выполнял обязанности инструктора пропаганды, а потом агитатора 1020 гаубично-артиллерийского полка большой мощности РГК (резерва Главного командования), который располагался на ст. Суслонгер Марийской АССР до мая 1943 г. В этом месяце полк, реорганизованный в 102 гаубично-артиллерийскую бригаду большой



С однополчанами (1945 г.)

мощности, отбыл на фронт. А.Н. Бархатов в дальнейшем стал агитатором бригады. Вместе с бригадой он участвовал в боях на различных фронтах: 1 и 2 Брянских, Прибалтийском, Белорусском и Ленинградском. Он участвовал в освобождении городов Орши, Брянска, Риги и др. В 1944 г. А.Н. Бархатов был награжден орденом «Красная звезда», в 1945 – орденом «Отечественная война» 2 степени. Кроме того, за военкоровскую работу он получил медаль «За боевые заслуги». После окончания войны служил в своем соединении еще год и в 1946 г. был демобилизован из Советской Армии в звании капитана. Никто лучше его самого не смог бы описать происходившее с ним и его однополчанами в те военные годы. В 1984 году А.Н. по дневникам военных лет опубликовал в университетских материалах очерки «Дорогами войны». Он посвятил их памяти своих боевых товарищей.

4. Радиофизический факультет Горьковского государственного университета, кафедра акустики

Последнюю, третью часть воспоминаний А.Н. закончил в 1993 г. за месяц до ухода. Она называется «В послевоенном университете: рождение новой кафедры на новом факультете». Эти воспоминания особенно памятны А.Н., поскольку в них он рассказывает о возвращении к своему основному делу жизни и излагает события, сопровождавшие формирование радиофизического направления в Нижнем Новгороде.

После демобилизации из армии А.Н. Бархатов поступил на работу в Горьковский университет на кафедру общей физики вновь организованного в 1945 году радиофизического факультета. Кафедрой руководил тогда профессор Г.С. Горелик. В 1948 г. А.Н. Бархатову присвоено ученое звание доцента. В 1948–1949 гг. вместе с профессором Г.С. Гореликом А.Н. Бархатов участвовал в организации на радио-



С преподавателями радиофизического факультета в 1951 г. Сидят (слева направо): М.Т. Грехова, Н.Н. Баутин, Г.С. Горелик, В.И. Гапонов. Стоят: Н.П. Власов, В.И. Аникин, Н.К. Цуконова, А.Н. Бархатов.

физическом факультете новой кафедры акустики, заведующим которой он стал через год. Позднее, благодаря усилиям Александра Николаевича, на кафедре была открыта новая специализация по гидроакустике.

К сожалению, в жизни нового факультета и университета было множество неприятностей, прежде всего связанных с консерватизмом людей, призванных быть на острие нового познания. Одной из главнейших, оставивших глубокий след в университете, был конфликт в 50-х годах между профессором Г.С. Гореликом и руководством университета на почве выхода в свет замечательной книги Г.С. Горелика «Колебания и волны». Поводом для отрицательных эмоций послужило отсутствие в книге в должном количестве трактовок с позиций марксистской философии. Александр Николаевич как заведующий кафедрой подвергался сверхдавлению со стороны парткома университета, его заставляли активно выступить с руганью по поводу книги Габриэля Семеновича Горелика, но Александр Николаевич устоял и вел себя в этой непростой ситуации порядочно.

А.Н. Бархатов в связи с этим обсуждением в газете «За сталинскую науку» 12 февраля 1952 г. опубликовал статью «Допустима ли классификация физических явлений по типу уравнений?» Это статья не идеолога, но ученого, излагающая глубокое рассуждение об абстрактном знании, его неполном характере по отношению к объективной реальности. Такой подход позднее будет назван галилеевским образом науки. В статье переносится обсуждение в плоскость «активной борьбы за материализм в науке» и не содержится критика того, что есть в книге. Автору книги инкриминируется лишь то, что он мог и должен был сделать. Последовавшая статья проф. В. Гинзбурга «О книге проф. Г.С. Горелика “Колебания и волны”» («За сталинскую науку» 14 марта 1952 г.) продолжает линию статьи Бархатова и в еще большей степени отвечает критериям объективности.

5. Научные исследования

В 1950 г. А.Н. Бархатов становится заведующим кафедрой акустики, которую возглавлял затем в течение почти 40 лет. За это время под его руководством на кафедре сформировалось направление научной работы – изучение закономерностей распространения звука в океане методом физического моделирования. А.Н. Бархатовым создан оригинальный метод физического моделирования акустического поля в океанической среде. Им разработаны методика и техника создания в лабораторных условиях неоднородных сред, которые могут служить физической моделью различных районов Мирового океана.

А.Н. Бархатов с сотрудниками выполнил большой цикл исследований акустических полей в неоднородных средах. Он провел модельные исследования в непре-



В акустической лаборатории

рывно слоистой среде в условиях волновода, антиволновода, слоя скачка. Им также изучалось моделирование рассеяния на внутренних волнах, распространение звука подо льдом и в мелком море. Впервые на физической модели показана реальность представления о дифракционных лучах в области тени. На кафедре создана оригинальная научно-учебная лаборатория по гидроакустическому моделированию. А.Н. Бархатов возглавлял научно-исследовательские работы, которые при участии сотрудников и студентов кафедры были выполнены согласно приказам Министерства высшего и специального образования СССР и РСФСР. Его исследования внесли значительный вклад в обороноспособность страны.

В 1969 г. А.Н. Бархатов защитил докторскую диссертацию на тему «Масштабное моделирование акустических полей в жидких неоднородных средах». В 1971 г. ему было присвоено ученое звание профессора. За время своей творческой деятельности А.Н. Бархатов написал около 90 научных работ, которые публиковались в «Журнале экспериментальной и теоретической физики», «Акустическом журнале» и других изданиях. Он автор монографии «Моделирование распространения звука в море», переведенной на английский язык и изданной в США, и книги «Моделирование распространения звука в океане». Им опубликованы также учебные пособия: «Моделирование в гидроакустике», «Распространение волн в слоисто-неоднородных средах», «Сборник задач по акустике», «Задачи по акустике», «Вопросы акустики ограниченных и неоднородных сред». В 1993 г. в издательстве «Наука» вышла книга «Акустика в задачах», в создании которой участвовал Александр Николаевич совместно с коллективом сотрудников кафедр акустики Нижегородского и Московского университетов. Эта книга стала последней работой А.Н. Бархатова, увидеть которую ему было не суждено.

На руководимой А.Н. Бархатовым кафедре систематически, начиная с 1960 года, проводилась научная работа по договорам о содружестве с промышленными предприятиями и научными учреждениями. До 1956–1958 гг. научно-исследовательская работа на кафедре акустики радиофизического факультета проводилась в тесном контакте с Горьковским исследовательским физико-техническим институтом ГГУ. Кафедра участвовала в выполнении научно-исследовательских работ по постановлению Совета Министров СССР. Приказ Министра высшего образования о расширении научных исследований в области гидроакустической техники на долгие годы определил направления научно-исследовательской работы, проводимой на кафедре акустики под руководством А.Н. Бархатова по исследованию закономерностей распространения звука в различных морских и океанических условиях.

6. Педагогическая и общественная деятельность

А.Н. Бархатов много сил и времени уделял педагогической работе. За годы своей работы в университете он читал курс лекций по общей физике, по теории звука, физическим основам гидроакустики, акустическим измерениям. Его лекции отличались глубиной содержания, точностью формулировок, простотой и ясностью изложения материала. Под руководством А.Н. Бархатова созданы специальные учебные лаборатории по акустическим измерениям, общей акустике и гидроаку-

стике. Издан учебник для студентов гидроакустической специальности «Лабораторный практикум по распространению звука в слоисто-неоднородных средах».

А.Н. Бархатов придавал большое значение уровню и качеству преподавания. Благодаря ему в течение ряда лет на кафедру приезжали видные ученые из Москвы: Л.М. Бреховских, Л.Д. Розенберг, Ю.М. Сухаревский. Многие студенты кафедры акустики выполняли свои дипломные работы в Москве, в Акустическом институте и в Сухуми, на Сухумской научной морской станции (филиал Акустического института), а после окончания университета оставались там работать.

Много сил и труда А.Н. Бархатов отдавал работе со студентами. Он руководил деятельностью научного семинара по распространению акустических волн в неоднородных средах и научными кружками по различным вопросам акустики, организованными для студентов, читал научно-популярные лекции по акустике. В качестве заведующего кафедрой А.Н. Бархатов успешно руководил подготовкой специалистов по гидроакустике, осуществляемой в Горьковском университете по решению директивных органов. За время его работы на кафедре состоялось 40 выпусков, подготовлено более 400 радиофизиков со специализацией по гидроакустике, из числа которых (по неполным данным) 10 человек защитили докторские диссертации и более 30 человек – кандидатские. Среди выпускников кафедры акустики немало выдающихся ученых. Многие из выпускников работают (или работали) в Акустическом институте – академик В.И. Ильичев, доктора наук: В.В. Тютюкин, В. Сорокин, А. Лепорский, Ю.Б. Упадышев, А.Д. Лапин, И.А. Викторов, Э.П. Гулин и другие.

А.Н. Бархатов принимал активное участие в жизни факультета и университета. Он проявил себя в университете как талантливый руководитель. В течение семи лет

(1953–1960 гг.) он был деканом радиофизического факультета ГГУ и пяти лет (1970 – 1975 гг.) – проректором по научной работе Горьковского государственного университета. Он также выполнял обязанности (в 1962, 1966 гг.) члена научно-технического Совета Министерства высшего и среднего специального образования РСФСР по Волго-Вятскому экономическому району и был зам.



На Октябрьской демонстрации как руководитель университета

председателя Волго-Вятско-го научно-методического регионального Совета и члена Головного Совета по радиофизике МВ ССО РСФСР.

А.Н. Бархатов был награжден правительственными наградами: орденами «Красной Звезды» (1944 г.) и «Отечественной войны» 2-ой степени (1945 г.) за выполнение боевых заданий на фронтах Великой Отечественной войны, двумя орденами «Знак почета» (1951, 1961 гг.) за успехи в научной и учебно-

воспитательной работе в университете и многими боевыми и гражданскими медалями, а также был награжден Академией наук Юбилейной медалью к 100-летию со дня рождения А.С. Попова.

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА, МОДЕЛЬ СЛИПАНИЯ И КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

С.Н. Гурбатов

Нижегородский госуниверситет

В данной работе мы обсудим кратко достижения Нижегородской школы в области статистической нелинейной акустики, теории турбулентности в средах без дисперсии без давления и использования векторного уравнения Бюргерса для модельного описания эволюции крупномасштабной структуры Вселенной.

В теории турбулентности одномерное уравнение Бюргерса (J.Burgers, 1939 г.)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (1)$$

широко используется для модельного описания гидродинамической турбулентности [1], а решение этого уравнения со случайными начальными условиями называют турбулентностью Бюргерса (иногда, даже Burgulence [2]) или акустической турбулентностью. Наиболее значимые результаты, полученные представителями Нижегородской школы [3] в этом направлении, подытожены в монографиях [4–7], содержащих достаточно длинный библиографический список. Часть оригинальных задач вошла в учебное руководство для вузов [8], подготовленное сотрудниками кафедр акустики Московского и Нижегородского университетов.

Исследованию динамических и статистических характеристик одномерного уравнения Бюргерса, а в последнее время и многомерного, посвящено большое количество работ (см., например, библиографию в монографиях [4–7]). Несмотря на то, что уравнение Бюргерса имеет точное решение – решение Хопфа-Коула, – исследование статистических свойств этого уравнения представляет весьма сложную математическую задачу. Так, первые серьезные результаты для Броуновского начального потенциала были получены тридцать лет спустя [9] после появления самого уравнения (1).

Для акустических волн дисперсией можно пренебречь в широком частотном диапазоне. В средах без дисперсии эффективно взаимодействует большое число гармоник, причем это взаимодействие приводит к сильной когерентности фаз взаимодействующих гармоник. Вследствие этого в данном классе задач невозможно использовать метод медленно меняющихся амплитуд, который эффективно работает в нелинейной оптике, где из-за сильной дисперсии можно ограничиться рассмотрением взаимодействия малого количества линейных мод. Сильная когерентность спектральных компонент не позволяет так же использовать приближение хаотических фаз, как в теории слабой турбулентности, где описание взаимодействия большого числа линейных мод удается свести к кинетическим уравнениям для интенсивности мод.

Для плоских нелинейных волн эволюция колебательной скорости описывается нелинейным уравнением диффузии – уравнением Бюргерса. Для акустического шума постановка задачи сводится к отысканию статистических характеристик поля в заданном сечении по известной статистике поля на излучателе. Несмотря на то, что нелинейное уравнение Бюргерса заменой Хопфа-Коула сводится к линейному уравнению диффузии, непосредственное использование точного решения мало что дает для статистических задач, где требуется проводить усреднение по ансамблю реализаций. Особенно эта задача усложняется при больших числах Рейнольдса, когда нельзя использовать ту или иную форму метода возмущений. Однако при малом коэффициенте вязкости диссипация существенна лишь только в узкой окрестности ударных фронтов, что позволяет в предельном случае исчезающе малой вязкости решение уравнения Бюргерса свести к так называемому принципу максимума или к принципу отбора частиц [4, 6]. В этом случае решение однородного уравнения Бюргерса сводится к отысканию максимума функционала от начального поля. Отметим, что исследование турбулентности Бюргерса (решение уравнения Бюргерса со случайными начальными условиями) при исчезающе малой вязкости сводится к отысканию статистических характеристик координат абсолютных максимумов потенциала. Использование предельных теорем теории выбросов случайных процессов позволило дать практически исчерпывающее описание турбулентности Бюргерса как в одномерном, так и в многомерном случаях. Для турбулентности Бюргерса удаётся найти строго условия существования и типы автономных режимов вырождения турбулентности, спектры и корреляционные функции, одноточечные и многоточечные вероятностные распределения.

В предельном случае исчезающе малой вязкости, и на начальной стадии, когда можно пренебречь образованием разрывов, уравнение Бюргерса переходит в уравнение Римана. Последнее в свою очередь сводится к системе характеристических уравнений в обыкновенных производных, то есть к свободному движению частиц. Используя статистические связи Лагранжева описания (статистика частиц) и Эйлера описания (статистика поля в заданной пространственно-временной точке), впервые удалось найти точные выражения для вероятностных распределений римановых волн. В частности, было показано, что несмотря на сильное искажение профиля, одноточечное вероятностное распределение римановой волны сохраняется. При эволюции волны с начальной гауссовой статистикой одномерное распределение остается гауссовым, в то время как высшие вероятностные распределения искажаются. В практических приложениях наиболее важной является информация о спектре случайной акустической волны. Практически одновременно в МГУ и ННГУ были получены выражения для энергетических спектров римановых волн, на основе которых были исследованы особенности трансформации как широкополосных, так и квазимонохроматических сигналов. В частности, было показано, что нелинейное взаимодействие приводит к универсальному поведению (пропорционально квадрату частоты) спектра в области низких частот.

Возникновение разрывов приводит к появлению универсальной степенной асимптотики спектра в области высоких частот. Влияние разрывов удастся аналитически рассчитать либо на начальной стадии, когда их число на характерном вре-

менном масштабе волны мало, либо на больших расстояниях, когда из-за многократного слияния разрывов характерный временной масштаб волны становится много больше начального времени корреляции. На этих расстояниях волна представляет собой последовательность пилообразных импульсов с одинаковым наклоном и со случайным положением разрывов. Слияние разрывов происходит по законам слипания абсолютно неупругих частиц и приводит к росту характерного временного масштаба. Из-за многократного слияния разрывов происходит потеря информации о тонкой структуре исходного сигнала, и на больших расстояниях формируется автомодельный спектр, эволюция которого во времени определяется единственным временным масштабом [4, 6]. Спектр имеет универсальные асимптотики в области высоких и низких частот. Из-за слияния разрывов энергетический спектр сдвигается в сторону низких частот, и шум соответственно затухает медленнее, чем периодический сигнал. Аналитическая теория достаточно хорошо объясняет результаты натурных экспериментов по распространению интенсивного акустического шума [10]. При конечных, но достаточно больших числах Рейнольдса ударные фронты имеют конечную ширину, и степенной закон спада спектра сменяется на экспоненциальный. Из-за многократного слияния разрывов расстояние выхода волны на линейную стадию чрезвычайно велико.

Для приложений важно исследование эволюции квазимонохроматических сигналов со случайной амплитудной и фазовой модуляцией, и именно для таких сигналов были проведены первые исследования. Для квазимонохроматического сигнала с гауссовой статистикой и с нулевой шириной спектра вероятностное распределение поля было впервые рассчитано в работе авторов из МГУ [11], где было показано, что для амплитудно-модулированного сигнала нелинейная среда является идеальным ограничителем, и на больших расстояниях начальное гауссово распределение переходит в равномерное. В работах [12, 13] было показано, что в нелинейной среде происходит трансформация частотной модуляции входного сигнала в амплитудную модуляцию пилообразной волны, что приводит к размытию границ равномерного распределения. При конечной ширине входного спектра амплитудная модуляция приводит к движению ударных фронтов, то есть к дополнительной фазовой модуляции пилообразной волны. Физически движение ударных фронтов связано с взаимодействием высокочастотной квазипериодической пилообразной волны с низкочастотной волной, возникающей из-за нелинейного детектирования входного сигнала. С ростом номера гармоники происходит уширение спектральных линий, вплоть до перехода в сплошной степенной спектр. Экспериментально этот эффект наблюдался в работе [14], где также было исследовано исчезновение тонкой структуры интенсивного широкополосного акустического шума.

При обобщении уравнения Бюргерса на многомерный случай и использовании потенциальных решений вида

$$\vec{V}(\vec{x}, t) = -\nabla\psi(\vec{x}, t)$$

приходим к так называемому уравнению KPZ (Kardar, Paris, Zhang) [15, 16]

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{2} (\nabla \psi)^2 + v \Delta \psi,$$

описывающему рост границы раздела двух сред в результате случайного осаждения вещества на поверхности, эволюцию фронта пламени и т.д.

Несмотря на то, что векторное уравнение Бюргерса, как и одномерное, имеет точное решение Хопфа-Коула, исследование статистических свойств полей скорости и потенциала представляет весьма сложную математическую задачу. Однако в случае бесконечно малой вязкости $v \rightarrow 0$ процедуру нахождения поля можно свести к известному методу нахождения максимума некой заданной функции по лагранжевой координате $y(x, t)$ [4, 6]

$$\psi(\bar{x}, t) = \max_{\bar{y}} (\psi(\bar{y}, 0) - (\bar{x} - \bar{y})^2 / 2t), \quad V(\bar{x}, t) = \frac{\bar{x} - \bar{y}(\bar{x}, t)}{t}.$$

Из этого решения следует, что на больших временах поле скорости будет представлять собой набор ячеек, соответствующих разным локальным максимумам начального потенциала с универсальным пилообразным поведением внутри каждой из них.

В космологии понятие крупномасштабной структуры относится к распределению галактик и массы тёмного вещества (на масштабах от одного до нескольких сотен мегапарсек). На меньших масштабах сильно сказывается дискретность, присущая распределению галактик, в то время как на больших масштабах распределение вещества стремится с увеличением масштабов к однородному. Наблюдения красного смещения обнаруживают многообразие структур, обычно характеризующихся как нитевые и мозаичные структуры. Проблема возникновения крупномасштабной структуры – одна из наиболее важных проблем современной космологии. Многие фундаментальные вопросы физики, космологии и астрономии, начиная от попыток объяснения физической природы темной материи до измерения угловой анизотропии микроволнового фонового излучения, а также попыток определения эпохи формирования галактик, тесно связаны с проблемой возникновения и формирования крупномасштабной структуры Вселенной.

Современная теория объясняет формирование крупномасштабной структуры Вселенной как следствие роста исходных слабых флуктуаций плотности вещества за счет гравитационной неустойчивости. Предполагается, что исходные флуктуации плотности возникают как флуктуации вакуума на очень ранней стадии эволюции Вселенной, когда Вселенная расширилась экспоненциально (так называемая инфляционная Вселенная). Указанные начальные возмущения плотности вещества проходят долгую эволюцию, прежде чем сформируют галактики, скопления и сверхскопления галактик и пустоты между ними.

Сравнительно простой и в то же время эффективной аналитической моделью, описывающей формирование и эволюцию крупномасштабной структуры распределения вещества во Вселенной, служит так называемая модель слипания (adhesion model) [17]. Она адекватно, качественно и количественно воспроизводит основные

геометрические особенности наблюдаемой в космологии структуры распределения галактик на масштабах от одного до нескольких сот мегапарсек.

Модель слипания опирается на уравнение нелинейной диффузии – многомерное уравнение Бюргерса. Хорошо известное общее решение уравнения Бюргерса позволяет детально изучать поведение крупномасштабной структуры Вселенной в рамках модели слипания. Предельная форма модели слипания, соответствующая исчезающе малому коэффициенту вязкости в уравнении Бюргерса, приводит к возникновению нерегулярной мозаичной структуры, которую можно трактовать как геометрический скелет распределения вещества во Вселенной. Типичные элементы мозаичной структуры – вершины, ребра, грани и внутренности отдельных ячеек могут быть ассоциированы с различными типами астрономических объектов, такими как скопления, сверхскопления галактик и расположенные между ними огромные темные области, плотность галактик в которых очень низка. В настоящее время вершины мозаичной крупномасштабной структуры соответствуют скоплениям галактик. Квазиодномерные филаменты галактик, соответствующие ребрам мозаичных структур – другой типичный элемент крупномасштабной структуры – содержат наибольшую долю массы Вселенной. В то же время грани ячеек маломассивны и к тому же обладают низким контрастом плотности, поэтому их обнаружение наиболее трудно. Идентификация элементов структуры – непростая и пока не решенная до конца проблема космологии, отсюда неоднозначность в определении их геометрии и массы. Например, недавний численный расчет структуры в общепринятой в настоящее время модели Вселенной (Λ CDM) показал, что большая доля массы приходится на ребра/филаменты – чуть более 39%, вершины/скопления составляют примерно 28%, внутри ячеек содержится немногим более 27%, и меньше всего темного вещества в гранях – менее 6% [17]. Следует подчеркнуть, что такого типа расчеты существенно зависят от принятого алгоритма распознавания элементов структуры, а также от пространственного разрешения модели, поэтому результаты, полученные разными группами, могут заметно отличаться друг от друга.

Сама эволюция крупномасштабной структуры Вселенной может трактоваться как непрерывный процесс транспортировки вещества преимущественно из объектов большей размерности к объектам мозаичной структуры, обладающим меньшей размерностью. К примеру, вещество из внутренних ячеек мозаичной структуры (трехмерных объектов) перетекает в ее грани (квазидвумерные объекты), а из них в ребра и вершины мозаичной структуры. В то же время сами ячейки участвуют в непрерывном движении, деформации и поглощении одних ячеек другими. Недавно к аналогичным выводам пришла группа исследователей в Принстонском университете США, изучавшая распределение галактик в SDSS (Sloan Digital Sky Survey) обзоре.

Работа выполнена при поддержке грантов Правительства РФ 11.G34.31.0066, Ведущей научной школы НШ-333.2012.2 и РФФИ 11-02-00774.

- [1] Frisch U. Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov. – Cambridge: Cambridge University press, 1995, 296 p.

- [2] Les Houches 2000: New Trends in Turbulence/ Eds: Lesieur M., Yaglom A., David F. – Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2001. P.341.
- [3] Островский Л.А., Гурбатов С.Н., Диденкулов И.Г. // Акуст. журнал. 2005. Т.51, №2. С.150.
- [4] Гурбатов С.Н., Малахов А.Н., Саичев А.И. Нелинейные случайные волны в средах без дисперсии. – М.: Наука, 1990, 215 с. / Manchester University Press, 1991, 308 p.
- [5] Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые вопросы в акустике. – М.: Наука, 1990, 257с. / Cambridge University Press, 1998, 298 p.
- [6] Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в средах без дисперсии. Приложения к нелинейной акустике. – М.: Физматлит, 2008, 496 с. / Springer & НЕР, 2011, 498 p.
- [7] Gurbatov S., Rudenko O. Nonlinear statistical acoustics. In the Book: Nonlinear acoustics. – NY: Academic press, 1998. P.377.
- [8] Акустика в задачах. Учебное руководство для вузов. / Под ред. С.Н. Гурбатова и О.В.Руденко. – М.: Наука, 1996, 336 с.
- [9] Burgers J.M. The Nonlinear Diffusion Equation. Asymptotic Solutions and Statistical Problems. – Dordrecht: D. Reidel Publ. Co, 1974, 185 p.
- [10] Pestorius F.M., Blackstock D.J. Finite-amplitude wave effects in fluids. – London: IPC Science and Technology Press, 1974. P.24.
- [11] Руденко О.В., Чиркин А.С. // Доклады АН СССР. 1974. Т.214, № 5. С.1045.
- [12] Гурбатов С.Н., Малахов А.Н. // Акуст. журн. 1977. Т.23, № 4. С.569.
- [13] Гурбатов С.Н., Шепелевич Л.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т.21, № 11. С.1627.
- [14] Бьерно Л., Гурбатов С.Н. // Акуст. журн. 1985. Т.31, № 3. С.303.
- [15] Woyczynski W.A. Burgers-KPZ turbulence: Göttingen lectures. – New York: Springer Verlag, 1998, 318 p.
- [16] Barabasi A.-L., Stanley H.E. Fractal Concepts in Surface Growth. – Cambridge University Press, 1995, 388 p.
- [17] Гурбатов С.Н., Саичев А.И., Шандарин С.Ф. // УФН. 2012, №3. С.233.

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ: ЗАДАЧИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

**Н.А. Бархатов, О.М. Бархатова, С.Е. Ревунов, Е.А. Ревунова, А.В. Королев,
Р.В. Романов, Р.И. Серебрякова, Д.В. Шадруков, Н.В. Косолапова,
А.Б. Виноградов**

Нижегородский государственный педагогический университет

Введение

Изучение системы солнечно-земных связей является современным направлением фундаментальной и прикладной науки. Оно выполняется в рамках междисциплинарной области на границе космической физики и геофизики, которая называется солнечно-земной физикой (СЗФ). Рассматриваемые здесь практические пробле-

мы влияния космической среды связаны также с исследованиями по радиофизике, физике твердого тела, биологии и медицине. СЗФ изучает зависимости между геофизическими и геофизическими процессами, при этом традиционно из рассмотрения исключается действие постоянного потока теплового солнечного излучения и внимание концентрируется на переменных составляющих солнечного влияния: коротковолновом солнечном электромагнитном излучении, солнечном ветре, солнечных космических лучах.

По мере развития технологий выяснилось влияние солнечной переменности на технические системы: радиосвязь, трубопроводы и линии электропередач, электронную аппаратуру самолетов и спутников, а также на климат, человека и другие биологические объекты. В этой связи активно развиваются методы прогноза солнечной активности и магнитных бурь. Такие практически важные аспекты СЗС объединяются понятием «космическая погода». Этим термином также обозначают весь комплекс переменных внешних космических факторов, оказывающих влияние на Землю. Долгопериодические (10÷100 и более лет) тенденции космической погоды в последнее время называют изменением космического климата.

Совокупность явлений в цепочке солнечно-земных связей в виде факторов космической погоды представлена на диаграмме (рис. 1).

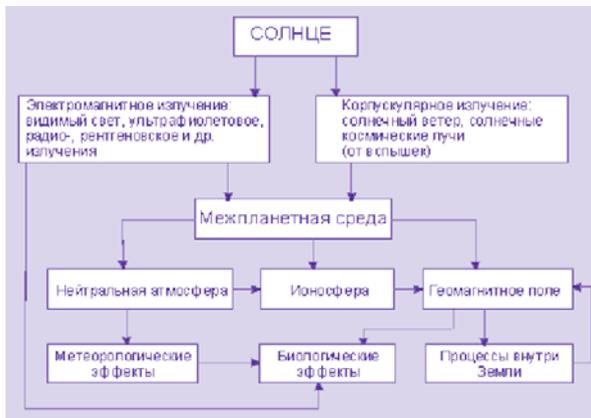


Рис. 1

Солнце — основной источник энергии в солнечной системе

Солнечная переменность, ответственная за космическую погоду и солнечно-земные связи, составляет доли процента общего потока солнечной энергии. Солнечное магнитное поле (рис. 2), определяющее эту переменность, генерируется в конвективной зоне Солнца потоками плазмы, модифицированными дифференциальным вращением. Периодичность изменений (смена полярности) глобального магнитного поля – 22 года. Его половина (11 лет) имеет название цикла солнечной активности. Самым заметным проявлением солнечной активности являются солнечные пятна и возникающие над ними в солнечной атмосфере солнечные вспышки.

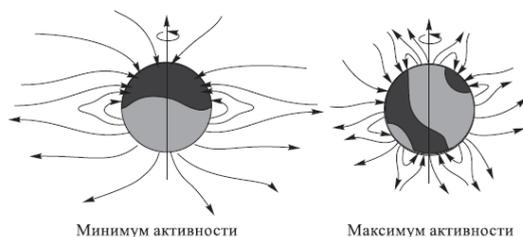


Рис. 2

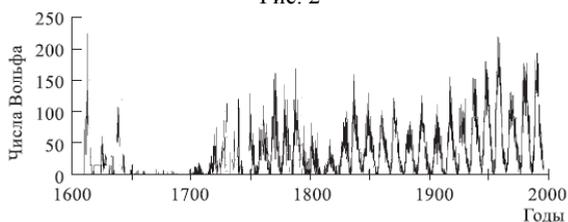


Рис. 3

ки. На рис. 3 приведены значения чисел Вольфа (числа пятен) за весь период наблюдений солнечных пятен. Отчетливо виден так называемый Маундеровский минимум.

Основным наблюдателем за Солнцем сейчас является аппарат SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) – совместный проект ЕКА и НАСА, запущенный 2 декабря 1995 г. Он находится в точке Лагранжа и имеет на борту 12 инструментов, позволяющих получать изображения и измерять потоки излучения Солнца. Инструмент EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) дает изображение, которое сочетает в себе образы на трех длинах волн (171 Å, 195 Å и 284 Å). Его данные используются

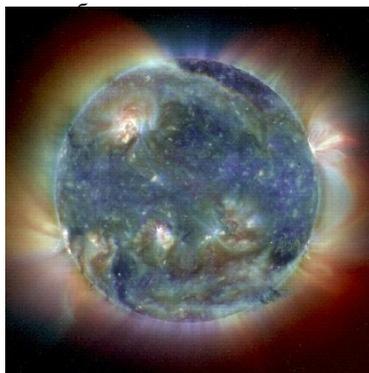


Рис. 4

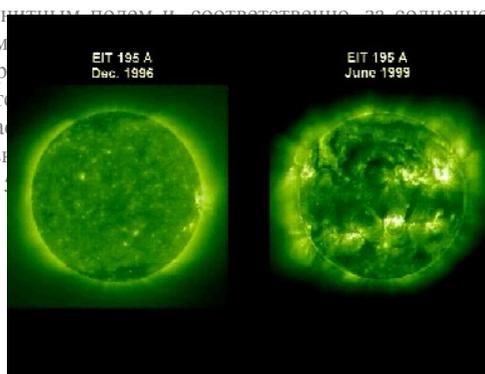


Рис. 5

Потеря равновесия в сложных магнитоплазменных конфигурациях над пятнами приводит к эруптивным событиям (резкому высвобождению энергии) в виде солнечных вспышек связанных с всплесками коротковолнового УФ-, рентгеновского и гамма-излучения, солнечных протонных событий (СПС) и выбросов плазмы (корональным выбросам массы — КВМ). На рис. 6 хорошо видна эрупция и структура магнитных полей.

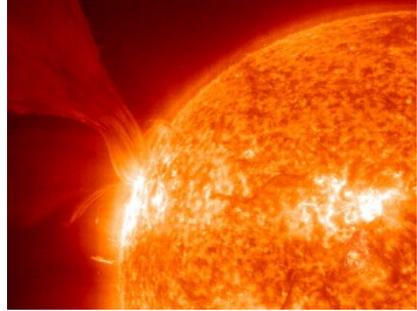


Рис. 6

Другой инструмент SOHO – LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) – широкоугольный спектрометрический коронограф служит для наблюдения за выбросами корональной массы (рис. 7).

Международный проект космических агентств РАН и других стран «КОРОНОС» (комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности

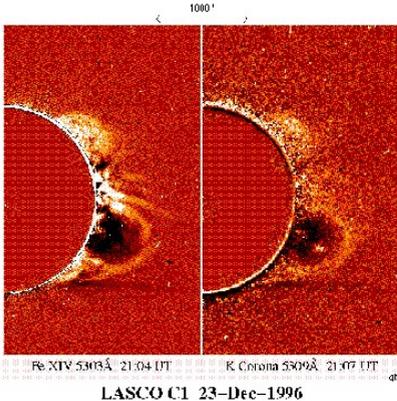


Рис. 7

Солнца) состоит из трех космических аппаратов. Первый спутник КОРОНАС-И (1994 г.) наблюдал Солнце вблизи минимума его активности. Второй спутник КОРОНАС-Ф (2001 г.) исследовал солнечную активность вблизи максимума и на фазе спада 23-го цикла. Третий спутник КОРОНАС-ФОТОН (2009 г.) наблюдал фазу минимума Солнца, при переходе от 23-го к 24-му циклу.

Самым современным оборудованием для наблюдения за Солнцем на данный момент является система «STEREO» (Solar Terrestrial Relations Observatory), состоящая из двух одинаковых космических аппаратов, которые были запущены

26 октября 2006 г. на орбиты, близкие к орбите движения Земли вокруг Солнца. В ходе проекта один из них (BEHIND) постепенно отстает от Земли, а другой, наоборот, обгоняет её (AHEAD). Наблюдения с этих аппаратов процессов происходящих в солнечной атмосфере позволяют делать стереоскопические выводы.

Волновые и корпускулярные солнечные потоки – причина солнечных вспышек

Практически вся энергия электромагнитного излучения Солнца заключена в непрерывном тепловом излучении фотосферы в диапазоне длин волн от 150 нм до 0,5 см со спектром как у абсолютно черного тела с температурой около 6000 К. Радио-, рентгеновское и гамма-излучение генерируется в основном в хромосфере и в солнечной короне электронами и протонами, ускоряемыми до релятивистских

энергий. Радиоизлучение Солнца является хорошим индикатором уровня солнечной активности. Поток радиоизлучения на волне 10,7 см коррелирует с солнечным ультрафиолетовым излучением (УФИ) и часто используется как характеристика ионизирующего излучения Солнца.

Мощные солнечные вспышки могут состоять из нескольких этапов, связанных между собой, причем наиболее мощное энерговыделение происходит тогда, когда вспышечный процесс развивается вблизи группы больших пятен. Развитие вспышки показано на рис. 8, где 1 – линия пересоединения, 2 – ударная волна, 3 – эжектируемая плазма, 4 – высокоэнергичные частицы, 5 – ударная волна, 6 – быстрые электроны.

Характерной особенностью постоянного воздействия Солнца на окружающую космическую среду является солнечный ветер и межпланетное магнитное поле. Солнечный ветер – это поток плазмы (электроны, протоны и ядра гелия), истекающий из солнечной короны в межпланетное пространство. Он вытесняет межзвездную плазму из области с радиусом порядка 100 а.е., формируя таким образом гелиосферу.

Различают быстрый и медленный солнечный ветер. Быстрый и разреженный солнечный ветер (на 1 а.е. скорость 700 км/с и концентрация менее 5 частиц в см³) истекает из корональных дыр, силовые линии магнитного поля которых уходят на бесконечность. Вне корональных дыр структуры магнитного поля замкнуты. Эти зоны являются источником медленного ветра (скорость 300–400 км/с и концентрация 10 см³).

Межпланетное магнитное поле (ММП) – сумма солнечного поля и поля, создаваемого гелиосферным токовым слоем, разделяющим зоны противоположно направленных магнитных силовых линий (рис. 9).

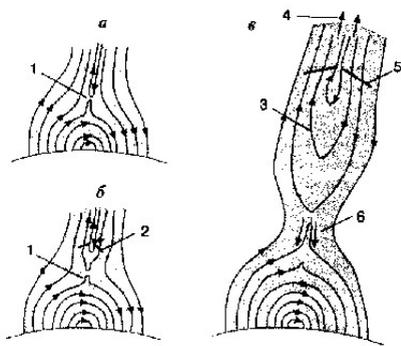


Рис. 8

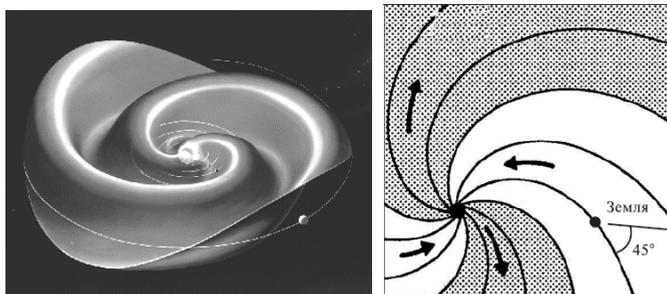


Рис. 9

В зоне столкновения быстрого и медленного потоков солнечного ветра формируется коротирующая область взаимодействия (КОВ), которая вращается вместе с Солнцем. КОВ, характеризуется высокой концентрацией более 10 см^{-3} и сильно флуктуирующим магнитным полем напряженностью более 10 нТл . КОВ вызывают так называемые рекуррентные магнитные бури.

Корональные выбросы массы (КВМ) и связанные с ними магнитные облака – важное проявление солнечной активности. Они имеют сильное упорядоченное магнитное поле в десятки нТл и распространяются на фоне спокойного солнечного ветра со скоростями до 2000 км/с (рис. 10). Если скорость выброса превышает скорость звука, то перед ним образуется ударная волна. В настоящее время считается доказанным, что попадание Земли в межпланетный КВМ вызывает наиболее сильные геомагнитные бури. Таким образом, КВМ являются крайне геоэффективными и нуждаются в прогнозе.

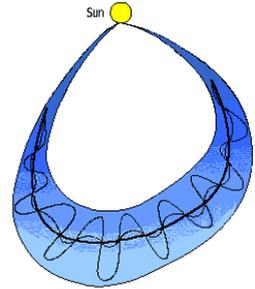


Рис. 10

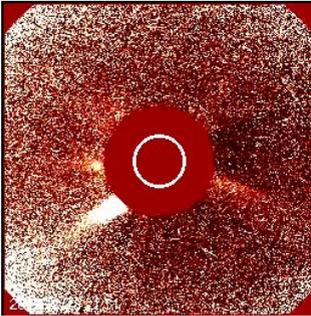


Рис. 11

Важным проявлением солнечной активности являются солнечные космические лучи (СКЛ). СКЛ – спорадически появляющиеся потоки ионов и электронов с энергиями обычно до 10 ГэВ на нуклон. Частицы ускоряются во время солнечных вспышек и на ударных волнах, сопровождающих КВМ в короне или межпланетном пространстве. СКЛ преимущественно распространяются вдоль силовой линии ММП. Поэтому, если источник СКЛ связан с земным наблюдателем силовой линией ММП, то говорят о геоэффективном расположении источника. На рис. 11 представлено изображение солнечной короны во время прихода СКЛ. Треки на фотографии образовались частицами СКЛ в детекторе SOHO.

СКЛ. Треки на фотографии образовались частицами СКЛ в детекторе SOHO.

Магнитосфера Земли. Динамика магнитосферы

Динамика геомагнитосферы определяется в основном величиной z-компоненты ММП (B_z) в солнечно-магнитосферной системе координат.

Наличие у Земли собственного почти дипольного магнитного поля и ее пребывание в потоке солнечного ветра ведет к формированию геомагнитосферы (рис. 12).

Магнитосфера сопряжена с ионосферой и атмосферой вдоль силовых линий магнитного поля. Это лежит в основе магнитосферно-ионосферных связей. Внешняя магнитосфера проецируется в авроральные широты, где на широте $65^\circ\text{--}75^\circ$ образуется авроральный овал – область наиболее частого появления полярных сияний. Структура магнитного поля внешней магнитосферы определяется внешними источниками – магнитосферными токами, которые в свою очередь зависят от межпланетной среды. Полярная шапка – область на широтах выше авроральной

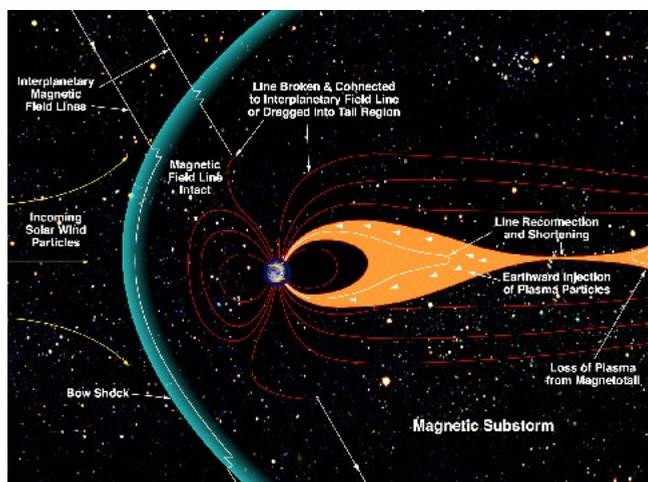


Рис. 12

зоны, содержит открытые силовые линии магнитного поля, уходящие в межпланетное пространство. Внутренние области магнитосферы с почти дипольным полем проецируются на умеренные широты.

Динамика земной магнитосферы определяется значением и ориентацией ММП, составляющим всего около 2% полной энергии солнечного ветра, и связана с глобальной магнитосферной конвекцией. Ключевым механизмом динамики магнитосферы является процесс пересоединения магнитных полей. Магнитосфера «открыта», если B_z компонента (северно-южная) ММП и геомагнитное поле на дневной стороне противоположно направлены (южное ММП, $B_z < 0$). В этом случае пересоединение противоположно направленных магнитных полей в подсолнечной зоне магнитопаузы приводит к переносу солнечным ветром магнитного потока с дневной стороны на ночную (рис. 13).

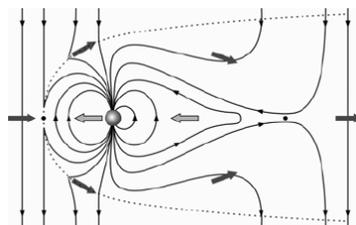


Рис. 13

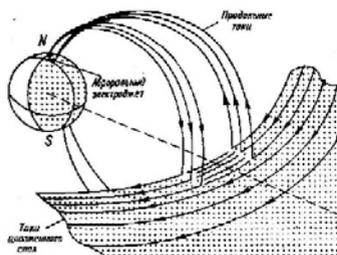


Рис. 14

По мере накопления потока в хвосте, поперечный ток хвоста периодически разрушается, происходит сброс магнитного потока и плазмы обратно к Земле. В результате внутренняя магнитосфера наполняется горячей плазмой. Такая глобальная конвекция является основой динамики внешней магнитосферы.

При разрушении тока хвоста часть замыкается через авроральные области ионосферы, форми-

руя авроральный электроджет (рис. 14). В это же время возникает яркое проявление магнитосферной активности – северное сияние, генерируемое в верхней атмосфере частицами, высыпаящимися в атмосферу вдоль авроральных силовых линий.

Сила электроджетов характеризуется т.н. индексами авроральных электроджетов AU, AL и AE = AU – AL. Индекс AU характеризует восточную электрострую – максимальное положительное отклонение горизонтальной составляющей магнитного поля от спокойного уровня по всем обсерваториям авроральной зоны, индекс AL характеризует западную электрострую – максимальное отрицательное отклонение (рис. 15).

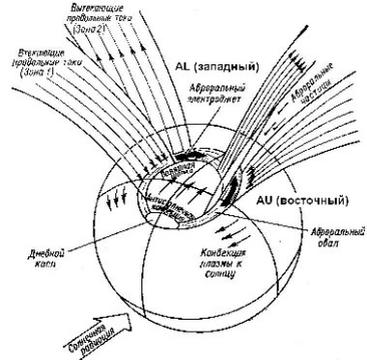


Рис. 15

Геомагнитные возмущения, бури и суббури

Изменение структуры магнитосферы под действием изменяющихся условий в солнечном ветре проявляется в возникновении магнитосферных токов, которые регистрируются на поверхности Земли как нерегулярные геомагнитные вариации. Для описания геомагнитной возмущенности служат разнообразные индексы геомагнитной активности. Кроме индекса полярных электроджетов, введен Dst-индекс – мера интенсивности кольцевого тока – уменьшения горизонтальной составляющей глобального геомагнитного поля. Dst и AE-индексы удобны для описания геомагнитных суббурь и бурь. Квантованный K_p -индекс используется для общей характеристики возмущенности магнитосферы.

Магнитными бурями называют периоды экстремальных вариаций геомагнитного поля, регистрирующихся по всему земному шару и сопровождающихся возмущениями в ионосфере, северным сиянием и пр. Магнитные вариации в полярных широтах связаны с магнитными суббурями. Магнитные суббури – элементарный процесс, обусловленный накоплением и сбросом энергии в хвосте. Длительность суббури составляет 1–2 ч, общая энергетика до 10–15 Дж при индексе AE до сотен нТл с повторяемостью один раз в несколько часов.

Магнитные бури (с мощностью до 10^{18} Дж) вызываются солнечным ветром с аномально большими величинами скорости, плотности, ММП. Общепринятый критерий начала бури – наличие южной компоненты ММП ($B_z < 0$) более 10 нТл дольше 3 ч.

Плазма, попавшая из хвоста во внутреннюю магнитосферу, начинает дрейфовать вокруг Земли, вместе с выброшенной в это время наверх сложной ионосферной плазмой, формируя кольцевой ток на удалении 15 000–40 000 км от Земли. Его величина по индексу Dst является основной характеристикой бури.

Источниками бурь являются зоны КОВ и КВМ, в которые попадает Земля. Сила бурь от КОВ невелика (Dst-вариация до 200 нТл), но они могут длиться вплоть до нескольких суток. Это обусловлено большой продолжительностью высокоско-

ростных потоков и умеренными характеристиками ММП. Бури от КВМ могут быть гораздо мощнее. Источниками суббурь являются собственные вариации ММП и солнечного ветра. Слабые бури с K_p порядка 3–4 могут вызываться просто достаточно длительными высокоскоростными потоками солнечного ветра.

Внутренняя магнитосфера. Радиационные пояса

Внутренние области магнитосферы имеют стабильную дипольную конфигурацию магнитного поля. Здесь динамика плазмы определяется в основном дрейфовыми движениями с сохранением адиабатических инвариантов в относительно стабильном магнитном поле. Основные области внутренней магнитосферы – радиационные пояса и плазмосфера. Радиационные пояса – области, захваченных в геомагнитное поле как ловушку энергичных частиц. Потоки электронов имеют два максимума: на $L = 2$ и 5 (значение параметра Мак-Илвейна, характеризующего номер магнитной оболочки в единицах радиуса Земли, пересекающую плоскость экватора), что соответствует внешнему и внутреннему поясам. Протонный пояс имеет один внутренний максимум. Плазмосфера – это область холодной плазмы ионосферного происхождения, вращающаяся вместе с Землей и простирающаяся до расстояний 4–5 радиусов Земли в плоскости экватора.

Эффекты космической погоды

Воздействие космической радиации. Потоки элементарных частиц, ядер и электромагнитных квантов в широком диапазоне энергий при взаимодействии с веществом вызывают ионизацию его атомов и молекул. В результате этих взаимодействий разрушается атомная и молекулярная структура вещества, что является одной из основных причин выхода из строя космических аппаратов и ограничений по выбору рабочих орбит. Доза, получаемая космонавтами на орбитальной станции, существенно превышает годовые пределы доз, установленные для персонала предприятий атомной промышленности, а выход в открытый космос во время солнечного протонного события может привести к значительному дополнительному облучению космонавта. Потоки заряженных частиц, падающие на космический аппарат, вызывают его поверхностное электростатическое заряджение. Если потенциал распределяется неоднородно по диэлектрическим частям его поверхности, то это может привести к электрическим разрядам. Заметный вклад в сбой в работе аппаратуры на низковысотных орбитах в средних широтах вносят релятивистские электроны внешнего РПЗ.

Коротковолновая радиосвязь и спутниковая навигация. Возможность использования ионосферы для дальней радиосвязи ограничивается сильным влиянием различных солнечно-земных факторов на качество сигнала. Эффект мерцаний принимаемого радиосигнала и изменений его пути при навигации из-за существования перемещающихся ионосферных возмущений особенно неприятен, если определяются координаты движущегося объекта, или координаты используются для каких-либо вычислений в режиме реального времени. Кроме того, ионосферные неодно-

родности сносятся зональными дрейфами, скорости которых достигают сотен метров в секунду.

Изменение орбит спутников из-за нагрева верхней атмосферы. Влияние атмосферы на движение спутников связано с аэродинамическим торможением спутников окружающей атмосферой пропорционально плотности атмосферы. Это торможение наиболее существенно для низкоорбитальных спутников с почти круговой орбитой ниже 800 км. На этих высотах плотность нейтральной термосферы гораздо выше плотности ионов (ионосферы) и изменения плотности определяются, в основном, нагревом атмосферы жестким ультрафиолетовым излучением Солнца и джоулевым нагревом авроральными электроструями, зависящими от солнечной и геомагнитной активности. Роль солнечной активности во времени жизни спутника велика: в минимуме и максимуме солнечной активности время жизни спутника, запущенного на орбиту высотой 400 км, отличается практически в 5 раз.

Геоиндуцированные токи. Магнитосферные и ионосферные электрические токи создают на поверхности Земли вариации геомагнитного и геоэлектрического поля, вызывающие геоиндуцированные токи (ГИТ) в длинных проводящих системах. Суточные спокойные вариации магнитного поля в 100 нТл вызывают ГИТ = $0,5 \pm 1$ А. Во время магнитной бури амплитуды магнитных вариаций и ГИТ возрастают в десятки раз. Запись вариаций магнитного поля и ГИТ в нейтрали трансформатора и в трубопроводе представлена на рис. 16 слева и справа соответственно.

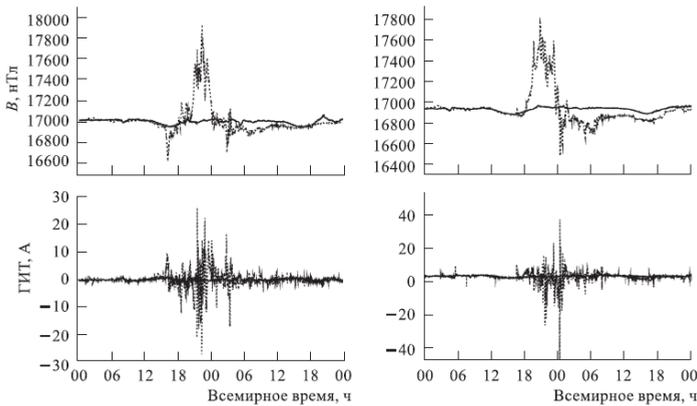


Рис. 16

Оцененные значения потенциала находящегося в грунте трубопровода, индуцируемого электромагнитными колебаниями, возникающими в период магнитных бурь, превышают установленный потенциал катодной защиты на порядок. Это обстоятельство может оказать существенное влияние на функционирование протяженных проводящих коммуникаций. Своевременная оценка последствий надвигающейся геомагнитной бури позволит принять адекватные меры по усилению катодной защиты.

Воздействие солнечной активности на атмосферные процессы и климат. Поток солнечной энергии – определяющий фактор земных атмосферных и климатических процессов. Мониторинг полного солнечного излучения показал наличие связанных с циклом солнечной активности 11-летних вариаций. Имеются указания на связь глобальных климатических осцилляций в тропической зоне Тихого океана, влияющих на циклоническую активность над Европой, с геомагнитной активностью. Обращено внимание на обнаружение воздействия ММП на атмосферную циркуляцию в Антарктике. Существует зависимость атмосферной температуры от параметров ММП. После 6-часового воздействия южного ММП рост температуры достигает 5° через 1–1,5 сут.; 15-часовое воздействие южного B_Z приводит к потеплению на 10° с уменьшением времени задержки до 12 ч.

Воздействие ионизирующей радиации на озоновый слой. Известно, что озон в атмосфере образуется в реакции тройных соударений: $O+O_2+M \rightarrow O_3+M$, где через M обозначена любая молекула воздуха. Необходимый для этой реакции атом кислорода образуется при диссоциации молекулы кислорода под действием УФ-излучения. Азотные и водородные окислы NO и OH , выступая как катализаторы, разрушают озон. OH -цикл наиболее эффективен в мезосфере (50–85 км). NO -цикл наиболее эффективен в стратосфере (10–50 км). Наиболее сильная ионизация и возникновение окиси азота в средней атмосфере вызывается протонами солнечных вспышек. На рис. 17 представлено распределение уровня содержания озона с высотой после солнечной вспышки. Существенным источником NO также являются релятивистские электроны, выпадающие из радиационных поясов в периоды возмущений магнитосферы Земли в субавторальных широтах. Ниже 30 км основным ионизирующим фактором становятся галактические космические лучи.

Воздействие на биологические объекты и человека. Этой проблемой занимается гелиобиология – междисциплинарная область знаний, изучающая воздействие солнечной активности на биосферу, включая человеческий организм. Современная концепция воздействия солнечной активности на биосферу заключается в следующем: амплитуда этого воздействия мала, но оно может влиять на сложные биологические системы на определенных частотах, связанных с природными ритмами и проявляться в определенных группах риска. В результате была сформулирована принципиальная концепция космического (прежде всего, солнечного) влияния на биосферу.

Прогноз гелиогеофизической обстановки

Прогноз гелиогеофизической обстановки подразделяется на прогнозирование солнечной и геомагнитной активности. Солнечная активность определяется по положению на временной шкале солнечного цикла, определению состояния круп-

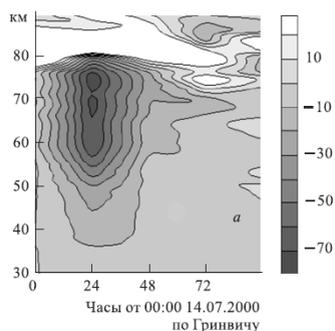


Рис. 17

номасштабного магнитного поля и прогнозу эруптивных солнечных событий. Прогноз геомагнитной активности подразделяется на краткосрочный среднесрочный и долгосрочный и строится в зависимости от состояния солнечных источников, солнечного ветра и солнечных космических лучей. Перспективными методиками прогноза являются:

- стереонаблюдения корональных выбросов массы, идущих к Земле;
- развитие наблюдений и расчетов солнечных магнитных полей, которые, возможно, в ближайшем будущем позволят предсказывать V_z составляющую ММП;
- наблюдения космических лучей солнечного и межпланетного происхождения;
- наземные наблюдения вариаций галактических космических лучей.

Прогноз части цикла на несколько месяцев вперед по сглаженным числам Вольфа дается с довольно высокой степенью оправдываемости. Однако при этом возможны значительные флуктуации вспышечной активности. Прогноз вспышек на 1–3 дня вперед и прогноза магнитных бурь после солнечного эруптивного события (рентгеновской вспышки, КВМ) может быть улучшен на путях соединения современных наблюдений солнечных магнитных полей с достижениями численного моделирования. Существенный шаг вперед был сделан с появлением надежного сверхкраткосрочного геомагнитного прогноза по спутниковым измерениям солнечного ветра перед Землей.

В целом ситуацию с прогнозом солнечной активности нельзя признать полностью удовлетворительной. Прогноз высоты цикла до его начала дает сбой, и есть точка зрения, что он вообще невозможен при нынешнем уровне знания.