

На правах рукописи
УДК 537.22;550.343;551.510

БОГДАНОВ ВАДИМ ВАСИЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ В ГЕОСФЕРНЫХ ОБОЛОЧКАХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИНИЦИИРОВАННЫХ
СОЛНЕЧНЫМ И
ЛИТОСФЕРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

с. Паратунка, Камчатский край – 2008

Работа выполнена в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения РАН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член-корр. РАН

Николаев Алексей Всеволодович

доктор физико-математических наук, профессор

Новиков Лев Симонович

доктор физико-математических наук, профессор

Пономарев Евгений Александрович

Ведущая организация: Институт космических исследований РАН

Защита состоится ____ ____ 2008г. в ____ часов

на заседании диссертационного совета Д 003.034.01 при Институте солнечно-земной физики СО РАН по адресу: 664033, Иркутск,

ул. Лермонтова, 126, а/я 291

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЗФ СО РАН

Автореферат разослан ____ ____ 2008г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.ф.-м.н.

В.И. Поляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Исследования динамических процессов в средней, верхней атмосфере и в различных областях магнитосферы Земли, а также изучение влияния солнечной активности на формирование геофизических процессов занимают в настоящее время одно из важных мест в науке о Земле и постоянно находятся в центре внимания научной общественности. Сформировавшееся понимание, что Земля и околоземное пространство представляет собой открытую физическую систему, дало возможность по-новому взглянуть как на уже полученную, так и на непрерывно поступающую информацию с наземных и космических средств наблюдения. Так как реальная физическая система непрерывно обменивается с внешней средой энергией, веществом, импульсом, энтропией и т.д., то процессы, развивающиеся в атмосфере и магнитосфере, естественно рассматривать с позиций существования непрерывного физического воздействия, имеющего, по отношению к ним, внешнее происхождение. К таким внешним воздействиям, проявление которых на разных уровнях атмосферы рассматриваются в данной работе, относятся явления, инициированные солнечными и литосферными процессами. Научный интерес к проблемам исследования механизмов взаимодействия атмосферы, околоземного космического пространства и литосферы определяется тем, что результаты таких исследований крайне важны для решения целого ряда фундаментальных и прикладных научных задач физики атмосферы, ионосферы, магнитосферы, распространения радиоволн и практических задач обеспечения, в конечном счете, безопасной жизнедеятельности на Земле.

Запуски КА с научной аппаратурой в околоземное и межпланетное пространство привели к серьезным открытиям, позволившим иначе взглянуть на геофизические явления и выделить роль Солнца в их формировании. Активные процессы на Солнце сопровождаются электромагнитным излучением в широком диапазоне частот, генерацией солнечных космических лучей (СКЛ) и выбросом в межпланетное пространство огромных потоков плазмы с вмороженным в нее магнитным полем, названных солнечным ветром. Солнечный ветер достигает орбиты Земли и, взаимодействуя с ее магнитным полем, образует магнитосферу, полярные каспы, нейтральный токовый слой в хвосте и т.д. и является источником многих явлений, которые от внешней границы магнитосферы, определяемой положением ударной волны, через различные геосферные оболочки, трансформируясь и преобразуясь, распространяются к поверхности нашей планеты. Эти явления задают направление развитию многих интересных и важных процессов, в той или иной мере влияющих на эко- и биосистемы Земли. В связи с этим, в 1988 г. была разработана международная программа STEP (Solar-Terrestrial Energy Program), призванная изучить всю цепочку преобразования и трансформации энергии от Солнца к Земле. Центральное место в этой программе занимала тема: «Общие механизмы в солнечно-земной системе». В результате проведенных исследований пришло понимание, что, несмотря на разницу в масштабах формирующихся событий, процессы в фотосфере и хромосфере Солнца во многом аналогичны процессам, которые развиваются в магнитосфере Земли и наблюдаются в экспериментальных лабораторных установках. Была осознана важность и необходимость дальнейших исследований по изучению влияния Солнца на околоземное пространство и взаимодействие геосферных оболочек. Это послужило причиной разработки программы «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля» (координатор академик Жеребцов Г.А.) в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Многие явления, связанные с макроскопическими перемещениями плазмы, развитием различных плазменных неустойчивостей, возникающих на магнитопаузе, в нейтральном слое и в районе каспа, так или иначе, проявляются в различных геосферных оболочках. Следовательно, нейтральный слой и высокоширотные каспы в магнитосфере Земли, нейтральные области в районе солнечных пятен, нейтральные токовые слои, образующиеся при θ -разрядах, – т. е. все нестационарные области магнитных полей, в которых реализуются нейтральные линии и нейтральные точки, являются источником многих интересных процессов в астрофизике, геофизике и, по-видимому, в установках лабораторного масштаба. Эти явления представляют собой важнейшую проблему в физике плазмы – проблему пересоединения магнитных силовых линий. В этих случаях реализуется универсальный механизм, приводящий к развитию неравновесных процессов и к преобразованию магнитной энергии в энергию плазмы. Этот механизм имеет и общефизическое значение, так как открывает путь к исследованию и развитию новых плазменных методов ускорения заряженных частиц. Такие теоретические исследования важны и с точки зрения обоснования новых механизмов разогрева в термоядерных исследованиях. Кроме того, экспериментально было установлено, что перестройка магнитного поля и эффект появления энергичных электронов (собственно сам вспышечный процесс) наблюдались только при

выполнении некоторых условий, одним из которых является высокая степень замороженности поля в плазму. При макроскопических движениях плазмы эта замороженность должна проявляться на магнитных поверхностях, охватывающих нулевые точки и линии. В аксиально-симметричных полях указанное условие отождествляется с сохранением третьего адиабатического инварианта, который был введен Нортропом и Теллером как магнитный поток, охватываемый дрейфовой поверхностью. В таком виде он не совпадает с канонической формой адиабатических инвариантов движения.

Наряду с фундаментальными открытиями, осуществленными с помощью КА, появилась серьезная проблема, связанная с надежностью и ресурсом их работы при эксплуатации в натуральных условиях. Как показал опыт, двигаясь по орбите, КА пересекают различные геосферные оболочки и непрерывно подвергаются воздействию волновой и корпускулярной радиаций в виде высокоэнергичных заряженных частиц, солнечных и галактических космических лучей. Такое взаимодействие не проходит для аппаратов бесследно и приводит к дифференциальному и объемному заряджению (электризации) и, как следствие, к эрозии диэлектрических и защитных элементов конструкции КА. Эксплуатация КА показала, что электризация ответственна за целый ряд сбоев и катастрофических отказов в работе не только научной, но и штатной, отвечающей за нормальную работу всего спутника, аппаратуры. Статистическая обработка данных выявила, что ~ 85% сбоев и отказов происходили в период магнитосферных возмущений. Однако оставшаяся часть зарегистрированного аномального поведения аппаратуры (~15%) происходила в условиях спокойной магнитосферы. Более того, были зарегистрированы не единичные случаи сбоев, возникавших в спокойной магнитосфере накануне сейсмических событий, когда подспутниковая точка ИСЗ проходила через район готовящегося землетрясения. Поэтому эксплуатация КА поставила не только перед конструкторами задачу по разработке методов и рекомендаций по их защите от нежелательного действия активной внешней среды, но и перед учеными была сформулирована серьезная проблема, связанная с необходимостью объяснить причины и механизмы проникновения на ионосферные (сотни км) и в магнитосферные высоты (тысячи км) возмущений, которые формируются в сейсмоопасных областях литосферы.

Структура ионосферы, распределение ее параметров по высоте и по составу определяется плотностью атмосферы и ее химическим составом, спектральными характеристиками солнечного излучения. Одновременно с регулярными изменениями параметров ионосферы, соответствующих суточному и сезонному ходу, а также определяемых активностью Солнца в сейсмоактивных регионах Земли может наблюдаться также и аномальное поведение распределения таких характеристик ионосферы, как f_oF_2 , f_oE_s и f_oE , соответствующих им действующих высот h' , в эффектах проявления турбулизации слоев F_2 и E_s (F -spread и E_s -spread) и т.д., наблюдаемых накануне землетрясения и задаваемых литосферно-ионосферными взаимодействиями. Современными исследованиями установлено, что литосфера активно влияет на физические процессы, протекающие в верхних геосферных оболочках. Установлено, что период, предшествующий землетрясению (ЗТ), сопровождается развитием целого ряда явлений, имеющих механическую, гидрохимическую, электромагнитную природу и регистрируемых как на поверхности Земли, так и на ионосферных и магнитосферных высотах. Каждое из этих явлений сопровождается формированием ряда определенных признаков, которые часто маскируются процессами, связанными с проявлением активности Солнца.

Эффективная ионизация ионосферы волновым излучением происходит на высотах выше 80 км. Ниже, в области D, ионизация в основном обеспечивается солнечными и галактическими космическими лучами. Вторгаясь в нижнюю атмосферу, космические лучи ионизируют нейтральный газ и создают дополнительные носители электрического тока, что ответственно за изменение проводимости и за перераспределение атмосферного электричества. Вспышки на Солнце приводят к дополнительной ионизации и, как следствие, к изменению скоростей протекания физико-химических процессов, созданию дополнительных центров конденсации и усилению процесса образования аэрозолей.

Актуальность проблемы. Изучение процессов, протекающих в различных геосферах на фоне солнечного и литосферного воздействия, обусловлено практической значимостью формирующихся в них явлений и непосредственно влияющих на физические процессы в околоземном пространстве и на Земле. Проблемы, затронутые в данной диссертации, соответствуют программам фундаментальных исследований Президиума РАН на 2005 г. и находятся на пересечении трех направлений: научная программа № 18 «Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий» в части «Солнечный ветер: генерация и взаимодействие с Землей и другими планетами», научная программа № 13 «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы» и программа № 30 «Солнечная активность и физические про-

цессы в системе Солнце-Земля». Кроме того, актуальность выбранных исследований подтверждается тем, что основные направления диссертации соответствуют тематике исследований, активно проводящихся в мировых научных центрах, и входят в проблематику крупных современных международных программ (International Living with a Star Program, Climate and Weather of the Sun-Earth System, Lower Thermosphere Coupling Study, Magnetosphere-Ionosphere Coupling Storm/Substorm Effects Mid&Low Latitude), исследования по которым координируются крупнейшими научными организациями (SCOSTEP, COSPAR, URSI, AGU, EGS и др.).

Цель и задачи работы. Основной целью данной диссертации является разработка моделей и методов для исследования динамических процессов, инициированных солнечным и литосферным воздействиями и формирующихся на различных уровнях геосферных оболочек. Это достигается решением следующих задач:

1) обоснование замены канонической формы третьего адиабатического инварианта движения заряженной частицы в магнитном поле на потоковую форму и оценка точности его сохранения для аксиально-симметричных и слабо отличающихся от них магнитных полей; построение кинетической модели, описывающей динамику замагниченной плазмы, находящейся в области захвата магнитосферы (динамическая система координат в дипольном приближении);

2) построение инженерной модели поверхностной и объемной электризации диэлектриков, используемых в качестве защитных элементов для КА и взаимодействующих в магнитосфере Земли с радиацией волновой и корпускулярной природы;

3) исследование методами вейвлет-преобразования, совмещенными с моделями авторегрессии–проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС), изменений в параметрах ионосферы на примере критической частоты f_oF_2 с целью обнаружения возможных аномальных эффектов в сейсмоопасных регионах, которые могли бы быть отождествлены с литосферными процессами;

4) исследование статистическими методами вариаций частоты появления турбулизации слоя E_s и увеличения вероятностей турбулизации слоя F_2 (F-spread и E-spread) на фоне сейсмической активности;

5) построение статистической модели сейсмичности п-ова Камчатка, анализ на ее основе распределений вероятностей для случайных событий, определяющих сейсмические режимы, исследование вариаций в плотности распределения вероятностей сейсмических событий по глубине и по времени методами вейвлет-анализа с целью выделения возможных аномалий в сейсмическом режиме в литосфере перед сильным землетрясением.

Методы исследования. В диссертационной работе для решения поставленных задач используются следующие методы, понятия и приближения:

- каноническое представление адиабатического инварианта движения заряженной частицы; дрейфовое приближение; кинетические уравнения Власова (Главы 2,3);
- упрощенная с учетом специфики магнитосферной плазмы кинетическая модель накопления диэлектриком объемного заряда Роуза-Фаулера-Вайсберга для расчета электризации конструктивных элементов КА в условиях магнитосферы (объемная модель электризации) (Глава 3);
- методы дискретного и непрерывного вейвлет-преобразования и класс моделей авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего, - для исследования на примере критической частоты f_oF_2 динамики ионосферного процесса (Глава 4);
- статистические методы с целью анализа вариаций ионосферных параметров и вероятностей турбулизации слоев F_2 и E_s (F-spread и E-spread) на фоне сейсмической активности (Глава 4);
- элементы теоретико-вероятностного подхода для построения статистической модели на основе обработки конкретного каталога землетрясений и методы вейвлет-анализа, используемые для изучения динамики функции распределения сейсмических событий по глубине и по времени, с целью выявления возможных прогностических признаков готовящегося сейсмического события в конкретной области п-ова на полуострове Камчатка (Глава 5).

Научная новизна и практическая значимость работы состоит в разработке новых и оригинальных методов, направленных на комплексное исследование динамических процессов, протекающих в различных геосферных оболочках и инициированных внешними воздействиями. Для этого:

1. В дрейфовом приближении проведен анализ корректности замены канонической формы третьего адиабатического инварианта на потоковую форму, выполнено исследование точности сохранения, предложен механизм его нарушения и получены дополнительные инвариантные формы. Исследование проведено для аксиально-симметричных и слабо отличных от симметричных магнитных полей, удовлетворяющих условию адиабатичности изменения параметров. Проанализирован принципиальный характер деформаций инвариантных оболочек в

геомагнитной ловушке во время глобальных магнитосферных возмущениях. Показано, что нестационарное геомагнитное поле в аксиальном приближении сохраняет близкий к невозмущенному (опорному) полю характер широтной зависимости вдоль магнитной силовой линии в уравнениях соответствующих постоянству двух адиабатических инвариантов $\Phi = \text{const}$ и $J = \text{const}$. На основе полученных результатов построена динамическая система координат, описывающая перенос плазмы поперек магнитного поля в условиях нестационарной магнитосферы. Данная система координат является дальнейшим развитием принципов построения естественной системы координат Мак-Илвейна;

2. На основе упрощенной кинетической модели Роуза-Фаулера-Вайсберга разработана самосогласованная модель объемного заряжения диэлектриков, которая позволяет рассчитывать в них распределения электрического поля и соответствующего потенциала, наводимых реальными потоками магнитосферной плазмы, и выработать на стадии конструирования соответствующие защитные меры для минимизации пагубного воздействия электризации на КА в натуральных условиях. Показано, что наиболее опасными зонами для высокоэллиптических КА являются участки орбиты, пересекающие силовые линии, основания которых проектируются в авроральный овал. Использование элементов построенной динамической системы координат позволило на конкретном примере геомагнитной бури (по данным ИСЗ «ОГО-3») проследить на восстановительной фазе возмущения динамику расширения магнитосферы и рассчитать на основе экспериментально полученных потоков заряженных частиц объемное заряджение кварцевых защитных покрытий солнечных батарей КА, находящегося на геостационарной орбите. Предложен возможный механизм появления в плазмосфере холодных и горячих протонов соответственно на главной и восстановительных фазах магнитной бури. На основе модели объемной электризации диэлектриков предложен возможный механизм формирования сбоев и отказов в работе систем КА, пролетающего над сейсмоактивным районом накануне землетрясения.

3. На основе статистического анализа параметров ионосферы спорадических слоев Es и F2, подверженных диффузионному расширению, так называемые Es-spread, и F-spread, обнаружено, что за 1-2 дня до землетрясения ($M > 4$) частота появления Es-spread увеличивается в предполуночные часы, т.е. турбулизация плазмы спорадических Es-слоев усиливается. В то же время в сейсмоионосферных явлениях характерно уменьшение значения турбулизации слоя F2 (F-spread) перед землетрясениями ($M > 6.0$). Статистическая достоверность составляет 0.95 для всех обнаруженных эффектов.

4. Впервые для анализа динамики ионосферных параметров на примере критической частоты f_oF2 применены современные математические методы вейвлет-преобразования совмещенные с классом моделей авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего с целью обнаружения влияния на их поведение процессов литосферного происхождения.

5. Применены теоретико-вероятностные методы к каталогу землетрясений п-ова Камчатка, что дает возможность построить статистическую модель сейсмичности, которая на основе функции распределения сейсмических событий, позволяет вычислять распределения вероятностей различных случайных событий как функций случайных величин и представить, например, закон повторяемости сейсмических событий в вероятностной интерпретации, впервые записав его в инвариантной форме, не зависящей от рассматриваемой площади и выбора сейсмоактивного региона. Следовательно, в напряженной среде, распределение вероятностей возникновения локальных разрушений по энергии не зависит от рассматриваемого объема, характеризует свойства среды при ее разрушении и определяется набором статистики. Применение методов вейвлет-анализа к распределениям вероятностей позволяет выделять признаки, которые могут быть отождествлены с предвестниками, готовящихся сейсмических событий.

Внедрение и востребованность результатов работы. Представленные в диссертации результаты по динамике магнитосферной плазмы в дрейфовом приближении с учетом сохранения трех адиабатических инвариантов движения используются при прогнозе сбоев и отказов на высокоэллиптических КА производства НПО им С. А. Лавочкина. Модель объемной электризации, руководство для конструкторов по минимизации влияния заряжения изделий статическим электричеством в условиях натурной эксплуатации, практические рекомендации и т.д. применяются в НПО на стадии проектирования (Акт внедрения от 26.10.2005 г.). На разработку устройства для зарядов электризации диэлектриков диссертантом получено авторское свидетельство № 1589789 от 1990г. Методика прогноза сейсмических событий на п-ове Камчатка на основе ионосферных и литосферных прогностических признаков используется при составлении еженедельного прогноза Камчатским отделением Федерального центра прогнозирования землетрясений (г. Петропавловск-Камчатский). Работы по диссертации выполнялись в рамках про-

ектов РФФИ: «Разработка концепции применения космических средств с целью экологического мониторинга, предупреждения стихийных бедствий и оценки ущерба от их воздействия на Камчатке» № 97-05-96576-п (исполнитель); «Исследование высокочастотных механоэлектрических явлений, возникающих в областях напряженного состояния земной коры» № 03-05-65302-а (исполнитель), а также при поддержке интеграционных проектов СО РАН и ДВО РАН «Экспериментальные исследования влияния космофизических и геофизических возмущений на формирование аэрозоля в средней и верхней атмосферах» (исполнитель), «Исследование литосферно-атмосферных связей и механизмов взаимодействия геосферных оболочек при различных уровнях солнечной и геомагнитной активности» (руководитель).

Предлагаемые в диссертации методы могут быть применены к различным по масштабам, открытым физическим системам: активным областям на Солнце – источникам возмущений волновой и корпускулярной природы, областям захваченной радиации в магнитосфере, остроугольным магнитным конфигурациям (полярные каспы), нейтральным токовым слоям в хвосте магнитосферы, нейтральной атмосфере (стратосфера), литосфере и наземным плазменным установкам с магнитными полями, содержащими нейтральные точки и линии. С одной стороны, связующим элементом в астрофизике, геофизике и лабораторных установках является единый механизм взрывообразного преобразования энергии магнитного поля в энергию разогретой плазмы, развивающихся в остроугольных магнитных конфигурациях и связанных с магнитным пересоединением. С другой стороны, – связь между процессами в литосфере и аномальными процессами в средних (ионосфере) и верхних (магнитосфере) слоях атмосферы, возникающими накануне землетрясений. При этом общим элементом в предлагаемых методах является то, что процессы в геосферных оболочках рассматриваются как отклик на проявления солнечной активности, на фоне которой формируются рассматриваемые явления.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на объединенных семинарах Института прикладных проблем механики и математики АН УССР в 1978г. и 1980г., конференциях «Электризация КА» (Москва 1987, 1988, 1990) и рабочих совещаниях в НИИЯФ (МГУ), российско-японском семинаре «Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений», ИТиГ, Хабаровск, 2000; на международных конференциях «Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений» в 1998, 2001, 2004, 2007 (с. Паратунка, Камчатская область,); International Workshop on Seismo-Electromagnetics of NASDA (IWSE 2000), Tokyo, Japan, 2000; «Солнечно-земная физика», Иркутск, 2004; XI Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. Томск, 2004; European Geosciences Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2005; International Conference on Soft Computing and Measurements, Санкт-Петербург, 2005, 2006, 2007; IAMAS Scientific Assembly, Beijing, China, 2005; European Geosciences Union (EGU), General Assembly, Vienna, Austria, 2006; International Union for Geophysics and Geodesy (IUGG) XXIV General Assembly, Perugia, July 2-13, 2007, Italy; Физика плазмы в межпланетном пространстве, ИКИ, 5-8 февраля, 2008г.

На защиту выносятся:

1. Доказательство эквивалентности канонической и потоковой форм представления третьего адиабатического инварианта движения заряженной частицы в аксиальных магнитных полях в дрейфовом приближении и в приближении среднего дрейфа; полученные дополнительные инвариантные формы, необходимые для построения системы координат (кинетической модели переноса), справедливой в переменных магнитных полях (см. п.3).
2. Обоснованный механизм нарушения третьего адиабатического инварианта в дрейфовом приближении и приближении среднего дрейфа для аксиальных и слабо отличных от аксиальных магнитных полей, обусловленный ускорением радиального дрейфа $\ddot{R}$. Произведена оценка точности сохранения третьего инварианта, связанная с возможностью пренебречь кумулятивными эффектами этого ускорения в переменном поле.
3. Проведенный анализ характера деформаций инвариантных оболочек в геомагнитной ловушке во время глобальных магнитосферных возмущений, и полученный на основе этого анализа с привлечением дополнительных инвариантных форм (см.п.1) возможный механизм появления в плазмосфере холодных и горячих протонов соответственно на главной и восстановительных фазах магнитной бури.
4. Обобщенная система координат, которая при условии сохранения трех адиабатических инвариантов переводит функцию распределения частиц в реальном деформированном поле в соответствующую функцию невозмущенного (опорного) поля путем адиабатической вариации магнитного поля, что позволяет судить не только о степени вмерзновенности потоков в магнитное поле, но и о проникновении новых частиц в ловушку.

5. Самосогласованная модель электризации диэлектриков потоком заряженных частиц, позволяющая рассчитывать профили распределения потенциалов и напряженности электрического поля уже на стадии проектирования, оценивать степень опасности заряжения КА на данной орбите и разрабатывать соответствующие меры защиты. Модель позволяет рассмотреть возможный механизм, объясняющий возникновение реально зарегистрированных фактов аномального поведения КА накануне сейсмических событий, тем самым косвенно подтвердить наличие литосферно-магнитосферных связей.

6. Впервые выполненные исследования динамики изменений критической частоты f_oF2 методами дискретного и непрерывного вейвлет-преобразования совмещенными с моделями авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего, дающие возможность определить аномальное поведение ионосферных параметров, обусловленное литосферными процессами перед сильными сейсмическими событиями.

7. Впервые проведенный статистический анализ параметров спорадических слоев Es и F2 ионосферы, подверженных диффузионному расширению, так называемые Es-spread, F-spread.

8. Впервые предложенная статистическая модель сейсмичности п-ова Камчатка, выделенный на ее основе методами вейвлет-анализа прогностический признак Кронцкого землетрясения, который сформировался в последний год перед событием, инвариантная форма закона повторяемости сейсмических событий в вероятностной интерпретации, ее связь с законом Гутенберга-Рихтера.

Публикации. Результаты выполненной работы опубликованы в российских, зарубежных изданиях и тематических сборниках. Основная часть результатов диссертации представлена в работах [1-51] и включает две монографии, публикации в журналах «Космические исследования», «Метрология», «Доклады АН», «Natural Hazards and Earth System Sciences», «Известия ВУЗов», в сборниках докладов конференций, и выполненных в виде отчетов с НПО им. С.А. Лавочкина. Работы автора, выполненные по теме диссертации, но не вошедшие в неё в полном объеме и не включенные в основные выводы, опубликованы в [52-69]. Автор имеет авторское свидетельство на изобретение и Акт внедрения своих разработок в НПО им. С.А. Лавочкина [7,13].

Личный вклад автора. Работы, представленные в диссертации, выполнены автором как самостоятельно, так и в сотрудничестве с коллегами из Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, НПО им. С.А. Лавочкина: по программе «Электризация», ЦНИИмаш, Новосибирского государственного университета, Института космофизических исследований и аэронавтики СО РАН (г. Якутск), Института физики Земли РАН и др. Теоретические исследования по вспышечным процессам автор выполнял согласно пункту 1.8.2.1 координационного плана Академии наук СССР по тематике работ лаборатории Молекулярной акустики Московской государственной академии приборостроения и связи (бывший Всесоюзный заочный машиностроительный институт). По этому пункту теоретически и экспериментально (на примере квадрупольного магнитного поля с нулевой точкой) исследовался процесс преобразования магнитной энергии в энергию мощных магнитогидродинамических движений плазмы, которые сопровождают процесс пересоединения магнитных силовых линий. Автором лично выполнено теоретическое исследование правомерности замены канонической формы третьего адиабатического инварианта на потоковую форму в полях слабо отличных от аксиально-симметричных магнитных полей; построена модель объемного заряжения диэлектриков; на основе теоретико-множественного подхода и соответствующей обработки каталога землетрясений построена статистическая модель сейсмичности п-ова Камчатка и получена вероятностная интерпретация закона повторяемости Гутенберга-Рихтера, справедливой в любом сейсмоактивном регионе Земли; для анализа аномального поведения геофизических параметров в сейсмоактивных регионах применены методы вейвлет-разложения. Работы велись в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН на 2005г. № 30. Применение научных разработок автора по проблеме электризации КА в НПО им. С.А. Лавочкина оформлено соответствующим Актом внедрения.

Объем работы и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений, списка литературы, включающего 228 наименований. Общий объем диссертации 265 страниц машинописного текста. Из них – 237 стр. текста, список литературы – 20стр., приложения – 8 стр. Диссертация содержит 54 рисунка, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* раскрывается актуальность темы, и формулируются основные цели исследования, дается краткое содержание работы, отмечается научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава, являясь обзорной, посвящена описанию состояния вопросов в контексте с решаемыми в диссертации задачами. Кратко представлена морфология гелиогеофизических оболочек, начиная с фотосферы на Солнце и заканчивая литосферой Земли. Описываются активные процессы на Солнце (хромосферные вспышки, эруптивные протуберанцы, корональные выбросы масс), оказывающие, через корпускулярное и волновое излучение, непосредственное влияние на протекание физических процессов в межпланетном и околоземном космическом пространстве, в различных слоях атмосферы и литосфере. Кроме того, активные процессы на Солнце тесно связаны с возникновением ~85% различных нештатных ситуаций на борту КА, влияя на надежность работы штатной и научной аппаратуры и ресурс спутника. Рассматривается структура магнитосферы, которая формируется за счет взаимодействия солнечного ветра и межпланетного магнитного поля с магнитным полем Земли. При этом особо отмечается общность в механизмах формирования активных процессов на Солнце, в районах полярных каспов и нейтрального токового слоя в хвосте, т.е. в таких магнитных конфигурациях, которые обладают нейтральными линиями и точками. Такие магнитные конфигурации реализуются и в наземных экспериментальных установках при изучении динамики вспышечных процессов в остроугольных магнитных ловушках. Рассматриваются приближенные методы решения уравнения движения заряженной частицы в скрещенных электрических и магнитных полях, приводящие к понятию трех адиабатических инвариантов движения μ , J , Φ . Отмечается, что если первые два

инварианта $\mu = mv_{\perp}^2/2H$ и $J = \int_A^{A'} mv_{\parallel} dl$ совпадают с канонической формой адиабатических инвариантов I , то третий $\Phi = \iint_S \vec{H} \cdot d\vec{S}$ сразу был введен как поток магнитного

поля, охватываемого оболочкой, по которой дрейфуют ведущие центры частиц, и его сохранение скорее определялось наличием аксиальной симметрии в области захвата магнитосферы Земли (дипольное приближение), чем каноническим условием сохранения. Доказательство его постоянства проводилось в пренебрежении самим дрейфом, без которого этот инвариант теряет смысл (Глава 2).

Наличие трех инвариантов объясняет механизм захвата и удержания частиц магнитным полем. На основе постоянства первых двух адиабатических инвариантов μ и I для описания распределения корпускулярной радиации в области захвата магнитосферы Земли в дипольном приближении используется так называемая система координат Мак-Илвейна. Данная система координат справедлива только в постоянных магнитных полях. Учет сохранения третьего адиабатического инварианта Φ дает возможность построить динамическую систему координат, справедливую в переменных полях, удовлетворяющих условию постоянства Φ (Глава 3).

При своем движении по околоземной орбите КА проходит через области магнитосферы, которые в невозмущенных условиях характеризуются различными плотностями и энергиями заряженных частиц. Взаимодействие внешних защитных диэлектрических поверхностей с активной внешней средой приводит к объемному и дифференциальному заряджению до высоких отрицательных потенциалов. Изменение внешних условий при пересечении пограничных слоев приводит к перераспределению потенциалов и, как следствие, к формированию электрических разрядов, что ответственно за отдельные сбои или отказы в работе штатной и научной аппаратуры, а также к деградации внешних поверхностей КА. В случае повышения активности Солнца, связанной с формированием мощных хромосферных вспышек, образованием эруптивных протуберанцев и корональными выбросами солнечной массы, условия эксплуатации значительно ухудшаются и частота сбоев и отказов, а также степень их влияния на нормальное функционирование КА значительно усиливается. Для правильного выбора защитных материалов, выбора оптимальных орбит с точки зрения решаемых задач и уменьшения влияния активных внешних факторов космического пространства, необходимо построение достаточно простой математической модели объемной электризации диэлектрических покрытий (Глава 3).

Физические процессы, формирующиеся в геосферной цепочке «литосфера-нейтральная атмосфера-ионосфера-магнитосфера», имеют планетарный масштаб, и если в проблеме взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли достигнуто определенное понимание, то

в изучении процесса взаимодействия между литосферой и располагаемыми выше геосферными оболочками делаются только первые шаги. (Полагают, что инжекция радона и аэрозолей в приземную атмосферу в сейсмоактивных районах приводит к перераспределению атмосферного электрического поля. Эти изменения передаются на ионосферные высоты, что приводит к аномальному поведению параметров ионосферы. Кроме того, инжекция радона в приземный слой может быть ответственной за свечение атмосферы в инфракрасной части спектра (см., например, [61, 69])). В то же время из общих соображений ясно, что если открытая физическая система находится вдали от равновесия, то она чувствительна к любым изменениям внешних полей. Следовательно, резкие колебания в космической погоде, обусловленные повышением активности Солнца, могут привести к срабатыванию в геосферных оболочках неких природных механизмов, которые могут стать причиной возникновения катастрофических явлений таких, как тайфуны, наводнения, оползни, цунами, землетрясения и т.д. Если такого механизма не существует, то задача выполнения краткосрочного и тем более оперативного прогноза в рамках механического подхода становится проблематичной. В этом случае необходимо точно знать размеры сейсмогенерирующей области, неоднородность взаимно смещающихся поверхностей разломов, прочность пород, развивающиеся в них напряжения, а, следовательно, и силу, ответственную за рост напряжений, т.е. множество характеристик, экспериментально определить которые известными методами невозможно. В такой ситуации перспективным представляется следующий путь: поиск аномального поведения геофизических параметров в явлениях, которые могут регистрироваться на земной поверхности, ионосферно-магнитосферных высотах и их систематизация применительно к данному сейсмоопасному региону. К таким параметрам относятся критические частоты f_oF_2 , f_oE и f_oE_s , действующие высоты h' , F-spread, Es-spread и т.д. (Глава 4).

Для изучения внешних причин, инициирующих подготовку сейсмического явления и ответственных за активизацию подготовительных процессов в литосфере, отклики которых проявляются в магнитосфере и на ионосферных высотах, необходимо сейсмический режим того или иного региона представить в удобной для исследований математической форме. Такой формой является интегральная функция распределения или плотность распределения и построенная на их основе статистическая модель сейсмичности п-ова Камчатка (Глава 5).

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию третьего адиабатического инварианта движения заряженной частицы в произвольном аксиально-симметричном и слабо отличном от аксиального магнитных полях. Этот инвариант вводится как магнитный поток Φ , охватывающий поверхность, по которой дрейфуют частицы (Нортроп, Теллер, 1960). Сохранение этого инварианта обычно отождествляется с условием вмерзности, согласно которому плазма перемещается в пространстве на магнитных поверхностях постоянного магнитного потока. Введенный в потоковой форме этот инвариант не совпадает с канонической формой адиабатических инвариантов движения I . Более того, доказательство сохранения Φ на основе постоянства обобщенного импульса в аксиальном поле проводилось в пренебрежении самим дрейфом частицы, что не корректно, поскольку в этом случае теряется смысл этого инварианта как в потоковой, так и канонической формах (например, Хесс, Редерер, 1972). Следует отметить, что на основе введенного таким образом третьего инварианта и условия его нарушения строилась теория формирования радиационных поясов Земли. Однако динамика заряженных частиц в радиационных поясах и во внешних областях космоса хорошо описывается обратимыми кинетическими уравнениями Власова, и процессы переноса в них определяются точностью сохранения всех трех инвариантов движения. Так, например, на основе экспериментов, выполненных на установке ТС-3 (ФИАН), было доказано, что перенос плазмы поперек магнитного поля с последующим формированием токового слоя происходит с высокой степенью вмерзности инвариантных магнитных оболочек в плазму. Следовательно, помимо полупарадоксального введения третьего адиабатического инварианта в потоковой форме необходимо выполнить строгий математический анализ и с точки зрения замены канонической формы I на потоковую Φ , и с точки зрения точности сохранения инварианта. Исследование проводилось на основе лагранжевого формализма отдельно для частиц, двигающихся в плоскости экватора аксиально-симметричного поля ($v_{\parallel}=0$), и для частиц, имеющих составляющие скорости вдоль силовой линии. (Для полей, обладающих слабой неаксиальностью, рассматривались движения частиц только с $v_{\parallel}=0$). Т.к. для аксиально-симметричных полей в цилиндрической системе координат азимутальный угол ϕ является циклической координатой, то соответствующий обобщенный импульс $P_{\phi}=\text{const}$. В дрейфовом приближении ($\rho_{\perp} \ll R$) обобщенный импульс имеет вид

$$P_{\varphi} = mRu_{\varphi} + \frac{e}{c}RA_{\varphi}. \quad (1)$$

В (1) u_{φ} – азимутальная дрейфовая скорость. Дрейфовому приближению соответствует случай $mRu_{\varphi} \ll (e/c)RA_{\varphi}$. Но пренебрежение членом mRu_{φ} в (1) недопустимо, поскольку теряется смысл третьего инварианта в формах I и Φ . Проведенный анализ третьего адиабатического инварианта показал, что $I \approx \text{const}$ и $\Phi \approx \text{const}$ в стационарных полях и в нестационарных при отсутствии радиального ускорения. В то же время I и Φ в переменных полях являются абсолютными инвариантами, если $\dot{R} = \text{const}$, что не следует из дрейфовых уравнений: $u_R = \dot{R} = cE/H \neq \text{const}$ в общем случае. Однако условие адиабатической инвариантности

$$\frac{T_{\text{др}}}{H} \left| \frac{d\vec{H}}{dt} \right| \ll 1, \quad (2)$$

ограничивающего скорость изменения поля за период дрейфа $T_{\text{др}}$, дает неравенство $u_{\varphi} \gg u_R$, что позволяет в рамках дрейфового приближения пренебречь ускорением инвариантной поверхности $u_R = \dot{R}$, как величиной более высокого порядка малости по сравнению с «дрожанием» этого приближения. Поэтому точность сохранения Φ удовлетворяет адиабатическому приближению для небольших интервалов времени, когда можно пренебречь кумулятивными эффектами, связанными с малым, конечным ускорением $\dot{u}_R$. На основе представленных в явном виде инвариантов Φ и I для дрейфового движения в плоскости экватора в диссертации получены дополнительные инвариантные формы $Rv = \text{const}$ и $R^2H = \text{const}$.

Рассмотрение третьего инварианта в форме Φ и I в дрейфовом приближении с $v_{\parallel} \neq 0$ показывает, что в этом случае необходимо перейти к приближению среднего дрейфа. В результате получаем

$$\langle P_{\varphi} \rangle = m \langle Ru_{\varphi} \rangle + \frac{e}{c} \langle RA_{\varphi} \rangle = \text{const} \quad (3)$$

и

$$\langle Ru_{\varphi} \rangle = \frac{e}{c} \mu \langle k \rangle + \left\langle \frac{k}{\omega_L} \right\rangle \frac{1}{mT_{\text{кол}}} J = \text{const}, \quad (4)$$

где приняты следующие обозначения $\langle \dots \rangle = \frac{1}{T_{\text{кол}}} \int_0^{T_{\text{кол}}} \dots dt$, $J = m \int_0^{T_{\text{кол}}} v_{\parallel}^2 dt = \text{const}$ – второй адиабатический инвариант, k – некоторая геометрическая характеристика поля, ω_L – ларморовская частота. Возможность считать (3) и (4) постоянными величинами связана с усредняемостью k и k/ω_L вдоль силовой линии. Поскольку положение «зеркальных» точек в постоянном магнитном поле не меняется, то $I \sim \langle Ru_{\varphi} \rangle \approx \text{const}$ и $\Phi \sim \langle RA_{\varphi} \rangle \approx \text{const}$. В случае нестационарных полей,

но при выполнении условия (2), что соответствует неравенству $u_{\varphi} \gg u_R$, то, как доказано в Приложении А, k и k/ω_k являются усредняемыми величинами. Поэтому и в случае переменных полей $I \sim \langle Ru_{\varphi} \rangle \approx \text{const}$ и $\Phi \sim \langle RA_{\varphi} \rangle \approx \text{const}$, как это следует из (3) и (4) с точностью $J = \text{const}$ для небольших интервалов времени. Анализ экспериментальных данных о переносе плазмы во внешних областях остроугольного магнитного поля, удовлетворяющего дрейфовому приближению, должен показать возможность описания процессов переноса на основе предположения об адиабатической инвариантности потока Φ с учетом поправок, связанных с обязательным его нарушением вследствие кумулятивных эффектов ускорения радиального дрейфа, т.е. соответствует вмерзности плазмы в дрейфовые оболочки. Наличие вмерзности экспериментально подтверждено на установках ТС-3 (ФИАН) и, как доказано, является определяющим условием формирования вспышечного процесса. Именно эти поправки, дающие возможность оценить нарушение вмерзности плазмы и, как следствие, возникающую дополнительную диссипацию при распространении магнитогидродинамических волн можно найти на основе развитой в этой главе теории.

Для анализа движения в дрейфовом приближении в несимметричных полях была выбрана подвижная система координат K' , которая вращается относительно цилиндрической системы K с угловой скоростью $\partial\phi/\partial t$, локально связанной с угловой скоростью ведущего центра частицы. Центр вращения K' совпадает с центром цилиндрической системы координат K . Переход к описанию движения заряженной частицы в подвижной системе координат K' относительно кинематических соотношений эквивалентен переходу к аксиально-симметричному переменному полю, приводящему к возникновению электрического поля и, как следствие, к радиальному дрейфу. Тем самым задача свелась к уже решенной задаче, и возможность пренебречь ускорением $\ddot{R}$ приводит к требованию наличия слабой аксиальной несимметрии $(1/H)(\partial H/\partial\phi) \ll 1$.

Третья глава посвящена построению кинетической модели переноса плазмы, справедливой в возмущенном магнитном поле, и модели объемной электризации диэлектрических материалов под действием факторов космического пространства (ФКП) в виде корпускулярного и волнового (ультрафиолетового и рентгеновского) излучения.

Современное развитие космонавтики поставило перед конструкторами и разработчиками космической техники ряд серьезных проблем. Одной из таких проблем является разработка средств и методов, способствующих уменьшению влияния эффектов взаимодействия защитных покрытий КА с энергичными потоками магнитосферной плазмы и волновым излучением Солнца. Интерес к этой проблеме был стимулирован необходимостью разобраться в причинах многочисленных сбоев и отказов в работе электронной аппаратуры, происходящих на борту и приводящих к аномальной работе КА, а в некоторых случаях и к их гибели. Вопросы электризации КА напрямую зависят от уровня возмущенности магнитосферы. Поэтому знание в этот период динамики нестационарной магнитосферной плазмы представляет значительный интерес не только с точки зрения электризации, но и с точки зрения переноса плазмы во внутренних областях магнитосферы. Проще всего это сделать на фазе восстановления магнитной бури, построив динамическую систему координат с учетом сохранения трех адиабатических инвариантов.

Для интерпретации результатов измерения заряженных частиц во внутренней области магнитосферы используется система координат Мак-Илвейна. С учетом сохранения первого адиабатического инварианта μ и второго J и в предположении о подобии распределения частиц разной энергии на одной инвариантной поверхности дает возможность свести функцию распределения с шестью фазовыми переменными к функции от двух и осуществить следующий переход $f(r, \phi, \lambda, v_r, v_\phi, v_\lambda) \rightarrow f(r, \lambda)$. При этом оказалось наиболее удобным перейти к системе двух переменных H и L , H – магнитное поле, $L = R_0/R_{3M}$ параметр, характеризующий дрейфовую оболочку (R_0 – расстояние от центра магнитного диполя до вершины силовой линии в плоскости экватора, R_{3M} – средний радиус Земли). Однако в нестационарных полях система координат (H, L) теряет свой смысл. В то же время на основе сохранения всех трех адиабатических инвариантов можно построить кинетическую модель переноса (динамическую систему координат), которая справедлива в переменных полях. Это позволяет представить функцию распределения в виде $f = f(L, \tilde{v}, \alpha^0)$, где $\tilde{v}$ и α^0 – соответственно скорость и питч-угол в плоскости экватора. В основе построения кинетической модели лежит представление об адиабатической деформации магнитного поля, и модель приобретает смысл, когда возможно однозначное отождествление возмущенной инвариантной поверхности с опорной (невозмущенной), например, дипольной. Как показывает анализ, для однозначной идентификации поведения магнитных оболочек и дрейфующих по поверхности этих оболочек заряженных частиц необходимо применение теоремы, сущность которой сводится к следующему: если напряженность поля H на поверхности магнитной оболочки, характеризуемой вмороженной в эту оболочку плазмой, уменьшается, то в области уменьшения H радиус кривизны магнитной силовой линии растет, и, наоборот, в случае возрастания H радиус кривизны уменьшается (К. Лонгмайр, 1966). Аналогом этой теоремы для возмущенного аксиального поля в приближении $\Phi \approx \text{const}$ является, полученная в Главе 2, инвариантность величин Rv и R^2H . На основе сформулированной теоремы выбираются уравнения, описывающие возмущенные силовые линии опроного (например, дипольного) магнитного поля: $r = R_0 \cos^k \lambda$, (R_0 – экваториальное расстояние до вершины силовой линии, λ – широта, $k = 2 + 1.5[1 - (t/\tau)^2]$, τ – характерное время восстановления поля после максимальной деформации $t = 0$, а $k = 3.5$). Выполненные на примере дипольного поля оценки, основанные на дополнительных инвариантных формах, показывают, что в возмущенных уравнениях $J = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$ можно сохранить невозмущенный (дипольный) вид широтной зави-

симости. На основе этих оценок и с учетом сохранения всех трех инвариантов построена кинетическая модель переноса плазмы поперек дипольного поля. Физический смысл этих моделей заключается в том, что они дают возможность на основе проведенных измерений направленного j и всенаправленного потоков $\hat{J}$ плазмы получить соответствующие невозмущенные потоки путем адиабатической вариации магнитного поля от возмущенного к невозмущенному полю и осуществить переходы вида

$$j(r, \lambda, H, \alpha, v) \rightarrow j(L, \tilde{v}, \alpha^0) \quad (5)$$

$$\hat{J}(r, \lambda, H, \alpha, v) \rightarrow \hat{J}(L, \tilde{v}, \alpha^0) \quad (5')$$

Пересчет реальных потоков в невозмущенные согласно (5) или (5') позволяет сделать вывод не только о вмерзновенности потоков плазмы в поле, но и о возможном проникновении частиц как с других инвариантных оболочек, так и инжекции частиц от внешних источников.

Вторая часть *третьей главы* посвящена построению моделей расчета влияния факторов космического пространства (ФКП) в виде корпускулярного и волнового (ультрафиолетового и рентгеновского) излучения на надежность и ресурс эксплуатации высокоэллиптических КА.

Комплексное действие ФКП приводит как к поверхностной дифференциальной электризации защитных покрытий, так и к объемному заряджению диэлектрических элементов конструкций КА. Поскольку стоимость эксплуатации космических аппаратов значительно меньше стоимости их разработки и вывода на заданную орбиту, то возникает естественная задача о значительном увеличении срока их активного существования. При этом важную роль в обеспечении длительной и, одновременно с этим, безотказной работы КА играет конструкционная стойкость используемых материалов и элементов, а также разработка надежных методов защиты штатной и научной аппаратуры от действия отмеченных факторов. Одним из направлений в этих работах является построение моделей поверхностной и объемной электризации, которые позволяют оценить возможные уровни заряджения и рассчитать распределения электрических потенциалов и полей в диэлектриках при их взаимодействии с потоками космической плазмы. Эта информация необходима конструкторам и разработчикам космической техники для того, чтобы уже на стадии проектирования в случаях, когда расчетные уровни заряджения превышают некоторые пороговые уровни заряджения (обычно > 100 В), предусмотреть применение различных способов и методов защиты штатной аппаратуры изделия от пагубного проявления различных эффектов, сопутствующих процессу электризации.

Для построения строгой теории взаимодействия потока заряженных частиц с диэлектриком необходимо воспользоваться теорией накопления объемного заряда Роуза-Фаулера-Вайсберга (РФВ). На основе системы уравнений модели РФВ строились различные теории, которые описывают такие явления, возникающие при облучении высокоомных диэлектриков потоком заряженных частиц, как электропроводность, диэлектрические свойства, ползучесть, долговечность и т.д. Однако эта система уравнений сложна и мало пригодна для проведения оценочных расчетов объемной электризации диэлектриков. Более того, предположения, лежащие в основе построения модели РФВ и проводимых на их основе расчетов, не соответствуют условиям, с которыми сталкиваются аппараты, взаимодействующие с реальной магнитосферной плазмой. (Например, предположения о монохроматичности потока заряженных частиц и о длине пробега электронов λ , для которой полагается, что она много больше толщины облучаемого материала L и т.д.). Однако реальная магнитосферная плазма достаточно хорошо описывается максвелловским распределением (более адекватное описание дается двухмаксвелловским распределением частиц по скоростям). При этом концентрация электронов высокоэнергичной магнитосферной плазмы колеблется от 0.1 до 10 частиц на см^3 при температуре $\sim 10^3$ - 10^4 эВ. Наличие малой концентрации потоков первичных электронов позволяет в рамках оценочных моделей пренебречь уровнем динамического равновесия, обусловленного скоростью образования в диэлектриках электрон-дырочных пар и их рекомбинацией. Следовательно, величиной установившегося равновесия, а вместе с этим и самим процессом генерации электрон-дырочных пар в нашем случае можно пренебречь. Поэтому наведенная проводимость диэлектрика будет обусловлена термализованными электронами, что в приближении максвелловской плазмы значительно упрощает расчеты распределений профилей электрического поля и соответствующего потенциала. При этом легко учитываются изменения в максвелловской функции распределения, которые возникают за счет кулоновского взаимодействия потока первичных магнитосферных электронов с отрицательно заряженным до потенциала Φ_0 диэлектриком. Это приводит, с одной стороны, к уменьшению начальной концентрации электронов за счет оттал-

кивания низкоэнергетической части первичного потока; с другой – к торможению высокоэнергетической части и к уменьшению энергии конкретного электрона. В натуральных условиях наибольшую опасность представляет собой отрицательное зарядение диэлектрических материалов, которое при отсутствии освещенности возникает в областях магнитосферы, содержащих электроны большой энергии, но малой плотностью, (т.е. в приближении так называемой «толстой» плазменной оболочки, когда радиус Дебая λ_D много больше линейного размера спутника R). В этом случае для расчетов объемной электризации вдоль координаты «х» для плоских диэлектрических материалов толщиной L, используемых в космических технологиях, в диссертации получены следующие соотношения

$$E(x) = \frac{j_{eo} \cdot \exp(-\frac{\phi_o}{\phi_T})}{\sigma_T \cdot 10} \cdot \exp(-\frac{\xi \rho^P x_o^P}{\phi_T}) \cdot \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\xi \rho^P (x^P - x_o^P)}{\phi_T}\right] \right\}, \quad (6)$$

$$\phi_o = \frac{j_{eo} \cdot \exp(-\frac{\phi_o}{\phi_T})}{\sigma_T \cdot 10} \cdot \exp(-\frac{\xi \rho^P x_o^P}{\phi_T}) \int_L^o \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\xi \rho^P (x^P - x_o^P)}{\phi_T}\right] \right\} dx, \quad (7)$$

$j_{eo} \exp(-\frac{\phi_o}{\phi_T})$ – ток электронов (А/см²), достигающих поверхность заряженного до

потенциала ϕ_o диэлектрика, $e\phi_T$ – тепловая энергия (эВ), j_{eo} – невозмущенный ток;

$\sigma(x) = \sigma_T \cdot 10^{\Delta \cdot \exp(-\frac{x}{10x_o})}$ – радиационная проводимость диэлектрика, обусловленная термализованными электронами, σ_T – темновая (собственная) электропроводность (Ом/см); $x_o = (1/\rho) [-(\phi_T/\xi) \cdot \ln(1 - \eta_\Sigma)]^{1/p}$ – глубина, на которой в диэлектрике токи проводимости и электрическое поле обращаются в нуль (см), ρ – плотность диэлектрика (г/см³), η_Σ – суммарный коэффициент вторичной эмиссии; ξ, p – численные коэффициенты, получаемые при аппроксимации экспериментальной зависимости длины пробега электронов от энергии в полимерных материалах, используемых в космической технологии. Действие кулоновского отталкивания в выражениях (6) и (7) учитываются множителем $\exp(-\phi_o/\phi_T)$, действие токов вторичной эмиссии – $\exp(-\xi \rho^P x_o^P/\phi_T)$.

На рис.1 приведены рассчитанные профили распределений $E(x)$ и $\phi(x)$ в кварцевом стекле и пленке ПЭТФ (лавсан). Кварцевые стёкла используются в качестве защитных покрытий на солнечных батареях, а материал ПЭТФ при изготовлении ЭВТИ (электровакуумная теплоизоляция).

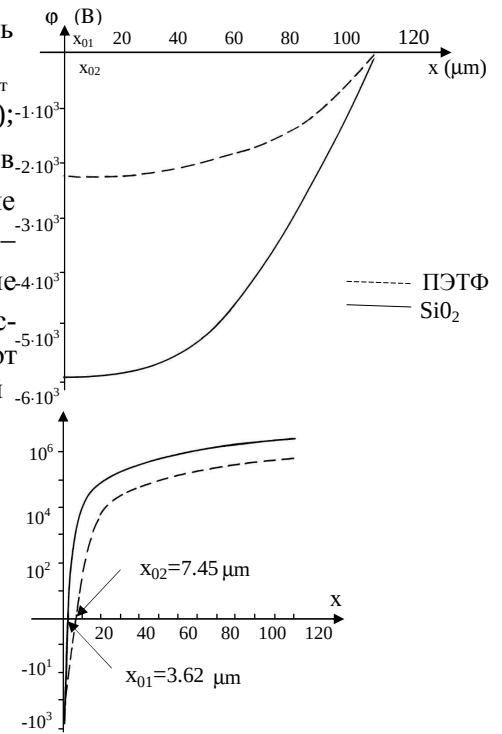


Рис.1. Профили распределения потенциала $\phi(x)$ и электрического поля $E(x)$ в объеме диэлектрика.

Электроны магнитосферной плазмы имеют температуру в $\phi_T = 50$ (кэВ), а ток $j_{oe} = 10^{-9}$ (А·см⁻²).

Причем величина тока, поступающего на диэлектрик, лежит в области максимальных значений, которые соответствуют сильным магнитосферным возмущениям. Параметры диэлектриков: кварцевое стекло – плотность $\rho = 2.7$ (г·см⁻³), теневая проводимость $\sigma_T = 4 \cdot 10^{-16}$ (Ом·см⁻¹); лавсан – $\rho = 1.4$ (г·см⁻³), $\sigma_T = 4 \cdot 10^{-16}$ (Ом·см⁻¹). Показатель степени поправочного коэффициента для радиационной проводимости $\Delta = 2$, суммарный коэффициент вторичной эмиссии $\eta_\Sigma = 0.3$. Толщина кварцевого стекла и материала из лавсана $L = 120 \mu m = 1.2 \cdot 10^{-2}$ см.

В заключении третьей главы на основе данных, полученных спутником ОГО-3 на восстановительной фазе (9-13 июля 1966г.) конкретной магнитной бури, на примере геостационарного спутника рассмотрено практическое применение построенных в данной главе моделей (рис.2). Орбита геостационарного КА располагается вне области максимума кольцевого тока

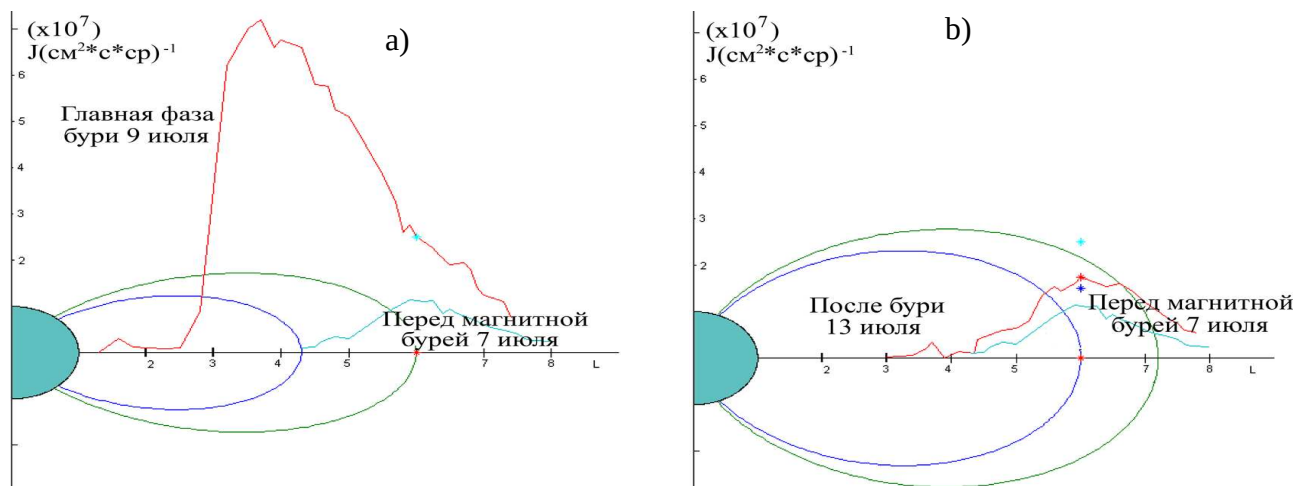


Рис.2. Динамика расширения магнитосферы на восстановительной фазе магнитной бури и соответствующие изменения в распределении потоков протонов. а) в начале фазы восстановления (9 июля); б) в конце фазы восстановления (13 июля). Тремя звездочками на рис.б) отмечены максимальные значения потоков для $L=6$ в соответствующие дни восстановительной фазы: верхняя звездочка соответствует 9 июля; нижняя – 11 июля; средняя – 13 июля.

($L \sim 3-4$), поэтому здесь напряженность магнитного поля на главной фазе развития магнитной бури будет возрастать, а на восстановительной фазе уменьшаться до исходных значений опорного (дипольного) поля. При этом из условия постоянства дополнительных инвариантных форм R^2H и Rv следует, что на главной фазе заряженные частицы будут двигаться к Земле (к токовому кольцу) и при этом нагреваться, а на восстановительной фазе удаляться от Земли (от кольца) и остывать. Во внутренней области кольцевого тока всё происходит наоборот: на главной фазе магнитной бури частицы начинают двигаться от Земли к формирующемуся токовому слою и остывают, а на восстановительной фазе – от слоя, т.е к Земле, и нагреваются. Следовательно, на главной фазе магнитной бури в области по обе стороны от расположения максимума протонного пояса ($L \sim 3.5$) складываются естественные условия, при которых за счет встречного к нему движения заряженных частиц начинается формироваться и усиливаться кольцевой ток. В то же время на восстановительной фазе заряженные частицы двигаются от кольцевого тока, вызывая тем самым его ослабление. Одновременно с этим становится ясен механизм появления в плазмосфере на главной фазе магнитной бури холодных протонов и, наоборот, их нагрев на восстановительной фазе. Следует отметить, что для низкоэнергичных частиц плазмосферы $U_R \sim (cE/H) \gg U_\phi$ и на временах развития магнитной бури о третьем инварианте, а тем более его сохранении, говорить не приходится. Поэтому R^2H и Rv уже не равны соответствующим константам, а имеют более сложную функциональную зависимость. Однако общий характер зависимости сохраняется: с уменьшением поля H радиус R растет, а скорость v (энергия) уменьшается; с увеличением H радиус R уменьшается и скорость (энергия) возрастает.

Четвертая глава посвящена исследованию изменений в параметрах ионосферы в сейсмоактивных регионах. Одновременно с регулярными изменениями параметров ионосферы, соответствующих их суточному и сезонному ходу и задаваемых активностью Солнца, в сейсмоактивных регионах Земли наблюдается также и аномальное поведение в распределении характеристик ионосферы, таких как критические частоты f_oF2 , f_oE и f_oE_s , действующие высоты h' , в эффектах проявления турбулизации слоев $F2$ и E_s (F -spread и E_s -spread) и т.д. Ионосфера, в общей последовательности геосферных оболочек, представляет собой достаточно чувствительный датчик. Являясь открытой физической системой, она легко запасает и преобразует солнечную энергию. Любые малые воздействия на ионосферу могут привести к триггерным эффектам с энерговыделением, значительно превышающим энергию первичных возмущающих факторов литосферного происхождения, которые формируются на подготовительной стадии

сейсмического события. Можно сказать, что на ионосферных высотах и в магнитосфере происходит как бы отображение и осреднение процессов, происходящих в литосфере на обширных территориях, размером в сотни километров. Современными исследованиями установлено, что литосфера, образующая динамическую структуру и реагирующая на проявления солнечной

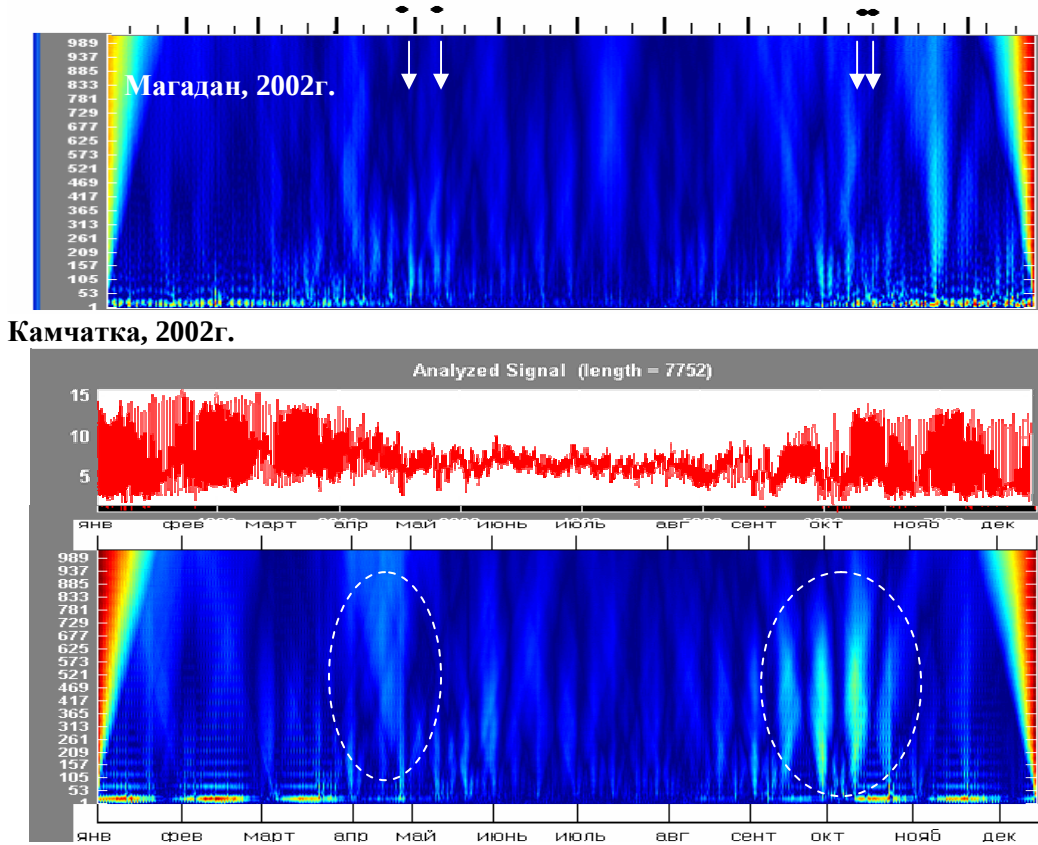


Рис.3. Результаты вейвлет-разложения критической частоты f_oF2 для Камчатки и Магадана за 2002г

активности, оказывает, в свою очередь, влияние на физические процессы, протекающие в верхних геосферных оболочках. Период, предшествующий землетрясению, сопровождается развитием целого ряда явлений, которые имеют механическую, гидрохимическую, электрическую и электромагнитную природу и которые регистрируются как на поверхности Земли, так и на ионосферных высотах. Задачами исследования в этой главе явился поиск возможных аномальных эффектов в параметрах ионосферы, которые могли быть обусловлены процессами в литосфере и предшествовать сильным сейсмическим событиям.

На основе новой математической конструкции вейвлет-преобразования была исследована динамика ионосферного процесса, выделены основные характерные для нее компоненты. Сопоставление обрабатываемых рядов с данными сейсмического каталога и сравнение их с асейсмической зоной за данный период позволило выявить разномасштабные аномальные эффекты в ионосфере, которые предшествуют наиболее сильным землетрясениям в районе П.-Камчатского в радиусе $R \sim 200 \text{ км}$ и $k \geq 12$ ($M \geq 5$). Процесс обработки данных базировался на основе непрерывного и

дискретного вейвлет-преобразования. Непрерывной обработке были подвергнуты часовые данные критической частоты f_oF2 за 2000-2002гг. На рис. 3 приведены результаты преобразования за 2002г. для Магадана. Стрелками показаны моменты возникновения землетрясений на Камчатке рассматриваемого класса. В 2002г. произошло несколько сейсмических событий, как в весенний, так и в зимний периоды. Из результатов обработки видно (рис.3), что накануне всех событий наблюдаются многомасштабные аномалии, обнаруживающие себя, начиная с 80-го масштабного уровня. Ввиду проявления данных аномалий на более низких частотах в отличие от предыдущих лет, из сигнала была выделена аппроксимирующая компонента 6-го масштабного уровня дискретного вейвлет-разложения и дополнительно исследована. Результаты разложения данной компоненты показаны на рис.4. Ярko проявившие себя в этой компоненте аномальные эффекты наблюдаются в весенний период, начиная с 60-го масштабного уровня, а в осенний – на 15-43 масштабных уровнях, выделены на рис.3 пунктирной линией.

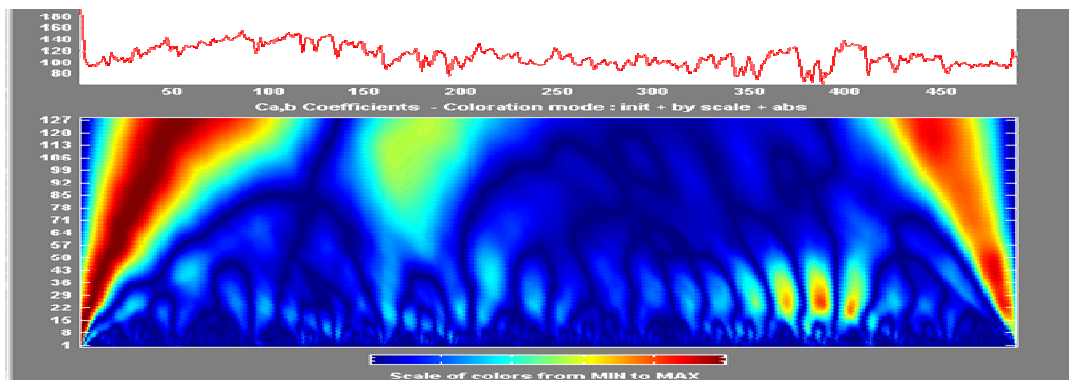


Рис.4. Результаты непрерывного вейвлет-разложения аппроксимирующей компоненты 6-го масштабного уровня дискретного вейвлет-разложения критической частоты f_0F2 для Камчатки за 2002г

Дискретным разложением показано, что наилучшая аппроксимация временного ряда f_0F2 на основе авторегрессионной модели спокойного периода относительно сейсмической активности режима (отсутствие событий с $k \geq 12,5$) достигается на четвертом уровне разложения. Сравнение с аналогичным разложением, но для сейсмоактивного периода, показало невозможность аппроксимации и, как следствие, модельного представления на этом уровне разложения. Это говорит о значительном усложнении временного ряда f_0F2 и влияния процессов литосферного происхождения на параметры ионосферы.

В заключении *четвертой главы* статистическими методами изучены явления в ионосфере, связанные с землетрясениями, имеющими глубину не более 50км и магнитуду $M > 4$. На основе исследования 15-минутных данных АИС с. Паратунка ($\varphi = 52,97^\circ \text{ N}$, $\lambda = 158,25^\circ \text{ E}$; п-ов Камчатка) анализировались ночные E_s -spread, связанные с турбулизацией слоя E_s . Выбор довольно слабых землетрясений определялся тем, что спорадические слои E_s располагаются на высоте $h \sim 100\text{ км}$, и сейсмо-ионосферные эффекты должны проявляться в большей мере от слабых событий на этих высотах, чем на высотах слоя $F2$ ($\sim 300\text{ км}$). Показано, что даже перед слабыми ЗТ за 1-2 дня турбулизация слоя E_s усиливается, и число эффектов E_s -spread увеличивается. Максимальный рост эффекта происходит за 2 часа до местной полуночи. Далее на основе данных японской ионосферной станции Акита (Токио) были проанализированы вариации вероятности появления турбулизации слоя F (F -spread) перед ЗТ с $M > 5.5$, $H < 80\text{ км}$. Обнаружено, что перед ЗТ вероятность появления F -spread уменьшается. Статистическая достоверность увеличения числа E_s -spread перед полночью и уменьшения вероятности возникновения F -spread накануне ЗТ составляет более 0.95.

В *пятой главе* на основе теоретико-множественных представлений рассматриваются вопросы, связанные с построением статистической модели сейсмичности на примере п-ова Камчатка. Выбор такого подхода диктуется тем, что современные представления физики сейсмического процесса, основанные на особенностях блокового строения и предельной энергонасыщенности, определяют необходимость разработки методов по поиску и выделению неустойчивых областей геотектонических состояний, для чего необходимо привлечение статистико-вероятностных методов для адекватного описания сейсмического процесса и сильных землетрясений (Гуфельд И.Л., Гусев Г.А.). Следовательно, необходимо отразить степень случайности, иначе говоря, меру возможности появления того или иного результата. В этой связи необходим математический аппарат, позволяющий в цифре отобразить динамику сейсмического режима. При теоретико-множественном представлении сейсмическое явление рассматривается как элементарное событие ω_i в пространстве элементарных событий Ω . В свою очередь, каждое событие ω_i характеризуется системой случайных величин: энергетическим классом k , широтой φ , долготой λ , глубиной h и временем t . При этом делается естественное предположение о независимости случайных сейсмических исходов от системы случайных величин. Время, являющееся неограниченной величиной и не обладающее математическим ожиданием, из системы случайных величин исключено, что соответствует переходу к сейсмостатическому режиму на рассматриваемом временном интервале. Сейсмичность всего региона (или его выбранной части) рассматривается как полная группа событий и описывается в виде распределений условных и безусловных вероятностей P в частотном представлении. Случайные события определяются как различные комбинации системы случайных величин k, φ, λ, h в множестве

$\tilde{F}$. Такой подход позволяет представить модель сейсмических событий п-ова Камчатка за период инструментальных наблюдений как вероятностное пространство трех объектов $\{\Omega, \tilde{F}, P\}$. На основе этой модели в качестве примера приводятся расчеты распределений вероятностей для различных случайных событий.

Если закон распределения системы случайных величин задан в аналитической форме посредством функции распределения $F(\varphi, \lambda, h, k)$ или ее плотности $f(\varphi, \lambda, h, k)$, то с вероятностной точки зрения эта система описана полностью. По соответствующим формулам можно найти законы распределения отдельных величин. Однако в нашем случае наиболее логичным является обратная постановка задачи, а именно, по законам распределения случайных величин получить закон распределения системы. В общем случае сделать это невозможно, так как знание только законов распределения отдельных величин недостаточно. Для этого необходимо знать зависимость между отдельными случайными величинами, которые входят в систему, то есть необходимо знать условные законы распределения.

Для непрерывных величин, определяющих сейсмическое событие, плотность распределения можно представить и как многомерную производную от $F(\varphi, \lambda, h, k)$, и как произведение условных и безусловных функций f следующим соотношением

$$f(\varphi, \lambda, h, k) = \partial^4 F(\varphi, \lambda, h, k) / \partial \varphi \partial \lambda \partial h \partial k = f(\varphi) \cdot f(\lambda|\varphi) \cdot f(h|\varphi, \lambda) f(k|\lambda, \varphi, h). \quad (8)$$

В (8) приняты обозначения: $f(\varphi)$ – безусловная плотность распределения сейсмических событий в зависимости от φ ; $f(\lambda|\varphi)$ – плотность распределения сейсмических событий по λ при условии, что их широта равна φ ; $f(h|\varphi, \lambda)$ – плотность распределения сейсмических событий по h при условии, что их широта и долгота соответственно равны φ и λ ; $f(k|\lambda, \varphi, h)$ – плотность распределения сейсмических событий по k при условии, что их долгота, широта и глубина соответственно равны λ , φ и h . Зная аналитический вид плотности распределения (9), можно вычислить вероятность того, что сейсмическое событие попадет в заданные интервалы: по широте $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$, долготе $\Delta\lambda_j = \lambda_j - \lambda_{j-1}$, глубине $\Delta h_m = h_m - h_{m-1}$ и по энергетическому классу $\Delta k_n = k_n - k_{n-1}$

$$P(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_j, \Delta h_m, \Delta k_n) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \int_{h_1}^{h_2} dh \int_{k_1}^{k_2} f(k, \varphi, \lambda, h) dk =$$

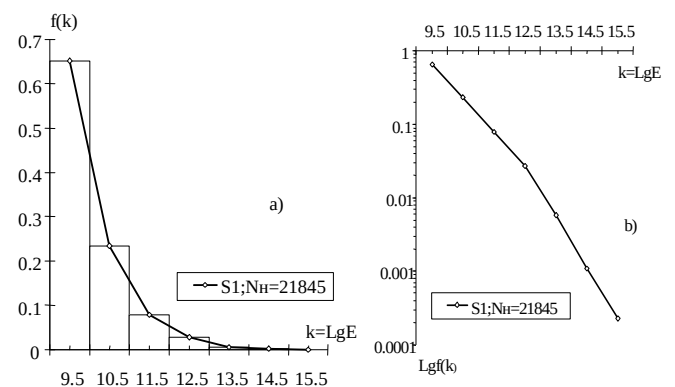
$$F(\varphi_i, \lambda_j, h_m, k_n) - F(\varphi_{i-1}, \lambda_{j-1}, h_{m-1}, k_{n-1}) =$$

$$P(\Delta\varphi_i)P(\Delta\lambda_j|\Delta\varphi_i)P(\Delta h_m|\Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i)P(\Delta k_n|\Delta h_m, \Delta\lambda_j, \Delta\varphi_i), \quad (9)$$

где i, j, m и n – индексы, соответствующих интервалов случайных величин. Второе равенство в

Рис. 5 Гистограмма и сглаженный график плотности распределения $f(k)$ для сейсмических событий, гипоцентры, которых распределены на площади $S_1(a)$. Плотность распределения $f(k)$ в двойном логарифмическом масштабе (b). По оси абсцисс(k) цифрами отмечены середины интервалов ($k_i \pm 0.5$).

(9) написано согласно определению функции $F(\varphi, \lambda, h, k)$. Выражения (8-9), являясь функциями четырех переменных, не могут быть представлены графически, хотя численные значения $P(\Delta k_i, \Delta\varphi_j, \Delta\lambda_m, \Delta h_n)$ на основе каталога данных сейсмических событий в частотном представлении вычисляются просто. Подобным образом вычисляются и безусловные законы распределения для всех случайных величин k, φ, λ, h , а также различные комбинации для условных законов распределения от этих переменных. Статистическая обработка каталога по формуле (9) дает возможность не только ответить на вопрос о вероятности того, что сейсмическое событие произошло в том или ином заданном интервале географических координат



нат, глубины и энергетического класса и в заданный интервал времени, но и получить численные значения ступенчатой функции распределения $F(\Delta\phi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta k)$. Положительный ответ на этот вопрос важен потому, что, как установлено экспериментально, с ростом числа событий n и уменьшением интервала Δ относительная частота V стремится к своему математическому аналогу P , а $F(\Delta\phi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta k)$ – к устойчивому непрерывному распределению $F(\phi, \lambda, h, k)$. Иначе говоря, функция F определяет потенциальные возможности сейсмического режима произвольной области в терминах вероятности. Этот вывод естественно распространить и на численные значения вероятностей, определяющих возможности возникновения будущих событий, для которых координаты гипоцентров и энергетические классы попадают в заданные интервалы, т.е. выполнить прогноз. При таком подходе каталог землетрясений, представленный в виде математического объекта трех элементов $\{\Omega, \tilde{F}, P\}$, является опорной моделью, на фоне которой можно отслеживать изменения в сейсмической активности, т.е. регистрировать вариации в распределении средних вероятностей в локальных областях сейсмического региона за различные интервалы времени. Следовательно, в рамках предлагаемого подхода прогноз, подразумевающий ответ на вопросы “где” и “какой интенсивности” ожидается сейсмическое событие ω_i , представляет собой предсказание вероятности его возникновения P в пространстве элементарных событий Ω . Причем Ω и средние вероятности P постоянно уточняются за счет естественного увеличения числа случайных событий.

На примере закона повторяемости, представленного в виде плотности распределения $f(k)$ для представительного класса $k_{\min} \geq 9$, расчетами показано, что очищенный от афтершоков каталог камчатских землетрясений для заданного интервала времени, но для различных интервалов координат однороден по пространству и тождественен плотности распределения, соответствующей неочищенному каталогу сейсмических событий. Отсюда следует справедливость закона повторяемости в вероятностном представлении и для распределения по энергетическим классам афтершоков. Статистическая интерпретация закона повторяемости позволяет записать его в единой форме для произвольного сейсмоактивного объема, минимальность которого задается минимальным числом сейсмических событий, определяющих устойчивость средних частот (вероятностей) (рис.5а)

$$f(k^{1,2}) = f(k_0^{1,2}) \cdot 10^{-\gamma_{1,2}(k^{1,2} - k_0^{1,2})}, \quad (10)$$

или

$$\lg f(k^{1,2}) = \lg f(k_0^{1,2}) - \gamma_{1,2}(k^{1,2} - k_0^{1,2}). \quad (10')$$

Выражения (10) и (10') записаны для следующих диапазонов изменения k : $9.5 \leq k_1 < 12.5$ с γ_1 ($k_0^1 = 9.5$) и $12.5 \leq k_2 < 16$ с γ_2 ($k_0^2 = 12.5$). При явном подобии с известным уравнением графика повторяемости отличие выражения (10) заключается в том, что в нем отсутствует зависимость от сейсмической активности A_0 . Эта величина характеризует число событий единицы поверхности в интервале энергетического класса $k_0 \pm 0.5$ и изменяется в зависимости от рассматриваемой площади. В то же время исходным в (10) является плотность распределения $f(k_0)$, которая, как показано в диссертации, не зависит от рассматриваемой площади. В двойном логарифмическом масштабе выражение (10') представлено на рис.5б. Излом графика приходится на $k=12.5$.

Нормирование интеграла от функции распределения $f(k)$ на единицу, дает возможность связать углы наклона γ_1 ($k^1 < 12.5$) и γ_2 ($k^2 > 12.5$) в законе повторяемости в единое выражение:

$$\frac{f(k_0^1)}{\gamma_1 \ln 10} \cdot 10^{\gamma_1 \Delta k / 2} \left[1 - 10^{-\gamma_1 (k_0^2 - k_0^1 + \Delta k / 2)} \right] + \frac{f(k_0^2)}{\gamma_2 \ln 10} = 1. \quad (11)$$

На рис.6а) для эпицентров, расположенных на площадях S_1, S_2, S_3 произошедших за временной интервал T (с 01.01.62 г. по 31.12.99 г.), изображены для начальных значений $k_0 = 9.5$ сглаженные гистограммы плотностей распределения $f(k)$, соответствующие неочищенному (штриховые линии) и очищенному от афтершоков каталогов. (Данные по землетрясениям Камчатского региона были предоставлены КФ ГС РАН (г. Петропавловск-Камчатский). Этот каталог за период T с эпицентрами, расположенными на площади S_1 , был очищен от афтершоков сильных камчатских событий (алгоритм Молчан Г.М., Дмитриевой О.Е., программа В.Б.Смирнова; данные предоставлены В.А. Салтыковым)). При $\Delta k = 1$ вероятности $P(k)$ численно совпадают с

$f(k)$. Несмотря на бессистемное, имеющее хаотический характер, поведение индивидуальных результатов временного ряда, связанного с попаданием случайных значений энергетического класса в конкретный интервал $k_i \pm 0.5$, выявляется явная устойчивость соответствующих частот. Для заданного минимального значения k_0 можно отметить статистическое совпадение графиков независимо от рассматриваемой площади и условия однородности (или нет) каталога.

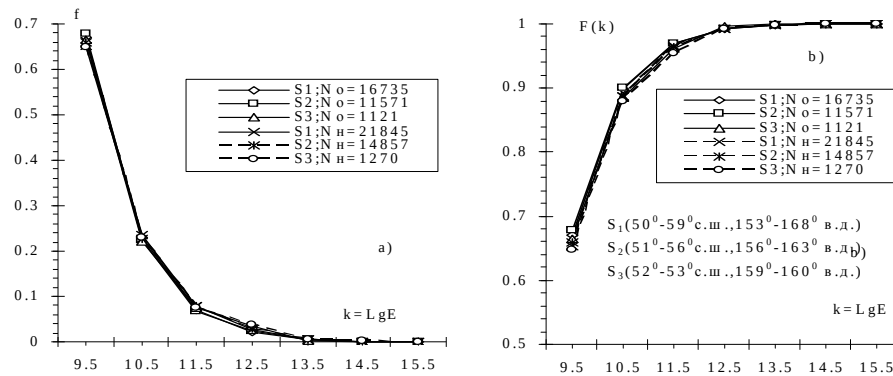


Рис.6. Плотность распределения $f(k)$ закона повторяемости землетрясений очищенного и неочищенного от афтершоков каталогов, гипоцентры которых расположены на площадях S_1 , S_2 и S_3 (а). Интегральная функция распределения $F(k)$ закона повторяемости для эпицентров сейсмических событий очищенного и неочищенного каталогов на площадях S_1 , S_2 и S_3 (б). N_0 – число событий очищенного и N_n – число событий неочищенного каталогов, k_0 – начальное значение энергетического класса.

Незначительные отличия возникают для графика повторяемости с наименьшей площадью S_3 , для которой число сейсмических событий более чем на порядок меньше, чем у площадей S_1 и S_2 . На рис.6б) представлены соответствующие функции распределения $F(k)$. Из рис.6а,б) следует, что независимо от площади все графики практически совпадают. Причем, чем больше число рассматриваемых событий N , тем лучше это совпадение, что находится в полном соответствии с предельными теоремами теории вероятностей. Следовательно, можно говорить о статистическом описании закона повторяемости сейсмических событий в вероятностном представлении на основе инвариантных уравнений (10) или (10') безотносительно от рассматриваемой площади. Это является важной отличительной особенностью в сравнении с графиками повторяемости, в основе которых лежит понятие сейсмической активности единицы поверхности A_0 , которая изменяется в зависимости от рассматриваемой площади. При таком подходе закон повторяемости получает вероятностную интерпретацию, не зависит от рассматриваемой площади и характеризует свойства среды при ее разрушении. На рис.7 представлены в логарифмическом масштабе усредненные графики распределения $f(k)$ для очищенного и неочищенного каталогов для $k_0 = 8.5, 9.5, 10.5$ и 11.5 . Обращает на себя внимание практическое совпадение значений $f(k)$ для разных k_0 . Расчет показывает, что средние значения вероятностей для различных начальных k_0 , полученные на основе обработки очищенного и не очищенного каталогов землетрясений для $S_1 \gg S_2 \gg S_3 \gg S_4$ ($\Delta k = 1$), практически одинаковые: $P_{S_3, S_4}(k_0 = 8.5) = 0.648$, $P_{S_1, S_2, S_3}(k_0 = 9.5) = 0.662$, $P_{S_1, S_2, S_3}(k_0 = 10.5) =$

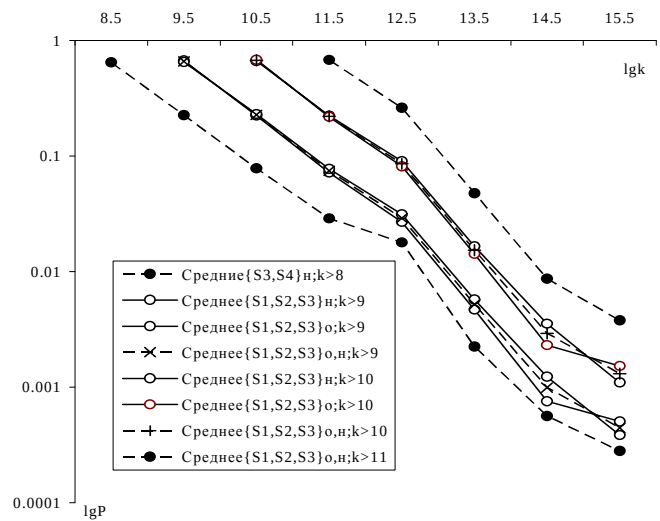


Рис.7. Усредненные по площадям S_1, S_2, S_3 распределения $\lg P(k)$ очищенного и неочищенного от афтершоков каталогов с $k_0 = 8.5, 9.5, 10.5$ и 11.5 (пунктирные линии). Сплошные линии пример усреднения с $k_0 = 9.5$ и 10.5 по площадям S_1, S_2, S_3 отдельно для очищенного и неочищенного каталогов.

разрушении. На рис.7 представлены в логарифмическом масштабе усредненные графики распределения $f(k)$ для очищенного и неочищенного каталогов для $k_0 = 8.5, 9.5, 10.5$ и 11.5 . Обращает на себя внимание практическое совпадение значений $f(k)$ для разных k_0 . Расчет показывает, что средние значения вероятностей для различных начальных k_0 , полученные на основе обработки очищенного и не очищенного каталогов землетрясений для $S_1 \gg S_2 \gg S_3 \gg S_4$ ($\Delta k = 1$), практически одинаковые: $P_{S_3, S_4}(k_0 = 8.5) = 0.648$, $P_{S_1, S_2, S_3}(k_0 = 9.5) = 0.662$, $P_{S_1, S_2, S_3}(k_0 = 10.5) =$

0.674, $P_{S_1, S_2, S_3}(k_0 = 11.5) = 0.678$ (выбор S_3 и $S_4(52^\circ - 52.5^\circ \text{ с.ш.}, 159^\circ - 159.5^\circ \text{ в.д})$ определяется тем, что они соответствуют площадям надежной регистрации событий с $k \geq 8.5$). Из (11) становится очевидным факт подобия графиков на рис.7 с практически одинаковыми, полученными расчетным путем начальными значениями $\lg P(k_0^1)$. Действительно, так как при интегрировании плотности распределения $f(k)$ от фиксированного значения k_0 до бесконечности и нормировании интеграла на единицу, смещение нижнего предела на конечное $\pm \Delta k$ не приведет к изменению начальных значений $f(k_0^1) \sim P(k_0^1)$. В диссертации показано, что вероятностная форма закона повторяемости (10) легко сводится к эмпирическому закону Гутенберга-Рихтера: $\lg N = A - bM$ (M – магнитуда события). Причем коэффициенты A и b легко рассчитываются: A – логарифм числа сейсмических событий N , попадающих в начальный интервал $M_0 \pm 0.335 (k_0 \pm 1)$ для заданной площади S и интервала времени T , b – произведение коэффициента наклона γ в (11) на множитель «1.5», характеризующего связь для камчатских землетрясений класса k с магнитудой M ($k = 4.6 + 1.5M$ (Федотов С.А.)). Расчет коэффициентов A и b для участков наклона с различными γ позволяет представить закон повторяемости двумя соотношениями, находящимися в хорошем согласии с известными выражениями Гутенберга-Рихтера,

$$\lg N(M) = 6.397 - 0.684M \quad (M \leq 5.27, k_0 \leq 12.5), \quad (12)$$

$$\lg N(M) = 7.68 - 0.925M \quad (M \geq 5.27, k_0 \geq 12.5). \quad (13)$$

Теоретико-множественный подход дает возможность вычислить плотность распределения сейсмических событий по глубине $f(h)$ для заданной площади в заданный интервал времени и на основе вейвлет-анализа исследовать вариации в распределении вероятностей возникновения сейсмических событий по глубине и по времени, например, перед Кроноцким землетрясением. Следуя общим положениям работ Соболева Г.А., было выбрано временное окно $\Delta T = 5$ лет и с шагом $\Delta S = 1$ год осуществлялось скольжение по каталогу однородных по представительному энергетическому классу ($K > 9$) событий с 05.12.85 г. по 05.12.97 г. до момента главного толчка. В качестве исследуемой области брался параллелепипед с основанием 100×100 км и высотой $H = 100$ км. Центр основания имел координаты $[54.2^0 - 162.2^0]$ и совпадал со средней частью афтершоковой области. На основе каталога сейсмических событий п-ова Камчатки было рассчитано распределение вероятностей $P(\Delta h)$, характеризующих попадания сейсмических событий в заданные интервалы глубин $\Delta h = 1$ км до $H = 100$ км за период с 18.07.77 по 05.12.97 г. Это распределение выбиралось в качестве опорного распределения $P(\Delta h)$, для которого рассчитывались соответствующие вейвлет-коэффициенты и с которыми сравнивались вейвлет-коэффициенты соответствующих распределений вероятностей $P(\Delta h)$, рассчитанных для соответствующих временных окон с $\Delta h = 1$ км. Число событий, попадаемых в каждое временное окно, изменялось от 115 (1988-1993 гг.) до 165 (1992-1997 гг.). Общее число событий $N_{77-97} = 501$.

Полученные ряды распределения вероятностей возникновения сейсмических событий по глубине были представлены в виде непрерывного вейвлет-разложения:

$$(W_\Psi f)(b, a) := |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \text{ где } \Psi b - \text{ базисный вейвлет,}$$

$f(t)$ – исследуемый сигнал; $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$.

Известно, что одним из основных преимуществ этого метода является его способность к очень точному анализу локальных свойств в поведении сигнала. Кроме того, учитывая значительную внешнюю схожесть используемых в данной конструкции базисных функций с локальными областями полученного сигнала (наличие особенностей пикообразной формы, характеризующееся широким спектром частот), предлагаемая методика является наиболее подходящей для решения поставленной задачи. Разложение производилось до 32-го масштабного уровня. Поскольку энергия коэффициентов вейвлет-преобразования дает распределение энергии процесса по масштабам, был выполнен расчет суммы вейвлет-коэффициентов по всем масштабным уровням, характеризующей распределение энергии исследуемого сигнала по глубине (рис.8 по центру):

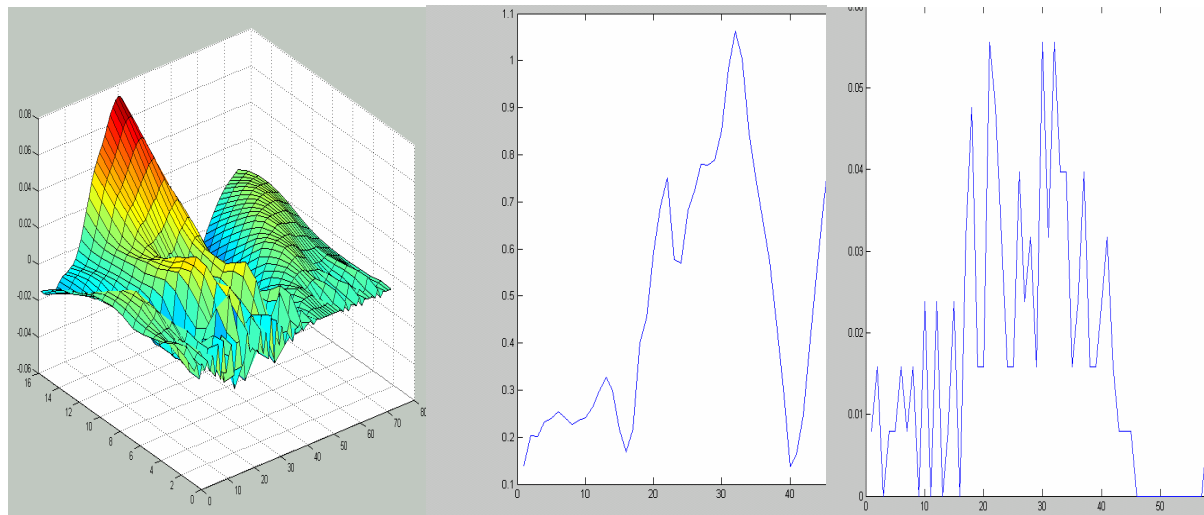
$$E = \sum_{i=1}^n W_\Psi f_i, n = 32$$

Результаты обработки общей статистики (1977-1997г.г.), показывают, что наибольшая плотность распределения вероятностей возникновения анализируемых сейсмических событий наблюдается на глубинах 20-40км (рис.8). Анализируя результаты преобразований, вычисляемые по временным окнам, видно, что на малых глубинах (от 1 до 15км), начиная с 1993г., происхо-

дит некоторое перераспределение вероятностей возникновения сейсмических событий. На это же указывает результат расчета суммы вейвлет-коэффициентов соответствующих окрестностей. Сопоставление полученной аномалии с данными каталога сейсмических событий за рассматриваемый временной период дает основание предполагать, что полученный аномальный эффект вызван событиями 1992-1993гг., произошедшими южнее Кроноцкого (выделено пунктирными линиями и отмечено стрелками). Расчеты показали, что наблюдаются существенные вариации в распределениях вероятностей возникновения сейсмических событий по глубине в анализируемых временных интервалах на глубинах 4-6км и 18-20км. Причем за один год непосредственно перед Кроноцким событием (окно 1992-1997г.г.) постепенное нарастание интенсивности событий на глубинах 18-20км (1991-1996г.г.) сменяется резким увеличением интенсивности событий на глубинах 4-6км и достигает своего максимального значения в последний год накануне события.

Завершается глава описанием качественной модели формирования сейсмического события в очаговой зоне, которая рассматривается как открытая физическая система, непрерывно обменивающаяся с окружающей средой энергией, импульсом, энтропией и т.д. Произвольная открытая физическая система постоянно находится под действием малых возмущений. Исходя из этого, можно предположить, что ЗТ есть результат проявления некоторой совокупности процессов в литосфере, являющейся нелинейной неустойчивой системой и которая находится под действием поля фона внешних возмущений. Данный подход позволяет рассматривать сейсмическое событие с точки зрения теории катастроф и применить к нему методы нелинейной термодинамики необратимых процессов, развитые И. Пригожиным.

1987-1992гг.



1988-1993гг.

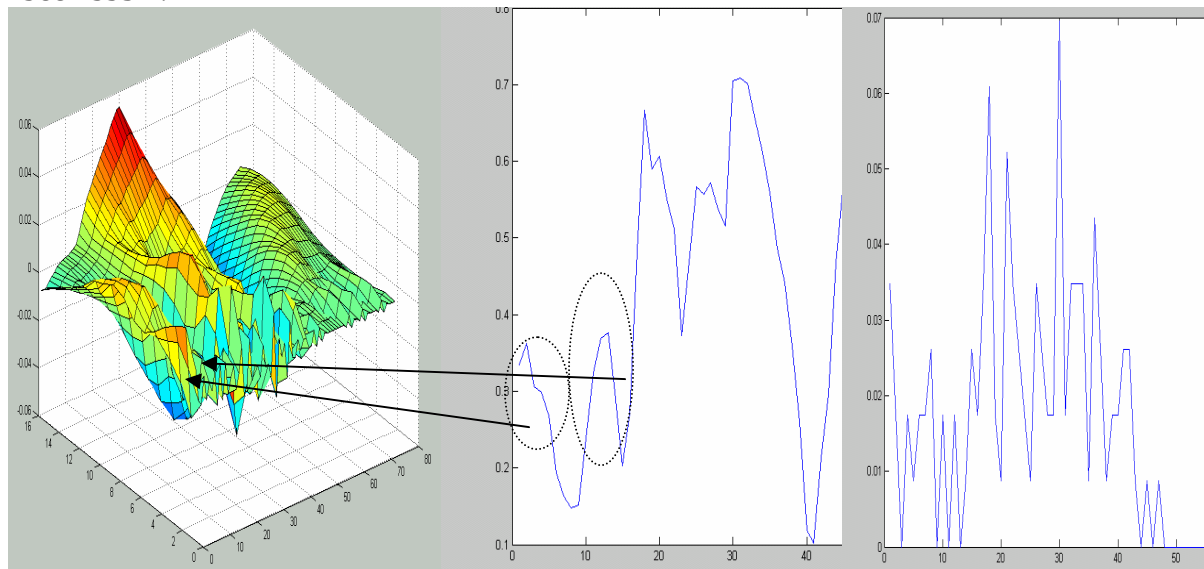
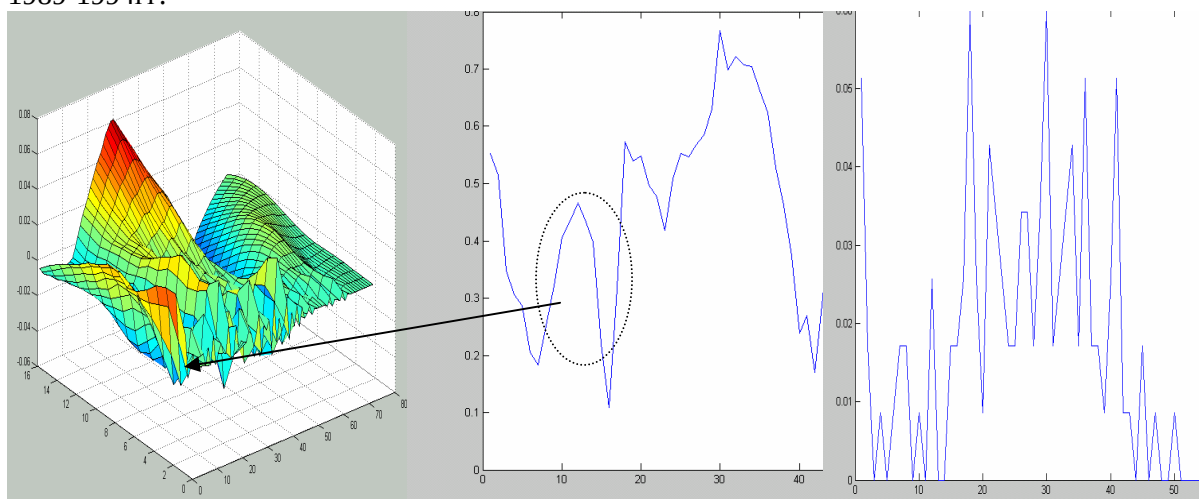
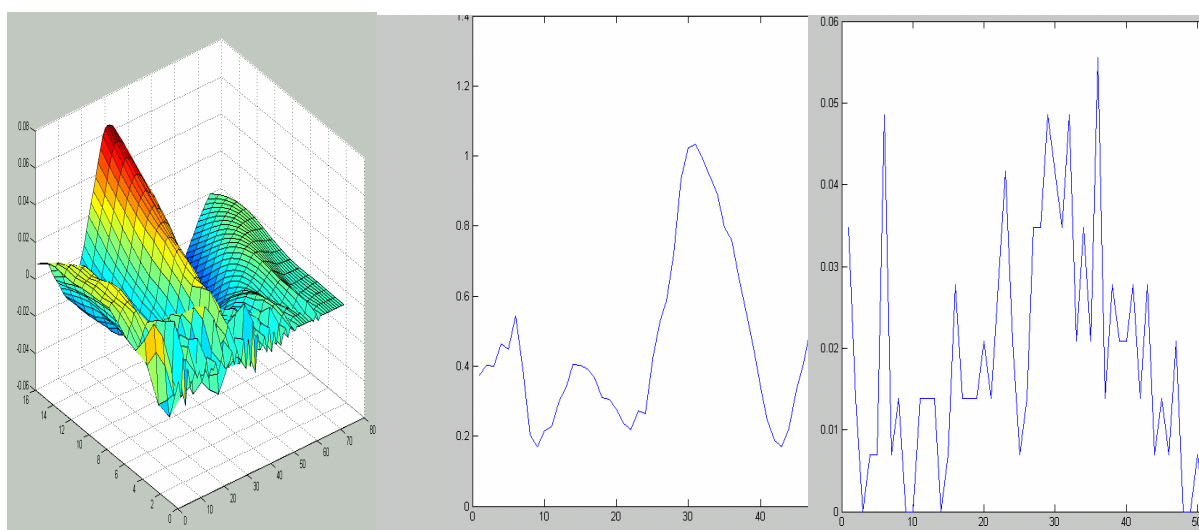


Рис.8. (Продолжение рисунка и пояснения к нему на следующей странице)

1989-1994гг.



1991-1996гг.



1992-1997 гг.

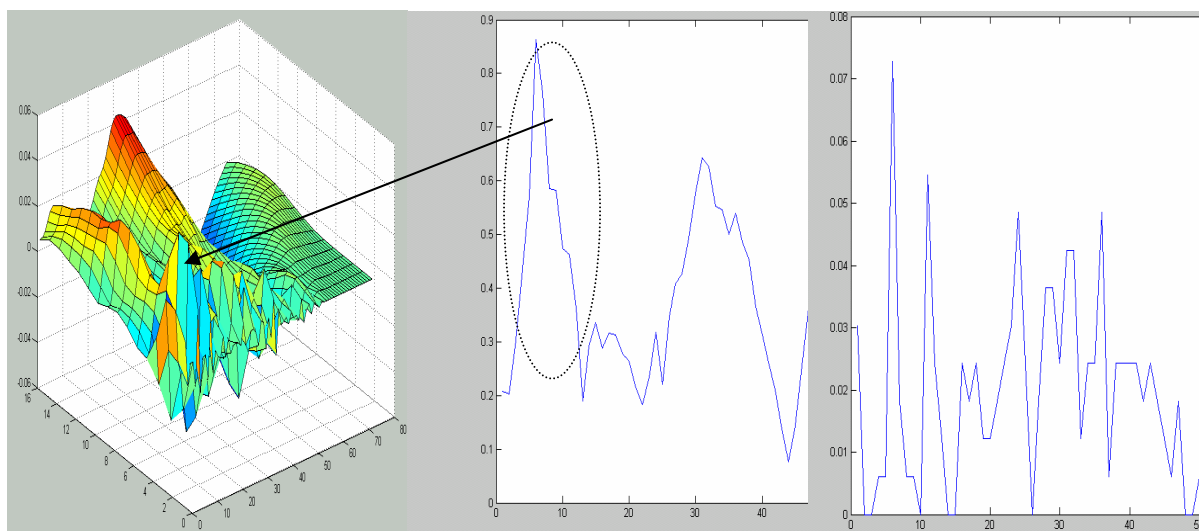


Рис.8. Результаты вейвлет-преобразования рядов распределения вероятностей возникновения сейсмических событий по глубине (слева); суммарные значения коэффициентов разложения полученных масштабных уровней по глубине (по центру); исходные данные (справа).

В **заключениях** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Доказана эквивалентность канонической и потоковой форм представления третьего адиабатического инварианта и предложен возможный механизм его нарушения, обусловленный кумулятивными эффектами ускорения радиального дрейфа. Показано, что физический смысл третьего адиабатического инварианта проявляется в переменных полях. Доказано, что точность сохранения третьего адиабатического инварианта в аксиальных полях различна для случаев экваториального и неэкваториального движения и не совпадает с точностью дрейфового приближения, а соответствует самостоятельному приближению.

2. Найдены дополнительные адиабатические формы $R^2H \approx \text{const}$ и $Rv \approx \text{const}$ в произвольных аксиальных магнитных полях, соответствующие случаю $\Phi \approx \text{const}$. На основе сохранения трех адиабатических инвариантов построена и обоснована динамическая система координат $(L, \alpha^\circ, \vartheta)$, которая переводит функцию распределения частиц в реальном (деформированном) поле путем адиабатической вариации магнитного поля в соответствующую функцию для невозмущенного (опорного) поля. Это дает возможность судить не только о степени вложенности плазмы в переменное магнитное поле, но и об инжекции новых частиц в геомагнитную ловушку. Для расчета динамики восстановительной фазы конкретной магнитной бури в области орбиты геостационарного КА применены на практике элементы системы координат $(L, \alpha^\circ, \vartheta)$.

3. Решена самосогласованная задача, в которой по распределению тока термализованных электронов в диэлектриках находится распределение электрического поля, поддерживающего заданный ток. На этой основе построена модель электризации, позволяющая рассчитать максимальные уровни отрицательного заряжения, которое диэлектрики в реальных условиях эксплуатации могут приобрести, и выработать соответствующие методы защиты на стадии проектирования. Выполнены практические расчеты электризации конкретных диэлектриков, используемых в космической технике для высокоэллиптических и геостационарных КА.

4. Определены наиболее опасные участки траектории высокоэллиптических КА, пересекающие силовые линии магнитного поля Земли, проектирующиеся в авроральный овал. В период геомагнитных возмущений вдоль этих линий движутся потоки высокотемпературной плазмы, которые приводят к объемному и дифференциальному заряджению КА. Эта информация позволяет прогнозировать сбои и отказы на конкретных КА, которые в периоды геомагнитных возмущений работают на этих участках орбиты.

5. Впервые показано, что появление в плазмосфере на главной фазе магнитной бури холодных протонов, поднимающихся вверх (от Земли), обусловлено электрическим дрейфом в

скрещенных вихревым электрическом и убывающем магнитном полях ($\text{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$). При

этом протоны, теряя энергию, остывают. На восстановительной фазе магнитной бури магнитное поле возрастает, вихревое электрическое поле меняет направление, и протоны со скоростью электрического дрейфа двигаются уже вниз (к Земле) и, приобретая энергию, разогреваются.

6. На основе современной математической конструкции вейвлет-преобразования со вложенной с известной моделью авторегрессии – проинтегрированного скользящего среднего была исследована динамика ионосферного процесса, выделены основные характерные для нее компоненты. Сопоставление обрабатываемых рядов с данными сейсмического каталога и сравнение их с асейсмической зоной (г. Магадан) за данный период позволило выявить разномасштабные аномальные эффекты в ионосфере, которые предшествуют наиболее сильным землетрясениям в районе Петропавловска-Камчатского в радиусе $R \sim 200 \text{ км}$ и $k \geq 12$ ($M \geq 5$). Дискретным разложением показано, что наилучшая аппроксимация временного ряда f_oF2 на основе авторегрессионной модели в сейсмически спокойный период (отсутствие событий с $k \geq 12,5$) достигается на четвертом уровне разложения. Сравнение с аналогичным разложением, но для сейсмоактивного периода, показала невозможность аппроксимации и, как следствие, модельного представления на этом уровне разложения. Это говорит о значительном изменении временного ряда f_oF2 и влиянии процессов литосферного происхождения на параметры ионосферы.

7. На основе статистического анализа параметров ионосферы: спорадических слоев Es и F2, подверженных диффузионному расширению, так называемые Es-spread и F-spread, обнаружено, что за 1-2 дня до землетрясения ($M > 4$) частота появления Es-spread увеличивается в предполуночные часы, т.е. турбулизация плазмы спорадических Es-слоев усиливается, а турбулизация F-слоя за неделю уменьшается сейсмического события. Статистическая достоверность составляет 0.95 для всех обнаруженных эффектов.

8. Предложен теоретико-множественный подход к описанию ЗТ произвольного сейсмоактивного региона, позволяющий представить модель сейсмических событий п-ова Камчатка за период инструментальных наблюдений как вероятностное пространство трех объектов $\{\Omega, \tilde{F}, P\}$, и на основе обработки соответствующего каталога землетрясений вычислять распределения событий и в терминах случайности исследовать различные стороны сейсмического режима.

9. Получено вероятностное представление закона повторяемости сейсмических событий, которое позволяет представить его в инвариантной форме (6.5.1a) или (6.5.1b) независимо от рассматриваемой площади и показана его связь с законом Гутенберга-Рихтера. Получены рекуррентные соотношения для определения по каталогу событий Камчатского региона периоды возникновения катастрофических землетрясений.

10. На основе теоретико-множественного подхода показано формирование вероятностной структуры распределения сейсмических событий по глубине и по времени накануне сильного события на примере Кроноцкого землетрясения. Применение методов вейвлет-преобразования позволили выделить аномальные особенности в изменении распределения потока сейсмических событий по глубине перед сильным землетрясением и локализовать область будущего события. Этот результат находится в русле современных представлений о физике сейсмического процесса, основанного на особенностях блокового строения и предельной энергонасыщенности, что диктует необходимость разработки методик по поиску и выделению неустойчивых областей геотектонических состояний.

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. **Богданов В.В., Плетнев В.Д.** К вопросу о точности сохранения третьего адиабатического инварианта движения заряженной частицы в аксиально-симметричных полях. I // Космические исследования. 1972. Т. 10. Вып.3. С.358-367.

2. **Богданов В.В., Плетнев В.Д.** К вопросу о точности сохранения третьего адиабатического инварианта движения заряженной частицы в аксиально-симметричных полях. II. // Космические исследования. 1972. Т. 10. Вып.4. С.528-531.

3. **Богданов В.В., Плетнев В.Д.** К вопросу о динамической системе координат в геомагнитной ловушке // Космические исследования. 1974. Т.12. Вып.3. С.380-386.

4. **Богданов В.В., Киселев М.И., Абгарян А.А.** О качественной теории измерительных систем // Метрология. 1975, № 10.

5. **Богданов В.В., Киселев М.И., Абгарян А.А.** О качественной теории измерительных систем с адиабатическими инвариантами // Метрология, 1975, № 11.

6. **Богданов В.В.** К вопросу о точности сохранения третьего адиабатического инварианта движения заряженной частицы в магнитном поле // Оптико-физические измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1977. ВНИИОФИ, С.8-10.

7. **Резников С.Б., Богданов В.В.** и другие, указанные в описании. Устройство для измерения зарядов электризации диэлектриков. **Авторское свидетельство № 1589789. 1990.**

8. **Богданов В.В.** Вероятностная интерпретация закона повторяемости землетрясений на примере Камчатского региона // Докл. АН. 2006. Т. 408. № 3. с.393-397.

9. **Liperovskaya E.V., Parrot M., Bogdanov V.V., Meister C.-V., Rodkin M.V., Liperovsky V.A.** On variations of f_oF_2 and F-spread before strong earthquakes in Japan // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006, 6. P.735-739.

10. **Liperovskaya E.V., Meister C.-V., Pokhotelov O.F., Parrot M., Bogdanov V.V., Vasil'eva N.E.** On E_s -spread effects in the ionosphere connected to earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006, 6. P.741-744.

11. **Богданов В.В., Геппенер В.В., Мандрикова О.В.** Моделирование нестационарных временных рядов геофизических параметров со сложной структурой. – С.-Петербург: ЛЭТИ. 2006. – 108с.

12. **Богданов В.В.** Динамика магнитосферной плазмы в дрейфовом приближении. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 138 с.

13. **АКТ** реализации в НПО им. С.А. Лавочкина научных результатов докторской диссертации **Богданова В.В.** от 26.10.2005г.

14. **Богданов В.В., Павлов А.В.** «Программа для расчета вероятностей сейсмических событий». М.: ВНИИЦ, 2007, № гос. рег. 50200702092 Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9093 от 10.10.2007.

15. Мандрикова О.В., Богданов В.В. Исследование сигнала критической частоты на основе конструкции вейвлет-разложения // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Науки о Земле. Спецвыпуск. 2007. С.90–93.
16. Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А. Моделирование сигналов со сложной структурой на основе конструкции вейвлет-преобразования // Информационные технологии, 2008. №4. С.12-19.
17. Мандрикова О.В., Богданов В.В. Аппроксимация статистического распределения случайной величины на основе конструкции вейвлет-преобразования// Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2008. №3, С.53-57.
18. Богданов В.В. Ориентировочные расчеты параметров зарядки кварцевого обтекателя электричеством (качественное представление). Отчет о НИР/ НПО им С.А. Лавочкина. – М.,1985.– 19 с.
19. Богданов В.В. Оценка параметров электризации в натурных условиях системы 141323 в составе изделия 14112 и выбор способов и требований по защите элементов конструкции от воздействия статического электричества. Отчет о НИР/ НПО им С.А. Лавочкина. – М.,1986. – 17 с.
20. Богданов В.В. Экспериментальное определение удельного и переходного сопротивления конструктивных элементов системы 141323. Отчет о НИР/НПО им. С.А. Лавочкина. – М.,1988. – 12 с.
21. Бассоло В.С., Богданов В.В., Инжелевская И.В., Ильин В.Г., Осипов Н.К., Трищенко Л.Д. Моделирование крупномасштабных магнитосферных процессов. 1989. Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1480. 40 с.
22. Богданов В.В., Волк И.П. Разработка инженерной методики расчета поверхностной электризации высокоомных диэлектриков. Этап I. 1989. Отчет о НИР. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. – 51 с.
23. Богданов В.В., Волк И.П. Разработка инженерной методики расчета объемной электризации высокоомных диэлектриков. Этап II. 1989. Отчет о НИР. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. – 42 с.
24. Богданов В.В., Волк И.П. Разработка инженерной методики расчета электризации диэлектрика, учитывающей кулоновское взаимодействие потоков ионизованных частиц с заряженным диэлектриком. Этап III. 1989. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. – 29 с.
25. Амиантов И.Н., Богданов В.В., Вершинин Е.Ф. Исследование и научное обоснование возможности создания информационной системы оперативного глобального прогноза землетрясений с использованием данных от космических и наземных средств измерений. 1989. Научно-технических отчет, с. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. – 145 с.
26. Амиантов И.Н., Балебанов В.М., Богданов В.В., Покровский В.Н., Чесноков А.Г. Контроль электромагнитных предвестников наземными средствами с целью осуществления прогноза землетрясений.1990. Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1709. – 24 с.
27. Богданов В.В. Сейсмическое явление как процесс разрушения неустойчивой структуры на фоне внешних возмущений // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Тез. докл. II международное совещание 14-19 августа 2004г. с. Паратунка: – П.-Камчатский. 2004. С. 12-13.
28. Богданов В.В. Применение теории катастроф и методов нелинейной термодинамики Пригожина для описания сейсмических явлений // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений. Тез. докл. II международное совещание 14-19 августа 2004г. с. Паратунка: – П.-Камчатский. 2004. С. 14-16.
29. Богданов В.В., Бузевич А.В., Виноцкий А.В., Дружин Г.И., Купцов А.В., Поддельский И.Н., Смирнов Э.С., Шевцов Б.М. О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические геофизические исследования Камчатки. Сборник к 25-летию Камчатской опытно-методической партии ГС РАН. – П.-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 259-278.
30. E.F.Vershinin, V.V. Bogdanov, G.I. Druzhin, K. Yumoto. Electromagnetic precursors of Kamchatka earthquakes according to the data of ground complex observations data//International Workshop on Seismo-Electromagnetics of NASDA (IWSE 2000).Tokyo. September 19-22, 2000. P.32.
31. Вершинин Е.Ф., Дружин Г.И., Богданов В.В., Юмото К.. Сейсмoeлектромагнитные предвестники землетрясений по комплексным наземным наблюдениям и связанные с ними явления в ионосферно-магнитосферной плазме // Проблемы геодинамики и прогноза землетря-

сений. Первый Российско-японский семинар. ИТиГ ДВО РАН. Хабаровск. 26-29 сентября. 2001. С.170-178.

32. **Богданов В.В.** Вероятностная интерпретация закона повторяемости сейсмических событий на примере Камчатского региона // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: III международное совещание 16-21 августа 2004г. с. Паратунка: [сб. докл.]. – П.-Камчатский. 2004. С. 25-30.

33. **Богданов В.В., Мандрикова О.В.** Вариации в распределении вероятностей потока событий по глубине и времени перед сильными землетрясениями (на примере Кроноцкого землетрясения) // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: III международное совещание 16-21 августа 2004г. с. Паратунка: [сб. докл.]. – П.-Камчатский. 2004. С.31-35.

34. **Богданов В.В., Мандрикова О.В.** Непараметрическое моделирование ионосферных данных в базисе вейвлетов на примере критической частоты f_oF2 // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: III международное совещание 16-21 августа 2004г. с. Паратунка: [сб. докл.]. – П.-Камчатский. 2004. С.35-42.

35. **Богданов В.В., Мандрикова О.В.** Исследование временных рядов распределений вероятностей сейсмических событий методом вейвлет-разложения (Кроноцкое землетрясение, 05.12.97, Камчатка) // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург. 2005. Т.2 С.162-164.

36. **Мандрикова О.В., Богданов В.В., Павлов А.В.** Изменения в распределении вероятностей возникновения землетрясений по глубине накануне Кроноцкого землетрясения (05.12.97 г.) // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 27-29 июня 2006г., С-Петербург: [сб. докл.]. – С-Петербург, 2006. Т. 2. С.153-157).

37. **Богданов В.В., Мандрикова О.В., Корнев Е.В., Шумилова А.Л., Конюхов А.В.** Об аномалиях в ионосферных процессах Камчатского региона накануне сейсмических событий // Вестник КГТУ. Выпуск 4. -П.Камчатский, КГТУ. 2005. С.52-56.

38. **Богданов В.В., Мандрикова О.В., Полозов Ю.А.** Выявление аномальных изменений в ионосферных параметрах на основе модельного представления сигналов критической частоты f_oF2 // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.]. – П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.256-259.

39. **Богданов В.В., Мандрикова О.В.** Анализ изменений в распределении вероятностей сейсмических событий по глубине на основе вейвлет-разложений // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с.Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.]. – П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.260-263

40. **Богданов В.В., Павлов А.В.** Изучение изменений доверительных интервалов для вероятностей попадания сейсмических событий в заданные интервалы энергетического класса накануне крупных землетрясений // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.]. – П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.264-268

41. **Липеровская Е.В., Парро М., Богданов В.В., Мейстер К.В., Родкин М.В., Липеровский В.А.** О возмущениях f_oF2 в среднеширотной ионосфере перед сильными землетрясениями // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.]. – П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.367-372.

42. **Липеровская Е.В., Богданов В.В., Липеровский В.А., Похотелов О.А., Силина А.С., Олифиров А.В.** Статистический анализ возмущений околорассветной критической частоты f_oE ионосферы в связи с землетрясениями по материалам станций Ташкент и Петропавловск-Камчатский // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.]. – П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.372-377

43. **Липеровская Е.В., Богданов В.В., Родкин М.В., Мейстер К.В., Силина А.С., Мандрикова О.В.** Статистический анализ возмущений критической частоты f_oF2 ионосферы за несколько суток до и после землетрясениями – сопоставление результатов, полученных по материалам японской станции Токио и станции Петропавловск-Камчатский // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.]. – П.-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.378 -384

44. **Липеровская Е.В., Богданов В.В., Родкин М.В., Мейстер К.В., Васильева Н.Э., Олифиров А.В.** Суточная зависимость возмущений в спорадическом слое E_s ионосферы в связи с землетрясениями по материалам станций вертикального зондирования Петропавловск-Камчатский и Токио // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд.

конф., 14-17 авг. 2007г., с.Паратунка Камч. обл.: [сб.докл.]. – П-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.1. С.385-390

45. **Богданов В.В., Мандрикова О.В., Павлов А.В., Шумилова А.Л.** Вероятностная интерпретация закона Гуттенберга-Рихтера и оценка времен повторения сильных камчатских землетрясений с магнитудой равной 9 и 9.5 баллов // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 25-27 июня 2007г., С-Петербург: [сб. докл.]. – С-Петербург, 2007. Т.2. С.177-181.

46. **Мандрикова О.В., Богданов В.В.** Исследование вариаций распределения сейсмических событий по глубине на основе применения конструкции вейвлет-преобразования // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 25-27 июня 2007г., С-Петербург: [сб. докл.]. – С-Петербург, 2007. Т.2. С.209-212.

47. **Богданов В.В., Мандрикова О.В.** Вейвлет-анализ распределений вероятностей сейсмических событий Камчатского региона накануне Кроноцкого землетрясения // Вестник КГТУ. Выпуск 4. П.-Камчатский, КГТУ. 2005. С.56-59.

48. **Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А.** Анализ изменений, происходящих в ионосферных параметрах накануне землетрясений на Камчатке, на основе вейвлет-преобразования сигналов критической частоты // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 25-27 июня 2007г., С-Петербург: [сб. докл.]. – С-Петербург, 2007. Т.2. С.213-216.

49. **Мандрикова О.В., Богданов В.В.** Многоструктурные модели геофизических сигналов // Распознавание образов и анализ изображений: Новые информационные технологии, VIII межд. конф. 7-13 окт. 2007 г., Йошкар-Ола. : [сб. докл.]. – Мар.ГТУ Йошкар-Ола. 2007. С.20-21.

50. **Liperovskaya E.V., Bogdanov V.V., Meister C.-V., Liperovsky V.A., Rodkin M.V.** Day-time variations of foF2 connected to strong earthquakes // XXIV General Assembly of the Int. Union of Geodesy and Geophysics. Perugia, Italy, July 2-13, 2007

51. **Богданов В.В.** Динамика заряженных частиц в нестационарной магнитосфере с учетом сохранения трех адиабатических инвариантов//Физика плазмы в солнечной системе, конф. 5-8 февраля, 2008, Москва: [сб. тезисов].:-ИКИ РАН, 2008. http://solarwind.cosmos.ru/txt/tes_2008.pdf. С. 45.

52. **Амиантов И.Н., Богданов В.В., Вершинин Е.Ф. и др.** Анализ возможностей создания комплексной системы прогноза землетрясений по данным наземных и космических измерений параметров солнечной активности, магнитосферы и электромагнитного поля в широком диапазоне частот. 1990. Отчет о НИР. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. – 120 с.

53. **Амиантов И.Н., Богданов В.В., Вершинин Е.Ф. и др.** Разработка алгоритмов краткосрочных прогнозов аномальных явлений на основе электромагнитных предвестников. 1991. Отчет о НИР. Паратунка, ИКИР ДВО РАН. – 24 с.

54. **Богданов В.В.** Обнаружение и выделение оперативных электромагнитных предвестников для прогноза сильных землетрясений на Камчатке. 1995. Научно-технический договор № 1-95. ИКИР ДВО РАН. – 14 с.

55. **Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М.** Образование аэрозольных слоев в стратосфере под воздействием солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия.2004. Т.44, №6. С.841-848.

56. **Шевцов Б.М., Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В.** Образование аэрозольных слоев в стратосфере под воздействием магнитной активности//Солнечно-земная физика: межд. конф., 20-25 сент.2004 г., Иркутск: [тезисы]. – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004. С.66.

57. **V.N. Marichev, V.V. Bogdanov, I.V. Jivetyev, B.M. Shevtsov.** Influence of solar activity on formation of aerosol layers in the stratosphere.//Proc. XI Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. Tomsk, 2004. – P.169.

58. **V.N. Marichev, V.V. Bogdanov, I.V. Jivetyev, B.M. Shevtsov.** “Formation of aerosol layers in the stratosphere under the influence of solar activity according to the Kamchatka observation data”.//Proc. XI Joint International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”. Tomsk, 2004. P.172.

59. **B.M. Shevtsov, V.N. Marichev, V.V. Bogdanov, I.V. Jivetyev, V.V. Bychkov.** About mechanisms of the aerosol layers formation in the stratosphere under the influence of magnetic activity//Proc. International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences. Beijing, China.August.2005.A-43

60. **Богданов В.В., Калинин В.Н.** Феноменологическое уравнение бесстолкновительной плазмы в дрейфовом приближении / Применение ультразвука к исследованию вещества: [сб. научных тр.] / ред. д.ф.-м.н. В.Ф. Ноздрев. – М.: ВЗМИ. 1981. Вып. 31. С.95-106.

61. *Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., Bogdanov V.V.* On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes//Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V.5. N6 P. 783 - 789.
62. *Липеровский В.А., Михайлин В.В., Шевцов Б.М., Умарходжаев Р.М., Богданов В.В., Мейстер К.В.* Электрические поля и инфракрасное излучение в аэрозольных облаках перед землетрясениями // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007г., с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.] П-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.391-397
63. *Мандрикова О.В., Богданов В.В., Колюхов А.В.* Оптимизация обучения нейронной сети на основе вейвлет-преобразования на примере модельного представления ионосферного сигнала // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 27-29 июня 2006г., С-Петербург: [сб. докл.]. – С-Петербург, 2006. Т.1. С.223-226.
64. *Мандрикова О.В., Богданов В.В., Полозов Ю.А.* Моделирование сигнала критической частоты на основе нейронных сетей с целью поиска аномального поведения // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, 27-29 июня 2006г., С-Петербург: [сб. докл.]. – С-Петербург, 2006. Т.2. С.158-160.
65. *Богданов В.В.* Применение вариационных методов неравновесной термодинамики для получения диссипативной системы МГД-уравнений в приближении ведущего центра // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV межд. конф., 14-17 авг. 2007, с. Паратунка Камч. обл.: [сб. докл.] П-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. Ч.I. С.37-42
66. *Богданов В.В., Шумилова А.Л.* Применение методов вейвлет-разложения для анализа аномального поведения параметров электрического поля перед землетрясением по данным ИСЗ «Demeter» // Достижения в спутниковой океанографии: изучение и мониторинг окраинных морей Азии: 3-6 окт.2007 г., Владивосток: [сб. материалов] Владивосток: Дальнаука, 2007. С.19-20.
67. *Богданов В.В., Шумилова А.Л.* Предварительные результаты обработки измерений электромагнитного поля в диапазоне γ -20 кГц, зарегистрированных на ИСЗ «Demeter» (Франция) накануне землетрясения в Коряки 20.04.06 // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: I регион.научно-техн.конференция.11-17 ноября 2007, Петропавловск-Камчатский: [тезисы]. – Петропавловск-Камчатский, ГС РАН, 2007. С.111.
68. *Богданов В.В., Павлов А.В.* Поиск влияния литосферных процессов на ионосферный слой методами непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: I регион.научно-техн. конференция.11-17 ноября 2007г., Петропавловск-Камчатский: [тезисы]. – Петропавловск-Камчатский, ГС РАН, 2007. С.108.
69. *Липеровский В.А., Мейстер К.В., Леперовская Е.В., Богданов В.В., Давыдов В.Ф.* Электрогравитационные эффекты при инъекции радона и наличии аэрозолей в надразломных зонах перед землетрясениями // Актуальные проблемы мониторинга рисков чрезвычайных ситуаций. Научно-методическая конференция. 11 октября 2006. [сб. материалов]. Химки, академия гражданской защиты, 2007. С.69-83.