

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук

(29 мая 1996 г.)

29 мая 1996 г. в Институте физических проблем им. П.Л. Капицы РАН состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук. На сессии были заслушаны доклады.

1. **Зализняк И.А., Реньо Л.П., Петров С.В.** (Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва). *Экспериментальное подтверждение различий в спиновой динамике квазиодномерных антиферромагнетиков с целым и полуцелым спином.*

2. **Бучаченко А.Л., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Страхов В.Н., Чмырев В.М.** (Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Москва). *Ионосферные предвестники землетрясений.*

Краткое сообщение по второму докладу публикуется ниже.

PACS numbers: 91.30.Px, 94.20.Vv

Ионосферные предвестники землетрясений

А.Л. Бучаченко, В.Н. Ораевский,
О.А. Похотелов, В.Н. Сорокин,
В.Н. Страхов, В.М. Чмырев

1. Введение

Землетрясения, извержения вулканов, цунами и другие крупномасштабные природные катастрофы, вызывающие многочисленные разрушения, ежегодно уносят сотни человеческих жизней; требуются многие миллионы долларов на восстановление и ликвидацию последствий этих стихийных бедствий. Поэтому прогнозирование и своевременное предупреждение о приближающихся катастрофах остается одной из важнейших нерешенных проблем современной геофизики и космической физики.

При разработке системы предупреждения необходимо учитывать не только сейсмические процессы, но весь комплекс физических явлений, возбуждаемых в различных средах на подготовительных фазах землетрясения. В настоящее время многие экспериментальные факты указывают на существование электромагнитных и плазменных предвестников землетрясений, т.е. возмущений параметров полей и плазмы, генерируемых в

атмосфере и ионосфере за часы, дни и недели до начала землетрясения. Настоящий доклад посвящен основным результатам экспериментального изучения этих явлений, развитию программы исследований процессов в очаге землетрясения и физических механизмов формирования различных типов предвестников с целью разработки методологии краткосрочного прогноза, а также обоснованию структуры и состава экспериментальной системы мониторинга предвестников землетрясений.

2. Экспериментальные результаты

В течение последнего десятилетия в ряде спутниковых экспериментов обнаружены новые явления в ионосфере и магнитосфере, предшествующие землетрясениям. К ним, в частности, относятся аномальные всплески электромагнитного излучения в УНЧ/КНЧ/ОНЧ диапазонах, зарегистрированные на спутниках "Интеркосмос-18,19", "Интеркосмос-Болгария-1300", "Ореол-3", "Космос-1809", "Интеркосмос-24", "OGO-6", DE-2 и ряде других космических аппаратов [1–10]. Отмечена отчетливая связь этих аномальных электромагнитных явлений с конкретными землетрясениями. Существование КНЧ излучений сейсмического происхождения в ионосфере подтверждается результатами статистического анализа спутниковых данных по сотням землетрясений [10].

Имеются убедительные данные по квазипостоянным электрическим полям в земле и в ионосферной плазме [4, 11, 12], аномальному свечению атмосферы в различных диапазонах длин волн [13, 14], возмущениям основных параметров E - и F -областей ионосферной плазмы [15–19], изменениям ионного состава, температуры плазмы и потоков высокоэнергичных частиц в верхней ионосфере [20, 21, 35], возмущениям амплитуды и фазы сигналов СДВ и КВ радиостанций на трассах, проходящих через зоны землетрясений [22, 23, 29], геомагнитным пульсациям и свистам [24–26], вариациям состава атмосферного газа, формированию аэрозольных облаков определенного типа и возрастанию концентрации тяжелых элементов в водных резервуарах вблизи очага землетрясения и ряду других явлений [19, 36].

Указанные выше процессы наблюдались с космических аппаратов или на наземной аппаратуре перед землетрясениями, опережая их начало на часы, дни или недели в зависимости от вида явления, благодаря чему их можно рассматривать как предвестники и использовать в качестве физической основы для построения

системы прогнозирования и предупреждения землетрясений.

Наряду с предвестниками крупномасштабных природных катастроф в последнее время обнаружены и активно изучаются возмущения параметров электромагнитных полей и плазмы, чувствительные к техногенным катастрофам, таким как аварии на атомных электростанциях, ядерные взрывы в различных средах и другие воздействия на окружающую среду, связанные с деятельностью человека [27–33].

Рассмотрим некоторые примеры сейсмогенных возмущений электромагнитных полей и плазмы, наблюдаемых на ионосферных спутниках перед землетрясениями.

На рисунке 1б показаны вариации двух горизонтальных компонент магнитного поля B_x и B_y в диапазоне частот 0,1–8 Гц и вертикальная компонента квазипостоянного электрического поля E_z , наблюдавшиеся со спутника "Интеркосмос – Болгария-1300" в 15-минутном интервале перед землетрясением, которое произошло 21 января 1982 г. [4]. Проекция орбиты спутника и положение эпицентра, отмеченного крестом, показаны на рис. 1а. Магнитный экватор обозначен сплошной линией. Начало землетрясения было в 17.50.26 UT, географические координаты эпицентра: 3,39° с.ш., 177,43° в.д., глубина 33 км, магнитуда $M = 4,8$. Стрелка на рис. 1б обозначает момент, когда спутник проходил на минимальном расстоянии (2,8° к западу) от эпицентра. Зоны вблизи 17.35.15 и 17.37.50 UT соответствуют проекции очага землетрясения вдоль магнитных силовых

линий с нижней ионосферы на высоту спутника. Видно, что вертикальное квазистатическое электрическое поле 3–7 мВ м⁻¹ наблюдалось в двух зонах: около 17.38 UT над эпицентром землетрясения и в магнитно сопряженной зоне около 17.35.15 UT. Ширина зон составляла 1–1,5° по широте. Амплитуда наблюдавшихся геомагнитных пульсаций на частоте около 1 Гц была 3 нТл. В работе [4] показано, что наблюдавшиеся электрические и магнитные поля не являются полями ионосферного или магнитосферного происхождения, но связаны с землетрясениями.

Рисунок 2 иллюстрирует ионосферные эффекты сильных афтершоков разрушительного Спитакского землетрясения (Армения, 40,7° с.ш., 44,0° в.д., 7 декабря 1988 г., $M = 6,7$), которые анализировались в работе [8]. Наблюдения выполнялись с борта спутника "Космос-1809" на высотах ~ 970 км в период высокой сейсмической актив-

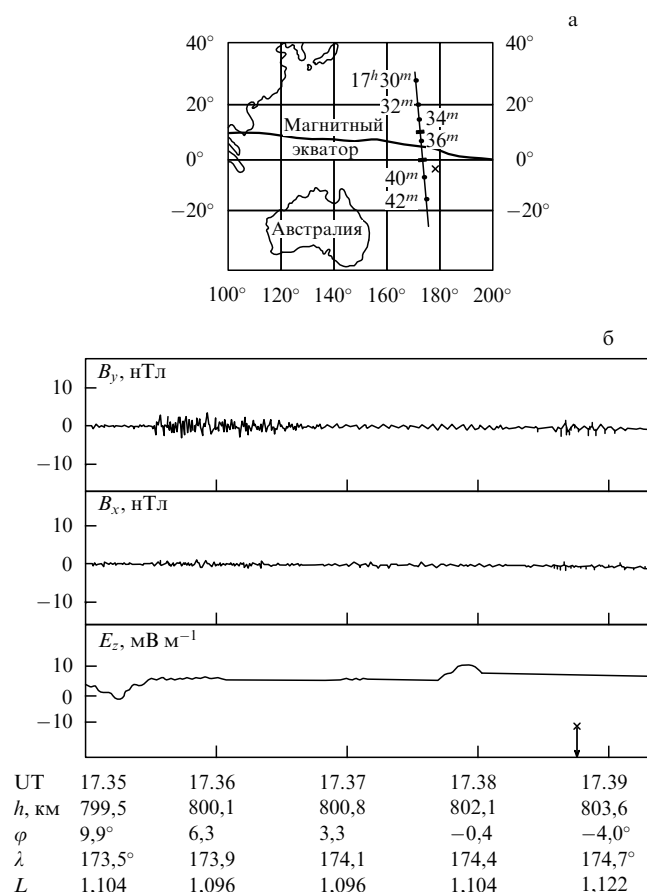


Рис. 1

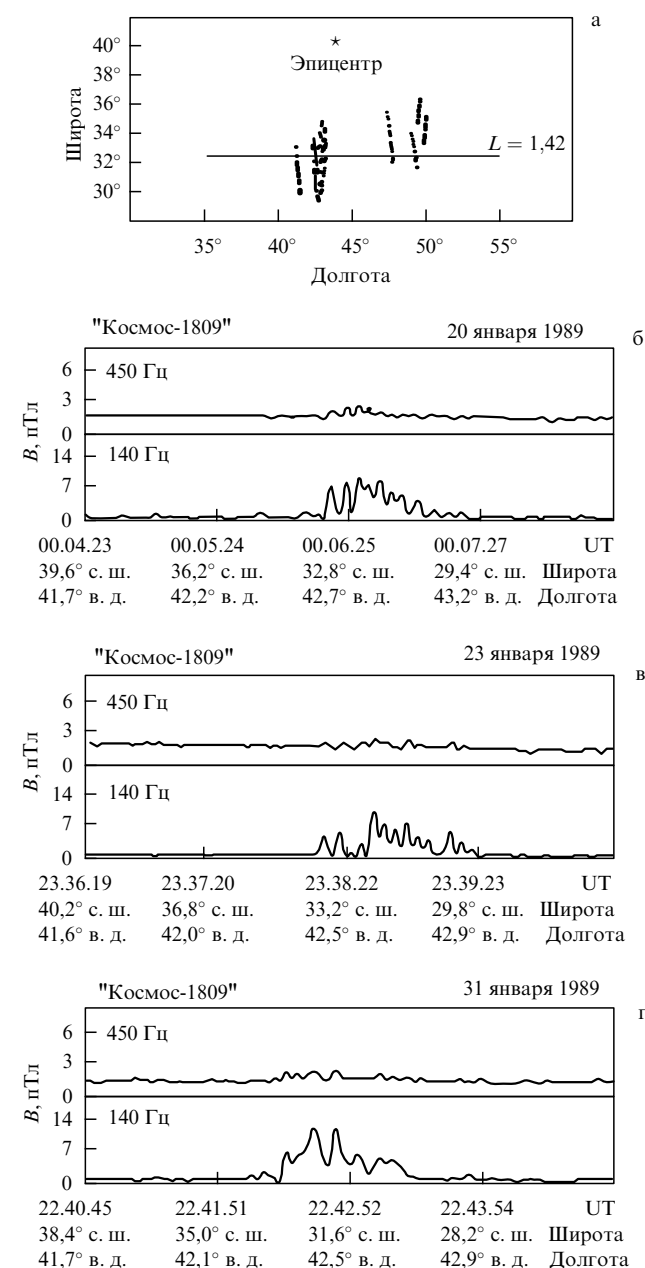


Рис. 2

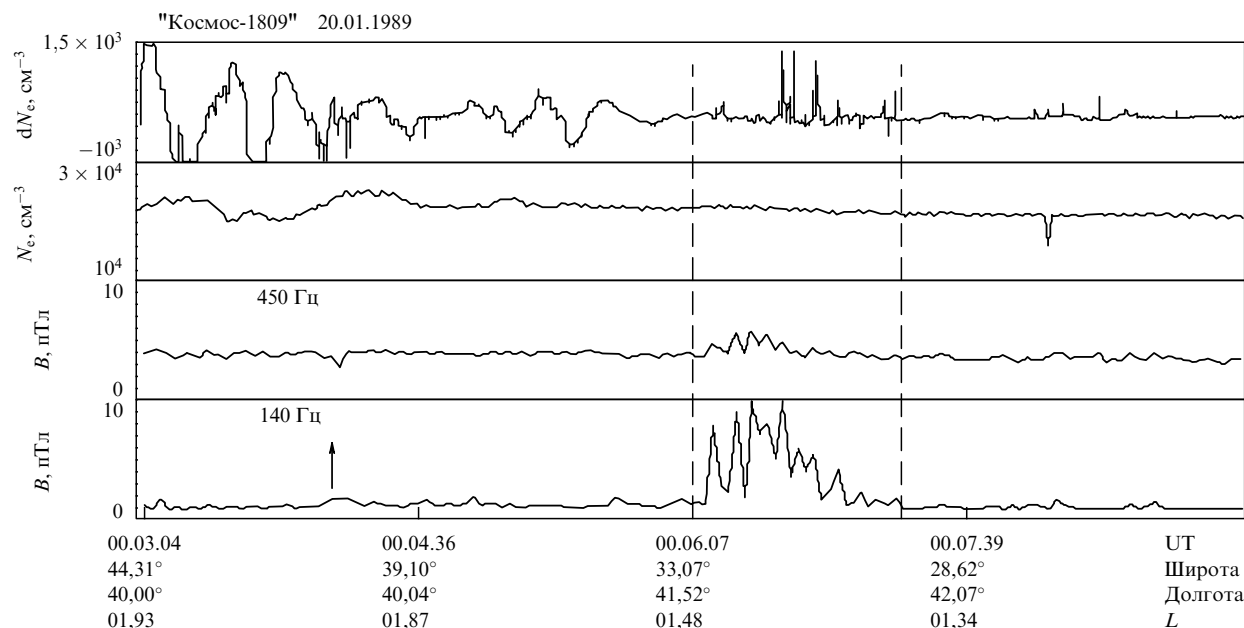


Рис. 3

ности с 20 января по 17 февраля 1989 г. На рисунке 2а–г показано: (а) локализация эпицентра и орбит спутника, на которых наблюдались электромагнитные КНЧ излучения; (б) наблюдения на частотах 140 и 450 Гц за 2,5 ч до землетрясения (мировое время UT, широта и долгота указаны на рисунке); (в) наблюдения, сделанные за 10 мин и 2,9 ч до афтершоков; (г) наблюдения во время длинной серии более слабых, но множественных толчков. Эти данные и другие результаты КНЧ/ОНЧ измерений на борту аппарата "Космос-1809" в районе Спитака показали, что интенсивные КНЧ излучения генерируются в зоне меньше или порядка 6° по долготе и $2-4^\circ$ по широте относительно эпицентра землетрясения. Интенсивность излучений составляла около 10 пТл на частоте 140 Гц (в полосе частот 25 Гц) и около 3 пТл на частоте 450 Гц (в полосе 75 Гц). Дальнейшая работа с данными "Космос-1809" позволила обнаружить мелкомасштабные (4–10 км вдоль орбиты) неоднородности плотности плазмы $\delta N/N = 3-8\%$, которые возбуждаются в тех же областях, что и аномальные КНЧ излучения [34]. Пример такой неоднородной структуры показан на рис. 3 для случая, представленного на рис. 2б.

Ультранизкочастотный (УНЧ) отклик ионосферы на процессы подготовки землетрясений был обнаружен в [6]. Измерения [6], выполненные на спутнике "Интеркосмос–Болгария-1300" показали, что электромагнитное излучение на частотах выше и порядка 8 Гц с амплитудой 0,2–0,4 нТл возбуждается в ионосфере за несколько часов до и во время землетрясения. Ширина зоны регистрации излучения составляла 40–100 км вдоль траектории спутника, а максимальная интенсивность наблюдалась на L-оболочке проекции очага землетрясения на высоту 100 км в ионосфере. Пример динамического спектра УНЧ эмиссии сейсмического происхождения приведен на рис. 4. Стрелка на временной шкале показывает момент времени, когда спутник пересек L-оболочку эпицентра.

Рисунок 5 демонстрирует двумерное распределение отклонения электронной плотности от медианного уровня в максимуме F-слоя ионосферы (в терминах

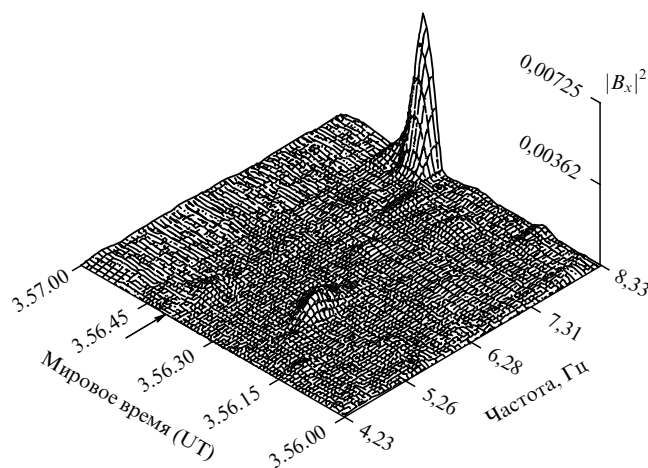


Рис. 4

критической частоты, МГц), наблюдавшееся на спутнике "Интеркосмос-19" с помощью бортового ионозонда. Отрицательные вариации электронной плотности наблюдались за 2 дня и за 1 день до начала землетрясения (рис. 4а, б). Модификация ионосферы подобного рода, имеющая место в диапазоне высот от 60 км в D-слое до верхней ионосферы (вплоть до 1000 км), вызывается комбинированным действием электромагнитных и химических факторов на ионосферную плазму [19].

Таким образом, существует хорошая экспериментальная база для организации специальной программы работ по интегрированию всех существующих экспериментальных данных и физических моделей и их дальнейшему развитию с целью разработки методов применения ионосферных наблюдений для прогнозирования и контроля крупномасштабных катастроф из космоса. Вариант такой программы представлен ниже.

Вместе с тем, доступные экспериментальные данные по сейсмическим и техногенным эффектам в ионосфере были получены как попутные результаты экспериментов, первоначально планировавшихся для решения совсем

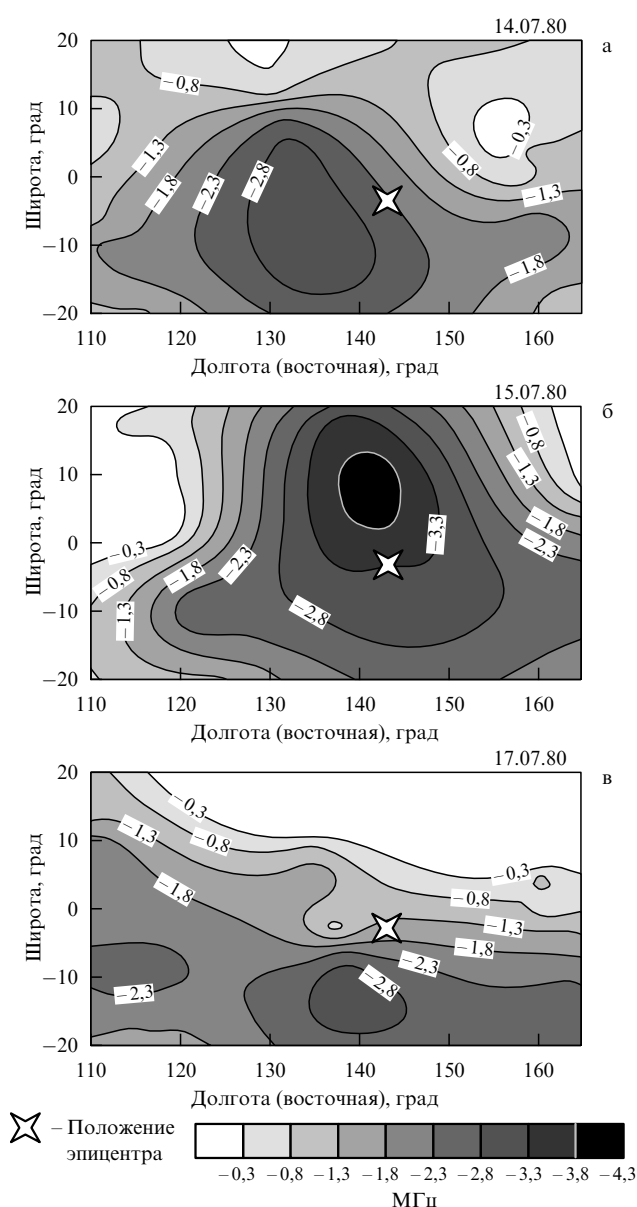


Рис. 5

других задач, не связанных с землетрясениями. Из этого вытекает необходимость в осуществлении экспериментальной космической программы, специально нацеленной на изучение ионосферных предвестников землетрясений. Основные направления работ в рамках этой программы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Должен быть разработан комплекс приборов, позволяющий исследовать специфические физические процессы в ионосфере Земли, которые вызываются или могут вызываться процессами подготовки землетрясений. Эти исследования помогут установить причинно-следственные связи в цепочке развивающихся явлений и пространственно-временные характеристики сейсмогенных возмущений в ионосфере, которые могут быть использованы в системе раннего предупреждения.

2. Программа экспериментов должна предусматривать координацию космических и наземных наблюдений, а также прием данных с автономных "буйковых" станций в сейсмоактивных регионах. Эти данные должны доста-

вляться с помощью спутников в единый центр обработки данных для последующего систематического анализа материалов, поступающих от всех источников.

3. Должна быть разработана серия относительно недорогих микроспутников и субспутников, работающих автономно или в инфраструктуре больших космических аппаратов, которые могли бы выводить субспутники в качестве дополнительной полезной нагрузки. Поскольку уровень сейсмогенных возмущений в ионосфере очень мал, должны быть предусмотрены специальные меры по обеспечению электромагнитной чистоты и электромагнитной совместимости приборов и экспериментов на борту.

3. Обоснование структуры и состава экспериментальной космической системы мониторинга предвестников землетрясений

3.1. Структура системы. Из экспериментальных данных следует, что существует три характерных размера зоны проявления ионосферных признаков подготовки землетрясения, которые могут быть зарегистрированы со спутника:

1) большая зона: $\pm 30^\circ$ относительно очага. *Наблюдаемые эффекты:* модификация высотного профиля электронной концентрации, изменение ионного состава плазмы, появление потоков высыпавшихся высокоэнергетических частиц и импульсных ОНЧ сигналов с аномальной дисперсией в верхней ионосфере. *Характерная особенность:* сейсмогенные возмущения профиля электронной концентрации наблюдаются в секторах местного времени 03–06 LT и 15–18 LT; зондирование ионосферы должно осуществляться с высот 1000 км и более;

2) средняя зона: $\pm 10^\circ$ относительно очага. *Наблюдаемые эффекты:* генерация электромагнитных излучений в КНЧ диапазоне, формирование мелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы, возмущение квазипостоянного электрического поля, генерация геомагнитных пульсаций на частотах ~ 1 Гц и модификация высотного профиля интенсивности гидроксильных эмиссий. *Характерная особенность:* КНЧ излучения, электрические поля и мелкомасштабные неоднородности плазмы сопряжены с эпицентром по магнитным силовым линиям и могут наблюдаться с борта искусственных спутников Земли (ИСЗ) в магнитно сопряженных зонах;

3) малая зона: $\leq 3^\circ$ относительно очага. *Наблюдаемые эффекты:* генерация УНЧ электромагнитных излучений и модификация атмосферных эмиссий с длинами волн 5577 и 6300 Å. *Характерная особенность:* зона УНЧ излучений сопряжена с эпицентром по магнитным силовым линиям.

Заметим, что представленные размеры зон по ряду параметров определены на весьма ограниченном экспериментальном материале и, следовательно, сами являются предметом исследования и уточнения на экспериментальном этапе работ по созданию системы прогнозирования.

Приведенные выше зоны и состав наблюдаемых в них признаков подготовки землетрясения, по существу, определяют структуру экспериментальной спутниковой системы для отработки методов прогнозирования землетрясений. При формировании ее облика будем исходить из следующих критериев:

разделяя земную поверхность равномерно на долготные секторы шириной 60° и 20° в соответствии с раз-

мерами большой и средней зон, потребуем, чтобы внутри каждой из них, по крайней мере, один раз в 1,5–2 ч находился спутник, оснащенный аппаратурой для наблюдения характерных для этих зон сейсмогенных процессов;

высота орбиты и ее наклонение должны обеспечить пребывание спутников в областях, где максимальны интенсивность и вероятность проявления признаков подготовки землетрясения;

измерения локальных параметров полей и плазмы в каждом секторе должны выполняться на парах спутников с идентичной аппаратурой на идентичных орбитах, отличающихся только временем пересечения экватора примерно на четверть периода обращения вокруг Земли, для того чтобы различить пространственные и временные вариации возмущений, исключить случайные сигналы и тем самым уменьшить вероятность ошибки.

В составе системы должна быть обеспечена возможность измерений и анализа сейсмических колебаний, УНЧ/КНЧ/ОНЧ волн, атмосферных эмиссий и других возможных предвестников землетрясений на сети наземных "буйковых" станций, опрашиваемых со спутников, которые осуществляют прямые локальные измерения параметров полей и плазмы; при этом на борт ИСЗ с "буйка" сбрасывается информация в сжатой форме, накопленная за прошедший промежуток времени, и передаются данные измерений в реальном масштабе времени синхронно с бортовыми измерениями.

Кроме измерительных комплексов космического и наземного базирования большую ценность представляет использование высотных дрейфующих и привязных аэростатов, оснащенных аппаратурой для измерения электрических полей и вариаций проводимости, молекулярного состава газа и содержания твердых микрочастиц (аэрозолей) в атмосфере, а также вариаций атмосферных эмиссий в различных диапазонах длин волн. Аэростатная аппаратура должна опрашиваться со спутников нижнего эшелона (см. ниже) в таком же режиме, как наземные "буйковые" комплексы.

Таким образом, представляется оптимальным следующий вариант построения экспериментальной системы, учитывающий практически все известные в настоящее время явления и эффекты, которые рассматриваются как предвестники (или потенциально могут быть рассмотрены как предвестники) землетрясений, проявляющиеся на различных временных интервалах до начала землетрясения:

Верхний спутниковый эшелон в составе четырех спутников на круговых солнечно-синхронных орбитах высотой ~ 1000 км, плоскости которых смещены относительно друг друга на 90°, и одного спутника с эллиптической орбитой (350–3500 км) с наклонением орбиты ~ 83°. На этих спутниках должен осуществляться глобальный контроль трехмерного (широта, долгота, высота) распределения электронной концентрации в ионосфере с использованием бортового ионозонда и аппаратуры транзионосферного зондирования, масс-спектрометрии ионизированной и нейтральной составляющих газа в ионосфере, измерение температуры плазмы, атмосферных эмиссий на высотах F -области ионосферы, пичуглового и энергетического распределений потоков высокоэнергичных частиц и при достаточно высокой электромагнитной совместимости приборов анализ ОНЧ излучений.

Спутник с эллиптической орбитой необходим для исследования высотного распределения ионного состава, получения контрольной информации для селекции ложных сигналов, а также с целью поиска новых предвестников, исследования механизмов их генерации, зависимости от местного времени и высоты.

Нижний спутниковый эшелон в составе девяти пар малых спутников на круговых орбитах высотой ~ 400 км и наклонением 65–83°. Два спутника в паре должны находиться на идентичных орбитах, лежащих в одной плоскости и отличающихся только временем пересечения экватора примерно на четверть периода обращения вокруг Земли. Плоскости орбит девяти пар спутников должны быть равномерно распределены по долготе со смещением относительно друг друга на 40°. На этих спутниках должны осуществляться измерения УНЧ/КНЧ/ОНЧ волн, квазипостоянных электрических полей, плотности плазмы и ее мелкомасштабных флуктуаций, массового состава ионной и нейтральной составляющих ионосферной плазмы, потоков высокоэнергичных частиц, атмосферных эмиссий в различных линиях кислорода и азота в подспутниковых областях и гидроксильных эмиссий при наблюдениях в направлении лимба Земли.

Аэростатный эшелон в составе привязных аэростатов, размещаемых на высотах 6–10 км в наиболее сейсмически опасных зонах, и дрейфующих аэростатов на высотах 30–40 км, запускаемых при благоприятных ветровых условиях в зонах повышенной сейсмической опасности. На аэростатах должны производиться измерения электрических полей и вариаций проводимости, молекулярного состава газа и содержания твердых микрочастиц (аэрозолей) в атмосфере, а также вариаций атмосферных эмиссий в различных диапазонах длин волн. Аэростатная аппаратура должна опрашиваться со спутников нижнего эшелона в таком же режиме, как наземные "буйковые" комплексы.

Наземный эшелон в составе автономных "буйковых" станций, размещаемых в зонах высокой сейсмической опасности в точках, свободных от индустриальных помех в УНЧ/КНЧ/ОНЧ и оптическом диапазонах частот, и базовых геофизических и радиофизических полигонов или обсерваторий. "Буйковые" станции должны оснащаться компактной малопотребляющей аппаратурой для измерений и анализа сейсмических колебаний, геомагнитных пульсаций, УНЧ/КНЧ/ОНЧ волн, атмосферных эмиссий и других возможных предвестников землетрясений, работающей в автономном режиме и не требующей замены источников энергоснабжения чаще одного-двух раз в год. При пролете спутника нижнего эшелона над "буйковой" станцией на борт ИСЗ с "буйка" сбрасывается информация в сжатой форме, накопленная за прошедший промежуток времени, и передаются данные измерений в реальном масштабе времени синхронно с бортовыми измерениями. Базовые геофизические и радиофизические полигоны осуществляют прием телеметрической информации со спутников в режиме сброса данных из бортовой памяти и режиме непосредственной передачи при проведении бортовых измерений в зоне видимости полигона, а также осуществляют непрерывный мониторинг предвестников землетрясений, используя средства вертикального зондирования ионосферы, радиомаяковые измерения, амплитудные и фазовые измере-

ния сигналов СДВ радиостанций на трассах, проходящих через сейсмоопасные регионы, измерения электротеллурических полей и токов, состава атмосферы, другие виды измерений, которые позволяет помеховая обстановка. На полигонах выполняются также регулярные обсерваторские измерения в стандартной конфигурации.

Спутники верхнего и нижнего эшелонов должны работать непрерывно в одном из двух режимов: 1) режиме мониторинга, при котором между сеансами связи осуществляется непрерывная регистрация (с предварительной бортовой обработкой) данных и запись информации в бортовую память, опрашиваемую при пролете в зоне видимости приемной телеметрической станции, или 2) режиме эксперимента, при котором осуществляется непосредственная передача данных на телеметрическую станцию при максимальной скорости опроса измерительных приборов.

Станции приема телеметрической информации и пункты управления комплексами измерительной аппаратуры на спутниках должны более или менее равномерно покрывать земную поверхность, обеспечивая возможность передачи информации с борта и управление режимами работы спутника не реже одного раза в 3 ч. На более поздних этапах развития системы, когда будут отработаны алгоритмы автоматического распознавания признаков готовящегося землетрясения, необходимость в большом количестве наземных станций телеметрии и управления станет менее актуальной. Возможно, в этом случае работа по сбору информации со спутников системы и доставка ее в единый центр обработки и анализа данных будет возложена на один или несколько высокоапогейных спутников.

3.2. Общие требования к спутникам экспериментальной системы. В предыдущем разделе указаны требования к основным параметрам орбит спутников верхнего и нижнего эшелонов и правила построения "космической группировки" для непрерывного контроля всех известных в настоящее время ионосферных предвестников землетрясений. Сформулируем требования к космическим аппаратам (КА) и устанавливаемой на них измерительной аппаратуре:

1) каждый спутник должен иметь собственные системы энергопитания, терморегулирования, пространственной стабилизации и определения параметров ориентации, навигационной привязки, корректировки (поддержания заданных параметров) орбиты, телеметрии и приема команд управления, обеспечивающие нормальное функционирование КА и полезной нагрузки не менее 2 лет;

2) каждый спутник должен удовлетворять требованиям электромагнитной чистоты объекта и электромагнитной совместимости приборов и экспериментов на борту;

3) масса спутника должна лежать в пределах 50–100 кг для того, чтобы обеспечить возможность запуска относительно дешевыми ракетами-носителями, возможность выведения нескольких КА с последующим доведением орбиты (при необходимости) до нужных параметров с помощью корректирующей двигательной установки или выведения в качестве дополнительной полезной нагрузки на других КА для снижения стоимости проекта;

4) скорость передачи телеметрической информации должна быть не менее 2 Мбит с⁻¹, емкость бортового запоминающего устройства — не менее 100 Мбайт;

5) спутник должен быть стабилизирован по трем осям, причем одна ось направлена к центру Земли; точность стабилизации не хуже 10° по каждой оси, точность определения параметров ориентации не хуже 1°;

6) система термостабилизации должна обеспечить температуру на посадочных местах научных приборов в аппаратном отсеке спутника $20 \pm 10^\circ\text{C}$;

7) система энергоснабжения КА должна обеспечить среднесуточное потребление не менее 40 Вт в течение 2 лет;

8) корректирующая двигательная установка должна обеспечивать поддержание заданных параметров орбиты в течение 2 лет;

9) навигационная привязка КА должна осуществляться с точностью не хуже 300 м.

3.3. Требования к составу бортовой научной аппаратуры.

Состав аппаратуры спутников верхнего эшелона:

— ионозонд-спектрометр типа ИС-1000 и аппаратура трансионосферного зондирования для регистрации предвестников землетрясений по вариациям электронной плотности во всей толще ионосферы;

— комплекс для локальных измерений концентрации, ионного и нейтрального состава плазмы, функции распределения тепловых электронов;

— спектрометры заряженных частиц на диапазоны энергий 5 эВ–20 кэВ и 20 кэВ–2 МэВ;

— сканирующий фотометр;

— магнитометр;

— УНЧ/ОНЧ приемники;

— измеритель квазипостоянных электрических полей или измеритель скорости дрейфа плазмы.

Состав аппаратуры спутников нижнего эшелона:

— измеритель трех компонент квазипостоянного электрического поля;

— измеритель параметров тепловой плазмы (включая температуру, плотность, колебания плотности и скорость дрейфа);

— пятикомпонентный УНЧ приемник;

— пятикомпонентные КНЧ и ОНЧ приемники;

— оптический комплекс в составе ТВ камеры и фотометра для наблюдений на лимбе и фотометра, ориентированного в надир;

— масс-спектрометр ионизованной и нейтральной составляющих ионосферной плазмы;

— спектрометр электронов и протонов с энергиями 20 кэВ–2 МэВ;

— магнитометр главного поля;

— система когерентных передатчиков для ионосферной томографии;

— система сбора данных с "буйковых" станций;

— корректирующая двигательная установка для поддержания заданных параметров орбиты КА.

4. Основные разделы программы исследований литосферно-ионосферного взаимодействия и разработки методологии краткосрочного прогноза землетрясений

А. Концепция литосферного механохимического реактора

А.1. Разработка теоретической модели, описывающей процессы накопления механических напряжений,

генерации и размножения микротрещин в упруго неоднородной среде.

А.2. Разработка представлений о механизмах возникновения критического напряжения и его сброса в макроскопическую (гигантскую) трещину со сдвиговым смещением.

А.3. Проведение лабораторного моделирования механохимии горных пород, в том числе, исследования процессов образования и переноса в атмосферу газобразных и аэрозольных фракций в продуктах работы реактора и связанных с ними процессов генерации электромагнитных полей и токов; разработка теории этих процессов.

А.4. Проведение натуральных экспериментов по исследованию химического состава продуктов работы реактора, проведение химического мониторинга в сейсмоактивных зонах для отработки методов химической диагностики и прогнозирования активности очага землетрясений.

А.5. Разработка теоретических моделей генерации излучений в рентгеновском, оптическом и радиочастотном диапазонах в процессе трещинообразования.

Б. Динамика движения продуктов работы механохимического реактора в атмосфере, их перенос в ионосферу и модификация под воздействием космических ионизирующих излучений и грозových разрядов

В. Химико-физическое воздействие продуктов работы реактора на атмосферу и ионосферу.

В.1. Исследования изменений химического состава грунтовых вод, газового состава атмосферы и формирования аэрозольных облаков в области над очагом землетрясения.

В.2. Изучение атмосферной проводимости и атмосферных электрических полей, формирования грозových очагов и стимуляции грозовой активности, роли вертикальных электрических разрядов в транспортировке ионов сейсмогенного происхождения в ионосферу.

В.3. Анализ изменений распределения плотности, температуры и ионного состава плазмы в ионосфере.

Г. Геофизические эффекты работы механохимического реактора на стадиях подготовки землетрясения

Г.1. Изучение основных механизмов формирования крупномасштабных электрических полей и токов, их модуляции различными источниками и генерации электромагнитных излучений в диапазонах частот геомагнитных пульсаций, УНЧ и КНЧ в эпицентральной области.

Г.2. Изучение стимулированных (вторичных) электромагнитных излучений и геомагнитных пульсаций.

Г.3. Исследование стимулированных неоднородностей плазмы в ионосфере.

Г.4. Исследование процессов модификации D-области ионосферы, возмущения характеристик дальних атмосфериков, амплитудных и фазовых характеристик сигналов СДВ и КВ радиостанций в волноводе Земля–ионосфера.

Г.5. Анализ механизмов образования и модификации спорадических слоев в E-области ионосферы.

Г.6. Исследование свечения атмосферы в эпицентральной зоне и ионосферы над очагом землетрясения.

Д. Причинно-следственные связи между наблюдаемыми явлениями и методология прогноза землетрясений

Д.1. Создание феноменологической модели воздействия механохимического реактора на околоземное пространство.

Д.2. Разработка физической модели воздействия механохимического реактора на атмосферу, ионосферу и магнитосферу Земли.

Д.3. Создание физико-химических основ методологии краткосрочного прогнозирования землетрясений с использованием химического, электромагнитного и плазменного мониторинга предвестников землетрясений наземными и космическими средствами.

Список литературы

1. Мигулин В В и др., Препринт № 25 (390) (М.: ИЗМИРАН, 1982) с. 28
2. Gokhberg M B et al. *J. Geophys. Res.* **87** 7824 (1982)
3. Ларкина В И и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **28** 812 (1988)
4. Chmyrev V M et al. *Phys. Earth Planet. Inter.* **57** 110 (1989)
5. Parrot M, Mogilevsky M M *Phys. Earth Planet. Inter.* **57** 86 (1989)
6. Биличенко С В и др. *ДАН* **311** 1077 (1990)
7. Михайлова Г А, Голявин А М, Михайлов Ю М *Геомагнетизм и аэрономия* **31** 80 (1991)
8. Serebryakova O N et al. *Geophys. Res. Lett.* **19** 91 (1992)
9. Molchanov O A et al. *Ann. Geophys.* **11** 431 (1993)
10. Parrot M *J. Geophys. Res.* **99** 23339 (1994)
11. Varotsos P, Alexopoulos K *Tectonophysics*. **110** 73 (1984)
12. Varotsos P, Alexopoulos K *Tectonophysics*. **136** 335 (1987)
13. Fishkova L M et al. *Ann. Geophys.* **3** 679 (1985)
14. Торошелидзе Т И, Фишкова Л М *ДАН* **302** 313 (1988)
15. Гохберг М Б и др. *Изв. АН СССР. Физика Земли* (4) 12 (1988)
16. Fatkullin M N, Zelenova T G, Legenka A D *Phys. Earth Planet. Inter.* **57** 82 (1989)
17. Алимов О А и др. *ДАН* **305** 1335 (1989)
18. Липеровский В А и др. *Изв. АН СССР. Физика Земли* (12) 77 (1990)
19. Pulinets S A, Legenka A D, Alekseev V A, in *Dusty and Dirty Plasmas, Noise and Chaos in Space and in the Laboratory* (New York: Plenum Publ., 1994) p. 545
20. Boskova J et al. *J. Atm. Terr. Phys.* **55** 1595 (1993)
21. Boskova J et al. *Studia Geoph. et Geod.* **38** 213 (1994)
22. Ralchovsky Tz, Komarov L *Bulgarian Geophys. J.* **14** 78 (1988)
23. Липеровский В А, Похотелов О А, Шалимов С А, в кн. *Ионосферные предвестники землетрясений* (М.: Наука, 1992) с. 304
24. Fraser-Smith A C et al. *Geophys. Res. Lett.* **17** 1465 (1990)
25. Копытенко Ю А и др., Препринт № 3 (888) (М.: ИЗМИРАН, 1990) с. 25
26. Hayakawa M, Yoshino T, Morgounov V A *Phys. Earth Planet. Inter.* **77** 97 (1993)
27. Blanc E, Rickel D *Radio Science* **24** 279 (1989)
28. Гохберг М Б и др. *ДАН* **313** 586 (1990)
29. Фукс И М, Шубова Р С *Геомагнетизм и аэрономия* **34** 130 (1994)
30. Mendillo M, Hawkins G S, Klobuchar J J. *Geophys. Res.* **80** 2217 (1975)
31. Гальперин Ю И и др. *Изв. АН СССР. Физика Земли* (11) 88 (1985)
32. Чмырев В М и др. *Космические исследования* **27** 248 (1989)
33. Imhof W L et al. *Geophys. Res. Lett.* **10** 361 (1983)
34. Chmyrev V M et al. *J. Atm. Terr. Phys.* (in press) (1996)
35. Гальперин Ю И и др. *Космические исследования* **30** 89 (1992)
36. Alekseev V A, Alekseeva N G, Jchankuliev J *Radiation Measurements* **25** 637 (1995)