

БОРТОВАЯ АППАРАТУРА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МОНИТОРИНГА ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Г.М. Чернявский, **Б.С. Скребушевский**, В.О. Скрипачев

ФГУП «Центр космических наблюдений»
E-mail: cpi@cpi.space.ru

Приведены результаты анализа теоретических представлений и экспериментальных данных о механизмах возникновения признаков предвестников землетрясений и их проявлений в околоземном космическом пространстве. Приводится классификация основных электромагнитных и электрохимических признаков предвестников. Возникновение аномальных электрических полей в сейсмически активных районах и проникновение их в ионосферу вызывают изменение критической частоты f_2 слоя F_2 ионосферы, а также изменения в слое E. Отмечены усиления интенсивности шумов в ОНЧ/УНЧ-диапазонах, эмиссии химических соединений, высыпания энергичных частиц, появления предвестников в магнитосопреженных областях. На основании проведенного анализа предлагаются рекомендации и требования к рациональному составу комплекса бортовой научной аппаратуры ИСЗ, предназначенных для мониторинга предвестников землетрясений, в том числе с использованием технологии GPS.

Введение

Землетрясения были и остаются наиболее масштабными природными катаклизмами, связанными с массовой гибелью людей и большими разрушениями инфраструктуры. Наиболее известные катастрофические землетрясения: Калифорнийское 1906 г., Ашхабадское 1948 г., Армянское 1988 г., Иранское 1990 г., а также события на Алтае, произошедшие осенью 2003 г. По статистике за год происходит 20 землетрясений с магнитудой $M > 7$, 100–120 потенциально опасных с $M > 5$ и 300 000 малых землетрясений. Поэтому остро стоит вопрос о выделении предвестников землетрясений. Под предвестниками землетрясения будем понимать различные физические явления, наблюдаемые за несколько часов или дней до толчка, например, вариации геофизических полей, аномальное поведение животных и пр., т. е. к предвестникам мы относим явления, которые позволят решить три задачи прогноза: нахождение места, силы и времени сейсмического события. Наземные методы прогнозирования не позволяют определить время землетрясения с приемлемой точностью. Существенное повышение вероятности обнаружения предвестников землетрясения могут обеспечить средства космического базирования. В этом докладе мы приводим классификацию, на наш взгляд, основных признаков предвестников, имеющих отражение в ОКП, и на ее основании предлагаем типы бортовой аппаратуры для их регистрации.

1. Признаки предвестников

Перечислим основные предвестники землетрясений:

- 1.1. Поведение электрических полей и их эффекты.
 - 1.1.1. Ионосферные эффекты в слое E.
 - 1.1.2. Ионосферные эффекты в слое F_2 .
- 1.2. Излучение низких частот.
- 1.3. Деформации земной коры.
- 1.4. Потоки заряженных частиц.

Рассмотрим эти явления более детально.

1.1. Поведение электрических полей и их эффекты

В различных регионах мира с наземных станций было зафиксировано аномальное поведение атмосферного электрического поля. Результаты таких измерений показаны на рис. 1, где видно, что перед землетрясением происходит изменение направленности электрического поля, и его амплитуда достигает почти 1000 В/м. Поле такого порядка может проходить в ионосферу. При проникновении электрических полей в ионосферу возникают три эффекта[1]:

- Изменение концентрации электронов N_e в E-слое, зависящее от направления силы вертикального электрического поля E_z . При положительном направлении E_z (от поверхности Земли) концентрация N_e уменьшается над районом, где наблюдается электрическое поле, и, наоборот, при отрицательном направлении E_z концентрация возрастает.

- Повышение концентрации металлических ионов (медь — Cu^+ , железо — Fe^+ , никель — Ni^+ , цинк — Zn^+ и др.) в ионосферной плазме, близких по массе к молекулярным ионам NO^+ , N_2^+ , O_2^+ E-слоя. Аэрозоли металлов проникают в ионосферу под действием аномального электрического поля, это было экспериментально доказано[1].

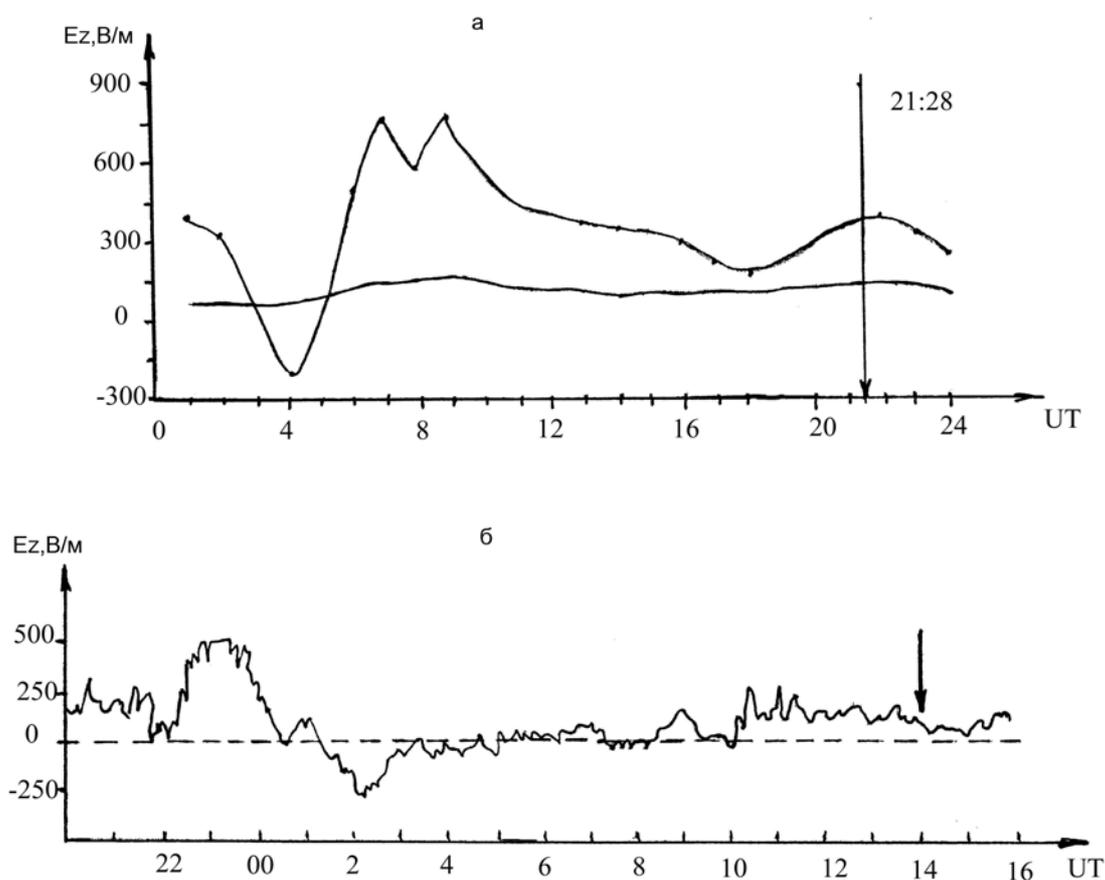


Рис. 1. Экспериментальные измерения атмосферного электрического поля. Примеры измерений аномального атмосферного поля перед сильными землетрясениями: а — измерения в обсерватории Швидер (Польша) перед землетрясением 30.08.1986 г. [2]; б — измерения на Камчатском полуострове в июне 1996 г. перед землетрясением с магнитудой $M = 7$ [3]. Стрелками показаны моменты землетрясений

- Движение плазмы на высотах слоя F_2 вдоль квазикруговых траекторий вокруг геомагнитной силовой линии как результат электродинамического дрейфа, вызванного электростатическим полем. Горизонтальное распределение концентрации ионосферной плазмы N_e может характеризоваться как отрицательным, так и положительным возмущением.

С высотой возмущенный район на плоскости сдвигается к экватору. На нижних высотах F₂-слоя концентрация плазмы с запада и с востока от магнитного меридиана проходит через центр источника электрического поля, увеличиваясь и уменьшаясь, соответственно, пока в верхней части F₂-слоя, на высотах, близких к ионосферному максимуму, ситуация не станет противоположной, т. е. положительное возмущение будет с востока от геомагнитного меридиана, а отрицательное — с запада.

1.1.1. Ионосферные эффекты в слое E

Часто перед землетрясениями наблюдается появление спорадических E-слоев [6] (нерегулярных). Причина появления этих слоев ионосферы: вертикальные электрические поля проходят в ионосферу, где из-за анизотропности электропроводности они преобразуются в горизонтальные электрические поля [7]. Происходит электрический нагрев, при котором температура электронов в E-слое увеличивается, в результате чего в E-слое образуются существенные неоднородности.

Следует отметить, что ионосферная плазма в E-слое в основном состоит из молекулярных ионов NO⁺, N₂⁺, O₂⁺ и небольшого числа ионов металлов. Подтверждено, что процесс образования землетрясения сопровождается инъекцией подземных газов, таких как радон, и аэрозолей металлов в верхнюю атмосферу и ионосферу (слой E) [1, 8]. Эти аэрозоли увеличивают число ионов металлов и усиливают электрическое поле ионосферы.

1.1.2. Ионосферные эффекты в слое F₂

Экспериментально доказано наличие эффектов изменения электрических полей в F-слое ионосферы. При помощи наземных ионосферных станций получены данные об изменении критической частоты f₀F₂ за 5 дней до землетрясения в Абруццо (Италия, 7.05.1984 г. M = 5,8). При обработке данных последовательности из трех землетрясений, произошедших в центральной Италии и на Балканах в мае 1984 г., было отмечено, что до каждого из этих землетрясений изменялась критическая частота f₀F₂, причем эти изменения происходили на долготе, близкой к эпицентрам, и значения частоты менялись в диапазоне ±35 % [7]. Так были найдены две области изменения критической частоты f₀F₂: «положительная» и «отрицательная». Отклонение частоты составило для «отрицательной» области примерно -20 %, для «положительной» — примерно +40 % [1]. Эти две области смещались к югу от эпицентра будущего землетрясения. Такие же структуры были найдены над районами надвигающихся землетрясений зондированием с ИСЗ «Интеркосмос-19», было замечено, что ионосфера над сейсмически опасным районом образовывала купол истощенной плотности, причем эти изменения были хорошо заметны лишь в определенные интервалы времени: до восхода в 4-5 ч LT и в послеполуденные часы 14-18 ч LT [9].

Следует отметить также, что имеет место изменение электронной плотности в F-слое ионосферы. На рис. 2 приведено распределение отклонения электронной плотности от среднего уровня в максимуме F-слоя ионосферы (в терминах критической частоты, МГц), наблюдавшееся на ИСЗ «Интеркосмос-19» с помощью бортового ионозонда. Отрицательные вариации электронной плотности наблюдались за два дня и один день до начала землетрясения 16.07.80 в районе Австралии и островов Новой Гвинеи [9] (рис. 2а — раннее утро за два дня до землетрясения, рис. 2б — за день до землетрясения и рис. 2в — после землетрясения на следующий день).

Аналогичное явление было зафиксировано по данным станции вертикального ионосферного зондирования вблизи Ташкента, значения критической частоты f₀F₂ увеличивались в среднем за 1-2 дня до местных сейсмических событий по сравнению с данными контрольной станции, а затем они уменьшались. Анализ вертикальных профилей электронных концентраций, полученных во время землетрясения в Ташкенте в 1966 г., показал увеличение концентрации плазмы на высотах от 150 до 350 км за 4 ч до землетрясения [10].

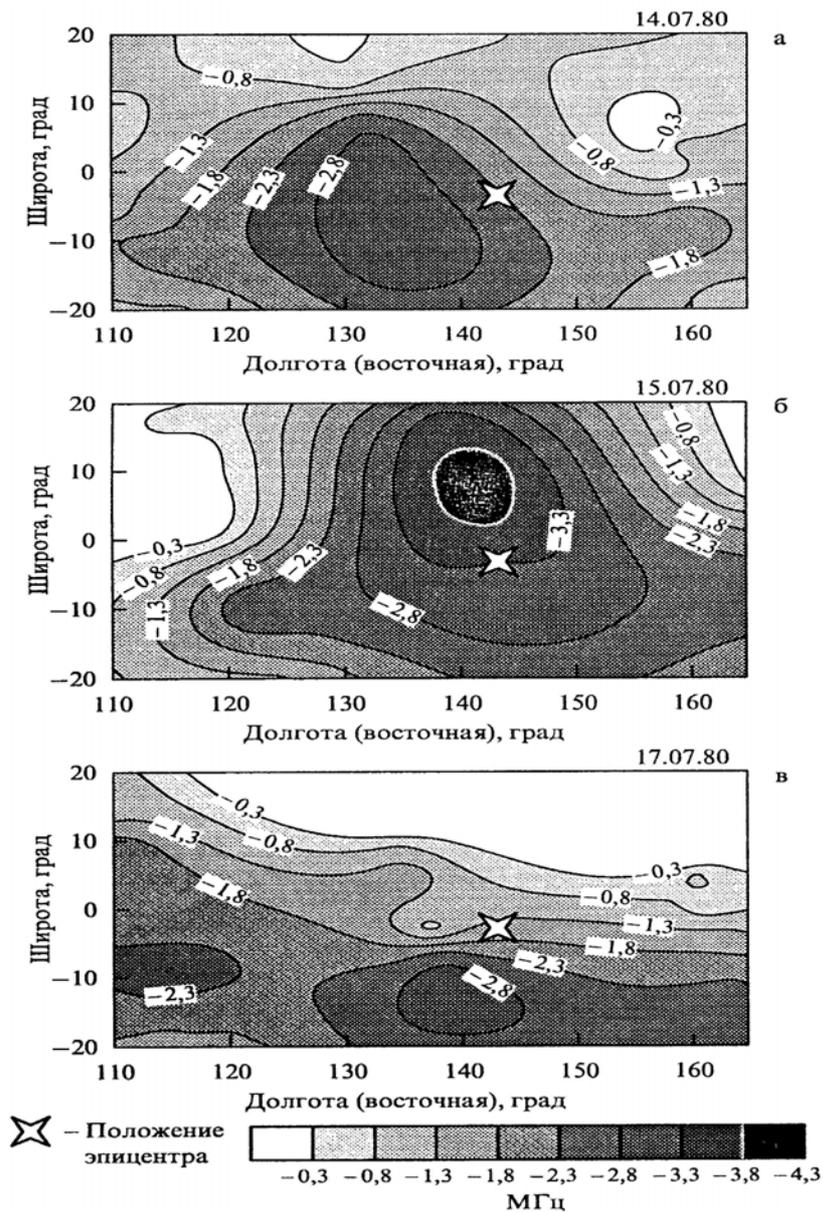


Рис. 2. Распределение отклонения электронной плотности от среднего уровня в максимуме F-слоя ионосферы

Изменения критической частоты f_0F_2 полностью совпадают с вариациями общей электронной концентрации, на основании чего были сделаны следующие заключения [11]:

- наблюдаются как отрицательные, так и положительные вариации общей электронной концентрации над сейсмоактивными областями;
- время упреждения наблюдаемых вариаций момента главного толчка совпадает с таким же параметром для критической частоты;
- знак вариации для данных моментов местного времени совпадает со знаком вариации критической частоты.

Теперь можно выделить главные характеристики этих предвестников:

- Продолжительность обычной ионосферной бури составляет от 8 до 48 ч, а сейсмоионосферные изменения продолжаются 3-4 ч. Они появляются каждый день, примерно за 5 дней до землетрясения в одинаковое время.

- Сейсмоионосферные изменения могут быть отрицательными или положительными и зависят от местного времени, т. е. знак сейсмоионосферных вариаций жестко связан с моментом местного времени (например, в 3–4 ч LT всегда наблюдаются только отрицательные вариации, тогда как в 12–14 ч LT — только положительные [11]). Эти вариации совпадают с вариациями плазмосферных потоков ионосферных ионов, например ионов кислорода O^+ . При этом, когда потоки направлены вниз, то изменения критической частоты положительны, а когда потоки направлены из ионосферы в магнитосферу, то изменения критической частоты отрицательны.

- Сейсмоионосферные изменения — результат перераспределения электронной концентрации в ОКП. Изменяется критическая частота f_0F_2 слоя F_2 , масштаб высоты и общая электронная концентрация над районом приближающегося землетрясения.

- Измененный район ионосферы, как правило, «привязан» к местоположению будущего землетрясения, однако имеются отклонения. Иногда изменения наблюдаются в магнитосопряженной области.

- Состав ионов и нейтральных компонентов связан с изменениями электронной концентрации из-за сейсмической активности. Концентрация NO^+ , O^+ , O_2^+ меняется по фазе и имеет тот же знак. Помимо отмеченного, на высотах около 2000 км растет концентрация H^+ , He^+ , наблюдаемая над районом будущего землетрясения.

Отметим, что существуют данные наземных обсерваторий, которые говорят о том, что за несколько часов до толчка происходило увеличение интенсивности зеленой линии кислорода на $(6 \pm 1,4) \%$ и уменьшение интенсивности красной линии на $(15 \pm 3) \%$. Зеленая линия кислорода находится на длине волны $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, красная линия кислорода — на $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ [26].

1.2. Излучение низких частот

Увеличение шумов на различных частотах в диапазоне 100–500 Гц было зарегистрировано с ИСЗ OGO-6 (1969) над эпицентром землетрясения с $M = 5,4$, за 14 ч до толчка. Аномальное увеличение интенсивности низкочастотных радиоволн (0,1–15 кГц) было зафиксировано с ИСЗ «Интеркосмос-19» [12]. Низкочастотные излучения, зарегистрированные на ИСЗ «Интеркосмос-19», носят в основном электростатический характер, так как амплитуда электрической компоненты намного превышала амплитуду магнитной компоненты. Со спутников GEOS-1 (1977) и GEOS-2 (1978) обнаружено усиление интенсивности излучения в моменты землетрясений. Этот эффект был зафиксирован как магнитной, так и электрической антенной в частотном диапазоне 0,3–10 кГц.

Выделение различных химических веществ: радона, легких газов (гелия и водорода), аэрозолей металлов — приводит к изменению электродинамических свойств атмосферы над районом будущего землетрясения, в результате чего экспериментально были зафиксированы изменения фазы низкочастотных сигналов, трассы распространения которых проходили через этот район [7].

Существует терминаторный метод, который основывается на наблюдениях СДВ-сигналов радионавигационной системы с частотой 10,2 кГц на короткой трассе (~1000 км). Было замечено, что перед землетрясениями с $M > 6$ в переходные часы (линия терминатора) суток происходит смещение моментов возникновения интерференционных минимумов: при закате — в более поздние часы, а при восходе — в более ранние. Этот эффект был найден для 80 % анализируемых землетрясений [13, 14].

По результатам анализа были сделаны выводы:

- этот эффект выглядит как затухающие колебания с периодом 5–10 дней, которые инициируются за несколько дней до сильного землетрясения и проходят через несколько дней или недель после него;

- в основном эффект имеет место при поверхностных землетрясениях (глубина < 100 км).

Такое поведение сигналов, вероятно, связано с понижением высоты нижней границы ионосферы на несколько километров. Отметим, что такой эффект не наблюдался даже для сильных землетрясений с $M > 7$, эпицентры которых были расположены вне первой зоны Френеля.

1.3. Деформации земной коры

Предвестниками землетрясений с $M = 6$ являются форшоки (слабые толчки), которые наблюдаются за 1,6 дня, и деформации земной коры (наблюдаются за 16,6 дней). Если разместить наземные компоненты системы GPS в сейсмически опасных районах, то по их координатам можно будет судить о сдвигах земной коры.

Опыта применения системы GPS в США и Японии показывает, что при изучении движения земной коры в региональных масштабах достижима точность определения относительного положения пунктов на расстояниях в несколько сотен километров порядка нескольких миллиметров практически в реальном масштабе времени.

В России подобный эксперимент проводился в 1995 г. в районе Пятигорска. Были измерены длины хорд между пунктами созданной геодеформационной сети. Те же хорды измерялись накануне землетрясения в ночь на 21.12.1995 г. и было зафиксировано, что изменение длин хорд достигало нескольких сантиметров, например, длина одной «эталонной» хорды составляла 50556,9680 м, а перед землетрясением ее длина составила 50557,050 м, следовательно, величина отклонения 0,082 м или 82 мм [15].

Можно выделить еще одну особенность, которая является следствием деформаций земной коры,— изменение излучательной способности. Излучательная способность пород по сравнению с излучательной способностью абсолютно черного тела изменяется в пределах от 0 до 1. Вследствие механических напряжений при форшоках изменяется плотность пород и, следовательно, их излучательная способность. Это приводит к тому, что мощность излучения земной поверхности над эпицентром больше мощности излучения фона при той же температуре. Также отметим, что изменяется и поляризация электромагнитного поля собственного излучения поверхности. Поскольку оси сжатия очага приурочены к характерным разломам в земной коре, то поле напряжений участков поверхности является разнонаправленным. В основном линейная поляризация собственного излучения приурочена к участкам поверхности, расположенным по направлениям осей сжатия. Поскольку участки подстилающей поверхности ориентированы под различными углами относительно поляризации облучателей антенн бортового сканирующего устройства, амплитуды сигналов в поляризационных каналах будут флуктуировать, а за пределами области будущего землетрясения амплитуды сигналов в этих каналах будут примерно равны между собой. Таким образом, поляризационный признак собственного излучения может быть выделен, если регистрировать собственное излучение по двум взаимно-ортогональным по поляризации каналам [15].

1.4. Поток заряженных частиц

В последнее время появились работы, которые указывают на корреляцию вариаций потоков частиц (электронов и протонов), захваченных геомагнитным полем, с сейсмической активностью. Пространственно-временной анализ параметров резких возрастаний потока частиц перед землетрясением показал, что эта особенность в распределении формируется явлениями, опережающими на ~2,5 ч момент основного толчка. Так, с ИСЗ «Ореол-3» (1981 г., высота 400–2000 км) было зафиксировано аномальное высыпание электронов и протонов с энергией $E > 100$ кэВ [17].

Для детального изучения эффекта высыпания обработаны месячные данные ИСЗ «Метеор-3», выполнен их корреляционный анализ и выделены сейсмогенные вариации [18]. Обнаружена пространственно-временная корреляция сильных литосферных землетрясений и вариаций потока энергичных частиц внутреннего радиационного пояса [19, 20].

2. Явления в магнитосопряженных областях

Было замечено, что некоторые явления отмечаются не только над районом надвигающегося землетрясения, но и в магнитосопряженной с ним области. Об этом говорят данные, полученные с ИСЗ «Интеркосмос-18» и «Алуэтт», эти данные были проанализированы, и предвестники землетрясений были найдены в магнитосопряженных областях ионосферы. Они проявлялись в эмиссиях ОНЧ-излучения и в значениях критической частоты слоя F_2 [16].

С ИСЗ «Интеркосмос-Болгария-1300» были зафиксированы изменения горизонтальных компонент магнитного поля B_x и B_y в диапазоне частот 0,1–8 Гц и вертикальная компонента квазистатического электрического поля E_z , за 15 мин до землетрясения, произошедшего 21.01.1982 г. Географические координаты эпицентра землетрясения: 3,39° с.ш., 177,43° в.д., глубина 33 км, $M = 4,8$ [21]. По результатам было видно, что вертикальное квазистатическое электрическое поле наблюдалось в двух зонах: в 17:38 UT над эпицентром землетрясения и в магнитосопряженной зоне в 17:35 UT. Ширина этих зон составляла 1-1,5° по широте. Амплитуда наблюдавшихся геомагнитных пульсаций на частоте около 1 Гц была 3 нТ.

3. Обсуждение результатов

В проведенном анализе мы выделили основные типы предвестников по результатам экспериментальных данных. Анализировались данные как российских ИСЗ, так и зарубежных ИСЗ, а также данные, полученные с наземных станций.

Основные виды явлений, время их обнаружения до землетрясений и магнитуды землетрясений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сводная таблица предвестников

Предвестник	Время до землетрясения	Магнитуда землетрясения
Электрические поля	От 10 ч до 2-3 дней	$M > 4,5$
Низкочастотное излучение	От 8 ч до 10 дней	$M > 5$
Деформации земной коры	16,6 дней	$M = 6$
Потоки заряженных частиц	2,5 ч	$M > 3$

На основании проведенного анализа можно сделать два вывода:

- ни один из рассматриваемых нами эффектов не может гарантировать 100 % вероятность обнаружения надвигающегося землетрясения, поэтому необходимо обнаружение нескольких явлений одновременно;
- при наблюдении предвестник проявляется тем ярче, чем ближе расположена аппаратура наблюдения к эпицентру землетрясения.

4. Рекомендации и требования к бортовой аппаратуре

При рассмотрении космической бортовой аппаратуры, предназначенной для обнаружения предвестников землетрясений, выдвигается ряд основных требований:

- приборы должны обладать максимальной эффективностью;

- необходимо учитывать габаритно-массовые характеристики той или иной аппаратуры и ее электромагнитную совместимость;
- приборы должны быть разработаны с учетом требований по механическим, тепловым, электрическим и другим характеристикам, предъявляемых к аппаратуре, устанавливаемой на космических аппаратах.

Рассмотрим основные типы научной аппаратуры, которые можно применять для обнаружения предвестников землетрясений.

1. **Ионозонд.** Одним из эффективных средств научной аппаратуры для решения задачи обнаружения предвестников является ионозонд. Он проводит импульсное зондирование ионосферы, выдавая оперативную информацию о ее состоянии, включая значение критической частоты f_0F_2 слоя F_2 ионосферы, электронной концентрации. Прибор такого класса — ИС-338 был установлен на борту ИСЗ «Интеркосмос-19», «Космос-1809». Ионозонд ИС-338 мог оперировать 338 фиксированными частотами в диапазоне 0,3–15,95 МГц. Следует подчеркнуть, что ионозонд был успешно применен на ОКС «Мир», где радиозондирование проводилось с малых высот (~400 км). Прибор такого класса собираются использовать на ИСЗ французского проекта DEMETER, предназначенном для обнаружения предвестников землетрясений.

2. **Детекторы заряженных частиц.** Поскольку перед землетрясениями наблюдается возрастание потоков заряженных частиц, то необходима аппаратура, способная регистрировать протоны и электроны в диапазонах 20 кэВ – 2 МэВ. Такие разнообразные приборы широко используются. Например, спектрометр МЭП-1 предназначен для исследования потоков энергичных заряженных частиц при проведении космических экспериментов [10]. В ряде спутниковых экспериментов успешно работали различные спектрометры, например, спектрометр СПЕ-1 на низкоорбитальном спутнике «Интеркосмос-24» («Активный»), спектрометры ДОК на высоко-апогейных спутниках типа «Прогноз». На борту спутника «Ореол-3» были установлены два детектора для регистрации энергичных частиц (электронов с энергиями > 40 кэВ и протонов с энергиями > 0,5 МэВ). На борту ИСЗ «Метеор-3М» установлен МСГИ-5ЕИ, который предназначен для измерения дифференциальных спектров как электронной, так и ионной (протонной) компонент геоактивных корпускулярных излучений. Дальнейшим развитием этого прибора является многоканальный спектрометр МСГИ-8В, разработанный в ЦКН. МСГИ-8В способен проводить измерения дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов в интервале энергий 0,05–20 кэВ, плотности потока электронов радиационного пояса Земли с отстройкой от фона протонов в энергетических интервалах 2,5–4,0–6,0 и > 6,0 МэВ, плотности потока протонов радиационного пояса Земли и солнечных вспышек с отстройкой от фона электронов в энергетических интервалах 15,0–25,0–45,0–100,0–300,0; > 300,0 МэВ.

3. **Радиопередатчики.** Приборы такого класса необходимы для радиотомографии ионосферы. Такие передатчики могут работать, например, на частотах 150 и 400 МГц или 1,575 и 1,227 ГГц (спутники GPS) [16]. Метод радиотомографии дает возможность получать почти мгновенный разрез плотности ионосферы по горизонтали и вертикали на масштабах в тысячи километров. Построение разреза плотности электронной концентрации происходит вдоль траектории низколетящего спутника при непрерывной регистрации радиосигнала, посланного с борта спутника, приемными антеннами, расположенными на поверхности Земли [22].

4. **Магнитометры.** Для измерений напряженности геомагнитного поля и его мелко-масштабных вариаций целесообразно применить трехкомпонентный феррозондовый магнитометр. По результатам нашего анализа можно заключить, что магнитометр должен работать в широком динамическом диапазоне. Так, на борту ИСЗ «Интеркосмос-19» был установлен магнитометр СМ-8М с динамическим диапазоном измерений $\pm 55\ 000$ нТ, на

МКА «Компасс» был установлен магнитометр ФМ-3К, который мог измерить три компоненты магнитного поля в пределах до 64 000 нТ [24]. Отметим, что во избежание наводок магнитным полем самого КА магнитометры выносятся на штангах за пределы корпуса КА. Это не всегда возможно с учетом конструкции КА.

5. Волновые комплексы для работы в низкочастотном диапазоне. Для регистрации аномалий в УНЧ/ОНЧ-излучении необходимы приборы, которые позволят проводить исследования непрерывных шумовых сигналов, появляющихся в ионосфере перед землетрясением. На наш взгляд, для оценки изменений, происходящих в свойствах сигналов, лучше использовать прибор, работающий в диапазоне от 10 Гц до 20 кГц, поскольку большинство имеющихся экспериментальных данных было получено именно в этом частотном диапазоне. Для измерения спектра электрической и магнитной компоненты электромагнитного низкочастотного излучения в диапазоне 8–20 000 Гц на МКА «Компасс» был установлен прибор анализатор НЧ-волн НВК-ОНЧ. На ИСЗ «Интеркосмос-24» также был установлен ОНЧ-волновой комплекс, позволявший регистрировать три магнитные и две электрические компоненты поля, в котором в качестве электрических датчиков использовался двойной зонд с расстоянием между сферами 2,5 м. Сигналы с этих датчиков поступали на вход приемного устройства с полосой пропускания 8 Гц – 22 кГц [23].

6. Радиометры. Изменение мощности излучения и изменения амплитуд сигналов по поляризации, исходящих от подстилающей поверхности, могут быть зафиксированы радиометрами. При этом радиометр должен иметь два взаимно перпендикулярных по поляризации канала приема и обеспечивать регистрацию попиксельных отношений амплитуд сигналов в этих каналах. Собственное излучение элементов ландшафта в ИК-диапазоне определяется, в основном, температурой приповерхностного слоя. Это излучение экранирует излучение нижележащих слоев. Поэтому для повышения достоверности обнаружения землетрясений следует регистрировать излучение, прошедшее некоторую толщу грунта, в которой наблюдаются аномальные явления. Таким образом, для регистрации такого рода явлений применимы СВЧ-радиометры, например, СВЧ-радиометры типа «Дельта», которые осуществляют прием СВЧ-излучения с вертикальной и горизонтальной поляризацией [15]; сканирующий радиометр «Дельта-2Д», который осуществляет коническое сканирование под углом 40° в спектральных диапазонах 0,8; 1,35; 2,2; 4,3 см с пространственным разрешением 20–100 км и полосой обзора 1100 м.

7. Масс-спектрометры. Приборы типа масс-спектрометров позволяют с борта ИСЗ проводить измерения ионизированной и нейтральной составляющих ионосферной плазмы. Напомним, что масс-спектрометры — приборы для разделения ионизированных частиц вещества (молекул, атомов) по их массам, основанные на воздействии магнитных и электрических полей на пучки ионов, летящих в вакууме; регистрация ионов осуществляется электрическими методами. Такие приборы успешно применялись в различных экспериментах, например, радиочастотный масс-спектрометр, установленный на ИСЗ «Интеркосмос-24» регистрировал относительное содержание концентраций ионов основных компонент ионосферной плазмы в диапазоне масс 1–65 а.е.м. с разрешением 10–15 (на уровне 10 % высоты пика). Пространственное разрешение между измерениями одноименной массы составляло 50 км. При этом пространственная зона определения эффективной массы не превышала 8 км. Масс-спектрометры, установленные на зондах Galileo (США) и Cassini (США), имеют массу от 9 до 12 кг и потребляют мощность около 25 Вт. Сейчас на МКС «Альфа» работает масс-спектрометр, масса которого вместе с необходимым ему оборудованием составляет 2,3 кг.

В табл. 2 приведены примерные данные о габаритно-массовых характеристиках, энергопотреблении и некоторые конструктивные особенности типов приборов, рассмотренных выше.

Таблица 2. Примерные данные о приборах, приведенных классов

Тип приборов	Масса, кг	Энергопотребление, Вт	Особенности конструкции
Ионозонды	$\approx 10\text{--}20$	$\approx 5\text{--}30$	Наличие крупногабаритных антенн (до 50 м)
Радиопередатчики	≈ 1	$\approx 0,5$	Наличие антенн ≈ 2 м
Магнитометры	≈ 1	≈ 2	Выносная штанга 2–4 м
Волновые низкочастотные комплексы	≥ 20	≥ 40	
Детекторы заряженных частиц	≥ 6	≥ 6	
Радиометры	≥ 20	≥ 40	
Масс-спектрометры	$\geq 2,3$	≈ 10	

5. Перспективные методы и разработки для обнаружения предвестников землетрясений

Отметим, что при использовании GPS возможен другой подход к исследованию возмущений ионосферной плазмы, связанных с землетрясениями, в основу которого положен метод радиотомографии, заключающийся в том, что передаваемые с ИСЗ сигналы распространяются через ионосферу, подвергаясь изменениям, зависящим от свойств ионосферы. По этим изменениям можно судить об общем содержании электронов [16], таким образом, можно построить разрез плотности электронной концентрации вдоль траектории спутника при непрерывной регистрации радиосигнала, посланного с борта спутника, приемными антеннами, расположенными на поверхности Земли [22]. Для построения разреза электронной плотности на больших высотах (более 400 км) можно использовать спутники GPS и МКС «Альфа». Сигналы, передаваемые со спутников GPS, будут приниматься на борту МКС «Альфа». В этом случае движение передатчиков замещается относительно быстрым движением приемника, и, как следствие, будет достигнут эффект «остановки» ионосферы во время измерений. Этот вопрос подробно изложен в работе [16].

Другая разработка заключается в использовании электростатических устройств. Для выделения ионосферных аномалий над районом будущего землетрясения используются как наземные станции ионосферного зондирования, так и космические системы зондирования. Однако, на больших дальностях зондирования $\sim 200\text{--}300$ км, они имеют невысокое пространственное разрешение. Для решения задачи пространственного разрешения аномалий ионосферы необходимо устанавливать измеритель на КА с орбитой, совпадающей по высоте с одним из слоев ионосферы, например, слой F, и в качестве первичного датчика-измерителя электронной плотности использовать корпус КА, выполненный в виде сферического конденсатора. При движении КА конденсатор будет заряжаться. Напряжение конденсатора должно синфазно изменяться при изменении электронной плотности ионосферы, это будет зависеть от быстродействия датчика-преобразователя [15]. Поскольку такой КА является низкоорбитальным, то для его вывода на орбиту можно использовать относительно недорогой ракетоноситель. С учетом особенности конструкции корпуса (сферический корпус) данный ИСЗ должен быть небольшим по габаритным размерам, что позволит выводить несколько таких спутников на одном ракетоносителе. Это существенно удешевит исследования и повысит достоверность наблюдаемых явлений.

Заключение

На основе анализа наблюдаемых экспериментальных явлений мы попытались дать рекомендации к составу комплекса бортовой научной аппаратуры ИСЗ, предназначенного

для мониторинга сейсмической активности. Рассмотрены новые возможности применения технологии GPS и электростатических анализаторов для обнаружения предвестников. Наши рекомендации не ограничивают использование других типов аппаратуры, но для их применения необходимо обоснование.

Литература

1. *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M.* Quasielectrostatic Model of Atmosphere-Thermosphere-Ionosphere Coupling // *Advances Space Research*. 2000. V. 26. N 8. P. 1209–1218.
2. *Nikiforova N.N., Michnowski S.* Atmospheric electric field anomalies analysis during great Carpatian Earthquakes at Polish Observatory Swider // *Abstr. IUGG XXI General Assembly*, Boulder, Colorado, VA11D-16, 1995.
3. *Vershinin E.F., Buzevich A.V., Yumoto K., Saita K., Tanaka Y.* Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* / Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1999. P. 513–517.
4. *Ondoh N.* Seismo-ionospheric phenomena // 32nd Scientific Assembly of COSPAR, 12-19 July, 1998, Nagoya, Japan. *Abstr.* P. 159.
5. *Pulinets S.A., Liu J.Y.* Ionospheric Precursor of Strong Earthquakes and Possible System for Their Global Monitoring // *Western Pacific Geophysics Meeting, AGU, Suppl. EOS Trans.* 1998. V. 79. N 24. P. W-104.
6. *Tadanori Ondoh* Seismo-ionospheric phenomena // *Advances Space Research*. 2000. V. 26. N 8.
7. *Pulinets S.A. et al.* Seismic activity as a source of the ionospheric variability // *Advances Space Research*. 1998. V. 22. N 6. P. 903–906.
8. *Pulinets S.A., Alekseev V.A., Legen'ka A.D., Hegai V.V.* Radon and Metallic Aerosols Emanation Before Strong Earthquakes and Their Role in Atmosphere and Ionosphere Modification // *Advances Space Research*. 1997. V. 20. N 11. P. 2173.
9. *Pulinets S.A.* Strong Earthquakes Prediction Possibility with the Help of Topside Sounding From Satellites // *Advances Space Research*. 1998. V. 21. N 3. P. 455.
10. *Гохберг М.Б., Гуфельд И.П., Добровольский И.П. и др.* Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1982. 68 с.
11. *Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И.* Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени // *Геомагнетизм и аэрономия*. М.: Наука, 1998. Т. 38. № 3. С. 178.
12. *Parrot M.* Use of satellites to detect seismo-electromagnetic effects // *Advances Space Research*. 1995. V. 15. P. 11.
13. *Hayakawa M., Molchanov O.A.* Effect of earthquakes on lower ionosphere as found by subionospheric VLF propagation // *Advances Space Research*. 2000. V. 26. N 8. P. 1273–1276.
14. *Molchanov O.A., Hayakawa M.* Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // *J. Geophysics Research*. 1998. V. 103. N A8. P. 17489–17504.
15. *Давыдов В.Ф.* Землетрясения. Телеметрия предвестников: Монография. М.: МГУЛ, 2001. 73с.
16. *Ruzhin Yu.Ya., Shagimuratov I.I., Kunitsyn V.E., Depueva A.Kh., Razinkov O.G.* GPS-based tomographic reconstruction of the ionosphere // *Advances Space Research*. 1998. V. 21. N 3. P. 521.
17. *Воронов С.А., Гальпер А.М., Колдашев С.В. и др.* Возрастания потоков заряженных частиц высоких энергий в области БМА и сейсмичность Земли // *Космич. исслед.* 1990. Т. 28. № 5. С. 789–791.

18. Гинзбург Е.А., Малышев А.Б., Прошкина И.П., Пустоветов В.П. Корреляция сильных землетрясений с вариациями потока частиц радиационного пояса // Геомагнетизм и аэронаука. 1994. Т. 34. № 3. С. 60–66.
19. Алешина М.Е., Воронов С.А., Гальпер А.М. и др. О взаимосвязи положений очагов землетрясений и областей выпадения высокоэнергичных частиц из радиационного пояса // Космич. исслед. 1992. Т. 30. Вып. 1. С. 79.
20. Пустоветов В.П., Гинзбург Е.В., Малышев А.Б., Прошкина И.П. О вариациях потока высокоэнергичных частиц во внутреннем радиационном поясе // Космич. исслед. 1993. Т. 31. Вып. 3. С. 123.
21. Бучаченко А.Л., Ораевский В.Н., Похотелов О.А., Сорокин В.Н., Страхов В.Н., Чмырев В.М. Ионосферные предвестники землетрясений // УФН. 1996. Т. 166. № 9. С. 1053–1059.
22. Андреева Е.С., Гохберг М.Б., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Худукон Б.З., Шалимов С.Л. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 1. С. 13–17.
23. Михайлов Ю.М., Еришова В.А., Ростэ О.З., Шульчишин Ю.А., Шмилауер Я., Капустина О.В., Кочнев В.А. Низкочастотные волновые и масс-спектрометрические измерения на спутнике «Интеркосмос-24» // Геомагнетизм и аэронаука. 1994. Т. 34. № 2.
24. Новости космонавтики. 2002. № 2. С. 27.
25. Fishkova L.M., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A. Relationship between night airglow and seismic activity // Annals Geophysical. 1985. V. 3. N 6.