

УДК 551.510.535:550.388.2

## Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений

В. В. Гримальский<sup>1</sup>, В. Н. Ивченко<sup>2</sup>, Г. В. Лизунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований НАНУ—НКАУ, Київ

<sup>2</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

Надійшла до редакції 25.07.00

---

Подається огляд супутникових спостережень сейсмогенних явищ в іоносфері. На основі наявних даних побудовано гіпотетичні портрети цих явищ. Проаналізовано основи, на яких «аномальні» збурення іоносферних параметрів розглядаються як провісники землетрусів.

---

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Гипотеза о том, что некоторые ионосферные явления возникают под действием сейсмической активности Земли, давно обсуждается в литературе. Эта гипотеза не является общепризнанной. Ее экспериментальная проверка затруднена тем, что не известны признаки, позволяющие отделить сейсмогенные возмущения ионосферы от возмущений несейсмической природы. Анализируя данные, мы можем только предполагать, что между некоторыми ионосферными и сейсмическими событиями была связь, но ни в одном из описанных в литературе случаев, по-видимому, не можем этого доказать. На сегодняшний день ситуация такова: с одной стороны, имеется множество спутниковых и наземных наблюдений, свидетельствующих о том, что подготовка землетрясений вызывает определенные эффекты в ионосфере. С другой стороны, количество и качество наблюдений недостаточны для того, чтобы статистически верифицировать даже основные характеристики «ионосферных предвестников землетрясений».

К сейсмогенным явлениям в ионосфере относят весьма широкий круг явлений, часть которых регистрируется космическими аппаратами *in situ*, а часть дистанционно наблюдается с поверхности Земли (методами вертикального зондирования и радиопросвечивания ионосферы, регистрации сдви-

га фазы на радиотрассах сверхдлинных волн, при оптических наблюдениях свечения ночного неба и т. д.). При этом явления, регистрируемые методами наземных и спутниковых измерений, различаются между собой. С поверхности Земли наблюдаются эффекты, свидетельствующие о генерации плазменных неоднородностей в нижней и средней ионосфере (слоях D, E, F<sub>1</sub>). На характерных для спутниковых орбит высотах — в слое F<sub>2</sub> ионосферы и магнитосфере — такие неоднородности не возникают. Вместо них спутники регистрируют электромагнитные эмиссии и потоки энергичных частиц, которые не могут наблюдаться с поверхности Земли. Поэтому данные об ионосферных предвестниках землетрясений в настоящее время образуют две разнородные группы: данные спутниковых и данные дистанционных наземных измерений. Настоящая работа посвящена обзору спутниковых данных.

Впервые корреляция электромагнитных эмиссий ионосферы с землетрясениями была обнаружена при анализе данных спутника «Интеркосмос-19», зарегистрировавшего аномальные всплески КНЧ- и ОНЧ-волн. По спектральному составу эти всплески напоминали авроральные и магнитосферные шипения, но наблюдались в таких областях среднеширотной ионосферы, куда ни те, ни другие проникать не должны, и где шипения не генерируются локально (при имевшей место спокойной гелиофизической обстановке). В работах [4, 6] было пока-

зано, что обнаруженные излучения коррелировали с сейсмической активностью: во-первых, эмиссии наблюдались на  $L$ -оболочках, пересекающих эпицентры соответствующих землетрясений, а во-вторых, возникали за несколько часов (иногда за сутки) до главного толчка, продолжаясь примерно столько же после. Эти два соответствия — времени и места — и явились основанием для предположения [4, 6] о сейсмогенном происхождении наблюдавшихся шипений.

В дальнейшем различными научными группами был проведен ретроспективный анализ наблюдений целого ряда ионосферных и магнитосферных спутников, в результате которого были обнаружены многочисленные корреляции между ионосферными и сейсмическими событиями (см. работы [7, 15, 16, 23, 27] и библиографию в них). Однако интерпретация этих наблюдений столкнулась с целым рядом трудностей. Прежде всего, все данные о сейсмогенных эффектах в ионосфере были получены спутниками как дополнительные результаты экспериментов, нацеленных на исследование иных явлений, в основном эффектов солнечно-земных связей. Последние наиболее заметны в авроральных областях магнитосферы, где на их фоне сравнительно слабые сейсмогенные возмущения практически неразличимы. В средних и низких широтах солнечная активность слабее маскирует сейсмические воздействия, но здесь научная аппаратура спутников включалась лишь эпизодически. Кроме того, чувствительность приборов, настроенных на работу в авроральной ионосфере, недостаточна для регистрации фоновых событий в среднеширотной ионосфере. В результате спутник с работающим комплексом научной аппаратуры сравнительно редко мог регистрировать сейсмоэффекты над эпицентральной зоной землетрясения.

Следующее затруднение связано с селекцией ионосферных предвестников землетрясений на фоне возмущений несейсмической природы, о чем было сказано выше. Обсуждаемые авторами совпадения ионосферных и сейсмических событий во времени и пространстве могут происходить случайно; чтобы убедиться в наличии здесь причинно-следственной связи, необходим большой наблюдательный материал, который еще не накоплен.

По-видимому, все, кто занимается изучением литосферно-ионосферного взаимодействия, соглашаются в том, что существенный прогресс в этой области невозможен без новых экспериментов. В настоящее время разрабатывается сразу несколько спутниковых проектов, которые позволят исследовать отклик ионосферы на процессы «внизу» — в нижней атмосфере, на поверхности Земли, в лито-

сфере. На финальной стадии подготовки находятся французский микроспутниковый проект DEMETER (с ориентировочной датой запуска в 2001—2002 гг.), украинский «Вариант» (в 2002 г.) и американский TIMED (май 2000 г.). Еще целый ряд проектов находится на стадии предварительной проработки: украинский «Попередження», российский «Предвестник». Данный обзор написан в связи с подготовкой проектов «Вариант» и «Попередження» и имеет целью проанализировать круг явлений, которые предполагается исследовать в этих проектах.

В работе будут рассмотрены основные типы аномальных возмущений ионосферы, относимые к сейсмогенным, и построен ожидаемый «портрет» ионосферного предвестника землетрясения при его наблюдении с борта спутника (раздел 2). В этой части мы не подвергаем сомнению само существование обсуждаемых ионосферных возмущений; спорной является гипотеза об их сейсмогенном происхождении. Вопросам, связанным с верификацией данной гипотезы, посвящен раздел 3.

## 2. ГИПОТЕТИЧЕСКИЕ ПОРТРЕТЫ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

На основе представленных в литературе данных попробуем составить «обобщенный образ» ионосферного предвестника землетрясения. Будем исходить из оптимистической точки зрения, состоящей в том, что ионосферные предвестники землетрясений существуют, что они возникают в результате закономерного процесса литосферно-ионосферного взаимодействия и что спутниками были измерены некоторые, возможно разрозненные, характеристики этого процесса. Следуя [7], выделим следующие типы сейсмогенных эффектов, регистрируемых спутниками: (i) вистлерные пояса — электромагнитные и квазиэлектростатические УНЧ-ОНЧ-шипения, заполняющие вытянутые вдоль геомагнитных  $L$ -оболочек области ионосферы и магнитосферы, (ii) МГД-колебания сегмента  $L$ -оболочки, опирающегося на эпицентр землетрясения, (iii) крупномасштабные неоднородности ионосферной плазмы, (iv) вариации потоков энергичных частиц, высыпающихся в ионосферу из радиационных поясов. Все эти эффекты были обнаружены ретроспективно. Эффекты возникали за несколько часов (иногда за несколько суток) до главного толчка, нарастали с его приближением и длились примерно столько же после окончания землетрясения.

**(i) Вистлерные пояса.** Излучение данного типа охватывает обширные сектора  $L$ -оболочек, прохо-

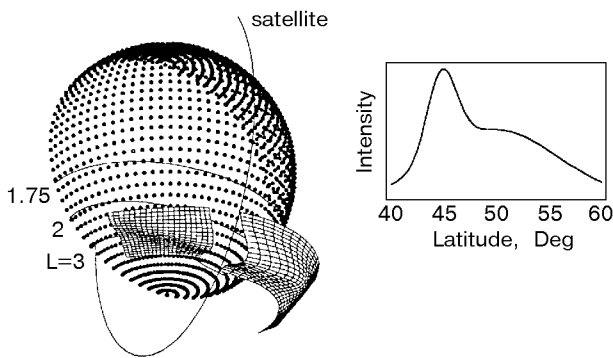


Рис. 1. Предполагаемая структура вистлерного пояса Слева — распределение интенсивности КНЧ-ОНЧ-волн в горизонтальном сечении вистлерного пояса (интенсивность излучения пропорциональна высоте рельефа). На поверхности глобуса показаны геомагнитные параллели, соответствующие значениям параметра  $L = 1.75, 2, 3$ . Справа — интенсивность эмиссии вдоль траектории спутника

дящих через эпицентр землетрясения. По геомагнитной широте излучение локализовано в сравнительно узком диапазоне углов  $\delta\Phi \approx 5...20^\circ$ , но по геомагнитной долготе простирается вплоть до  $\delta\Lambda \approx 100^\circ$ . Предполагаемый образ вистлерного пояса показан на рис. 1 (по данным [7]). Представление о его пространственной структуре возникает благодаря тому, что орбита спутника с каждым новым витком смещается на запад и таким образом сканирует область, занятую излучением, в долготном направлении. На высотах 600...1000 км протяженность вистлерных поясов составляет порядка тысячи километров по широте и пять-десять тысяч километров по долготу. Вертикальное распределение излучения не может быть восстановлено по измерениям на одном спутнике, но тот факт, что вистлерные пояса часто наблюдались попарно на противоположных концах силовых линий геомагнитного поля, свидетельствует, что излучение распространяется вдоль  $L$ -оболочек через магнитосферу вплоть до магнитоспряженной ионосферы.

Сказанное не означает, что электромагнитное излучение поступает в ионосферу снизу или генерируется в нижней ионосфере над эпицентром землетрясения, а затем распространяется вдоль силовых линий магнитного поля вверх. Модовый состав вистлерных поясов более сложен и состоит из смеси волн, распространяющихся в различных направлениях. Некоторые данные свидетельствуют о том, что вистлерные пояса, возможно, связаны с волноведущими ионосферными неоднородностями (предполагается, что эти неоднородности, дакты, имеют

сейсмогенное происхождение), наполняемыми вистлерами естественного происхождения [9, 10].

По спектральному составу — это шипение. Спектр излучения очень широкий и без выраженных максимумов и минимумов охватывает область частот от сотен Гц до нескольких десятков КГц (УНЧ и ОНЧ диапазоны) с характерной плотностью излучения  $E_f \approx 10$  мкВ/(м·Гц<sup>1/2</sup>). Некоторые типичные виды спектров, измеренные различными спутниками, приведены в работах [7, 17, 21]. По имеющимся данным нельзя наверняка установить модовый состав шипений, но характер поляризации волн, содержащих как квазиэлектростатическую  $\delta E = -\nabla\varphi$ , так и вихревую составляющую электромагнитного поля  $\delta B$ , и сам вид частотных спектров, не имеющих особенностей в точках плазменных резонансов  $\omega_{pi}$ ,  $n\omega_{ci}$ , приводит нас к заключению, что шипения возникают в результате возбуждения вистлерной ветви плазменных волн (см. приложение).

Благодаря огромным размерам, вистлерные пояса регистрировались спутниками чаще, чем другие типы сейсмогенных эффектов в ионосфере. Именно вистлерные пояса были впервые описаны в работах [4, 6] в качестве предвестников землетрясений, а общее их число, наблюдавшееся в различных экспериментах, близко к сотне.

(ii) **Альвеновские волны.** В отличие от вистлерных поясов, этот тип излучения хорошо локализован в пространстве и, по сути, представляет собой колебания кусочка  $L$ -оболочки геомагнитного поля, опирающегося на эпицентральною зону землетрясения (точнее, на проекцию эпицентральной зоны на высоту  $h \approx 100$  км). По геомагнитной долготе данное возмущение охватывает сектор  $\delta\Lambda \approx 10^\circ$ , а по геомагнитной широте локализовано в чрезвычайно узких пределах  $\delta\Phi \approx 0.5...1^\circ$ . При наблюдении на высотах 600—1000 км, область возмущения воспринимается как широкий, но тонкий слой, пересекаемый орбитой спутника. Толщина «листа» 40—100 км, а длина по магнитной параллели — около 1000 км. Столь четкая локализация и вполне однозначная сопряженность области, занятой излучением, с эпицентральной зоной землетрясения делают МГД-возмущение весьма «выигрышным» типом предвестника землетрясения. Но локальность эффекта является препятствием для его обнаружения; в литературе описано около двух десятков спутниковых наблюдений подобного рода возмущений над землетрясениями.

С точки зрения спектрального состава данное излучение состоит из смеси волн (альвеновских и магнитозвуковых) с частотами от единиц до сотни Гц (КНЧ-диапазон). Спектр излучения резко обре-

зается снизу (по данным спутника «Интеркосмос-Болгария-1300»  $f_{\min} \approx 8$  Гц [7]), но не имеет четкой верхней границы, простираясь в УНЧ-область с монотонным уменьшением спектральной интенсивности (при переходе от 10 до 100 Гц — на два порядка); максимальные амплитуды МГД-возмущений, достигаемые на низкочастотном краю полосы излучения, составляют  $\delta B = 0.3...3$  нТл при  $f = 1...10$  Гц. По-видимому, с увеличением частоты расширяется диаграмма направленности излучения:  $\delta\Phi \approx 6^\circ$  при  $f \approx 500$  Гц [21]. Сказанное иллюстрирует коллекция спектров, приведенная на рис. 90, 91, 93 в монографии [7], и рис. 5 в [21].

(iii) **Плазменные неоднородности.** Прежде чем перейти к обзору спутниковых наблюдений, отметим, что вплоть до высот абсолютного максимума ионосферы  $h_{\max} = 250...300$  км плотность и макроскопические движения ионосферных слоев надежно отслеживаются методами вертикального зондирования ионосферы с поверхности Земли. В наземных наблюдениях накоплено множество данных о сейсмогенных возмущениях нижних слоев ионосферы, в первую очередь — вертикального распределения плазменной плотности  $n_p$ . Спутниковые наблюдения ( $h \gg h_{\max}$ ), как правило, не обнаруживают подобных возмущений  $n_e$  в верхних слоях ионосферы и магнитосфере. Возможно, из-за того, что зарождение плазменных неоднородностей происходит в нижних слоях ионосферы, а транспортировка неоднородностей вверх требует выполнения достаточно специфичных условий неустойчивости типа Рэлея—Тэйлора.

Вначале приведем данные об аномалиях нижней ионосферы ( $h < h_{\max}$ ), полученные методами ионосферного зондирования. Следуя общепринятому подходу, выделим качественную зависимость ионосферных возмущений от силы готовящегося землетрясения. В случае достаточно сильных землетрясений наблюдается:

- уплотнение слоя  $F_2$  ионосферы  $+\delta n_p \approx n_p$  в обширных «поясах», размеры которых достигают тысячи километров по широте и нескольких тысяч километров по долготе;
- учащение событий внезапного и быстрого (в течение  $< 15$  мин) расплывания спорадических слоев  $E_s$  (т. н. «отсечки»);
- возникновение перемещающихся ионосферных неоднородностей, связанных с распространением медленных (с периодом  $T \approx 2...3$  ч) МГД-волн [11];
- генерация мелкомасштабных плазменных неоднородностей и турбулентных движений слоев ионосферной плазмы (размер неоднородности —

десятки метров и более, возмущение плотности  $\delta n_p/n_p$  порядка нескольких процентов).

В случае достаточно слабых землетрясений происходит разогрев ионосферы, приводящий к перетеканию плазмы из области повышенного давления (с радиусом порядка нескольких сотен километров вокруг эпицентра) в соседние области. При этом, плотность слоя  $F_2$  над эпицентром уменьшается:  $-\delta n_p \approx 0.2n_p$ .

Перечисленные эффекты регистрируются за одни-три суток до начала толчков. Понятия «сильного» ( $M > 5$ ) и «слабого» ( $M < 5$ ) землетрясения весьма произвольны, поскольку физически не только магнитуда землетрясения определяет ионосферный отклик.

Измерения на спутнике «Atmospheric Explorer-C» (АЕ-С), выведенным на чрезвычайно вытянутую орбиту с минимальной высотой 160 км и максимальной высотой 4300 км, обнаружили аномалии ионной плотности  $n_i$  и электронной температуры  $T_e$  ионосферной плазмы ниже и в области максимума слоя  $F_2$ . Т. Гайворонская [2] разделяет зарегистрированные АЕ-С вариации  $n_i$ ,  $T_e$  накануне землетрясений на три типа:

- 1) разуплотнение слоя  $F_2$  ( $-\delta n_i \approx 0.5n_i$  в области размером около 1000 км вдоль траектории спутника) при практически неизменной  $T_e$ ;
- 2) долгопериодные волновые возмущения  $n_i$ ,  $T_e$  — перемещающиеся ионосферные неоднородности;
- 3) слабые квазипериодические вариации  $n_i$ ,  $T_e$ , которые автор связывает с интерференцией ионно-звуковых волн.

Эти результаты вполне укладываются в схему возмущений нижней ионосферы, очерченную выше.

Анализ данных, полученных спутником АЕ-С в верхних слоях ионосферы и магнитосфере ( $h \gg h_{\max}$ ), не выявил каких-либо аномалий плазменных параметров. То же относится и к измерениям на других спутниках. Исключение, возможно, составляют данные ISIS-2, в одном или двух случаях обнаружившем разрежение магнитосферной плазмы в области, магнитосопряженной с эпицентром землетрясения. Наблюдавшаяся вариация плотности составляла  $-\delta n_p \approx 0.1n_p$  при размере плазменной каверны в несколько сотен километров вдоль траектории спутника. В работе [7] высказано предположение, что это — плазменный «пузырь» (plasma bubble), всплывающий из E-слоя ионосферы, но на наш взгляд, обсуждаемые экспериментальные данные недостаточны для обобщений.

Наконец, упомянем о дистанционных измерениях полного содержания электронов (ТЕС) в столбе

Таблица 1. Спутниковые наблюдения ионосферных предвестников землетрясений

КА	Год	h, км	Землетрясение: M, Δt	Отмеченные явления	Литературный источник
OGO-6 (NASA)	1969	400—1100	1) ЗТ не отождествлялось, 2) $M = 5.4$ , $\Delta t$ — часы	1) Электростатическое излучение $E = 10...100$ мкВ/м, $f = 0.01...3$ кГц. Поясная структура излучения: протяженность по долготе $\delta\Lambda \approx 100^\circ$ , широте $\delta\Phi \approx 10^\circ$ . 2) Локализованное магнитное возмущение на L-оболочке ЗТ (0.1...1 кГц)	[4, 18]
ISIS-2 (CNSA)	1979	круг. 1400	$M > 6$ , $\Delta t = 2...6.5$ ч	Уменьшение на 10 % плотности плазмы в области, магнитосопряженной с эпицентром ЗТ (разовое наблюдение)	[4, 7]
AE-C (NASA)	1973	140—4300	$M = 6$ , $\Delta t < 14$ ч	Уменьшение $n_p$ на 20 % на высоте $h = 150$ км над эпицентральным районом, квазиволновые возмущения $n_p, T_e$	[2]
GEOS-1 (ESA)	1977	2050—38000	$M > 5$ , $\Delta t = 1...2$ ч	Электромагнитные шипения $f = 150...1000$ Гц	[25]
GEOS-2 (ESA)	1978	ГСО 36000	$M > 4$ , за 2 ч до и в момент ЗТ	Электромагнитное шипение $\delta B < 10^{-3}$ нТл, $f = 0.15...3$ кГц на L-оболочке ЗТ	[25, 26]
«Интеркосмос-19»	1979	600—1000	39 ЗТ с $M > 5$ , $\Delta t$ : десятки часов до и после ЗТ	Квазиэлектростатические эмиссии $E \approx 10$ мкВ/(м·Гц <sup>1/2</sup> ), $f = 0.14...15$ кГц. Поясная структура излучения над ЗТ. Протяженность поясов: 300—500 км по геомагнитной широте и 5000 км по геомагнитной долготе	[4, 6, 19]
«Интеркосмос-Болгария-1300»	1981	круг. 825	1) $M = 4.8$ , $\Delta t = 15$ мин, 2) $M = 3.4...5.2$ , за 3 ч и в момент ЗТ	МГД-волны на L-оболочке, пересекающей эпицентр ЗТ: 1) $\delta B = 3$ нТл, $f = 1$ Гц. 2) $\delta B = 0.2...0.4$ нТл, $f = 8$ Гц. 3) Вариации потоков протонов с энергией $> 100$ МэВ	[7]
«Ореол-3»	1981	400—2000	1) $M > 5$ , $\Delta t$ — часы-десятки мин. 2) $M = 3.4$ , $\Delta t = -8$ ч, 0,+40 мин	1) Электромагнитное шипение $E \approx 0.1$ мВ/(м·Гц <sup>1/2</sup> ), $\delta B \approx 0.4$ нТл/Гц <sup>1/2</sup> , $f = 0.15...15$ кГц. Поясная структура излучения: по геомагнитной долготе $\delta\Lambda \approx 100^\circ$ , широте $\delta\Phi \approx 10^\circ$ . 2) Перекрестное с «Интеркосмос-Болгария-1300» наблюдение МГД-волн на L-оболочке ЗТ $f = 10...1000$ Гц, $\delta\Lambda \approx 120^\circ$ , $\delta\Lambda \approx 3^\circ$ . 3) Вариации скорости счета протонов с энергией $> 100$ МэВ	[7, 19, 30]
«Метеор-3»	1985	1200	$M > 4$ , $\Delta t = 2.5...3$ ч	Вариации потоков энергичных частиц: электронов $E_e > 5$ МэВ и $E_e > 20$ МэВ и протонов $E_p > 90$ МэВ и $E_p > 400$ МэВ	[3]
Станции «Салют-7» и «Мир»	1985–1987	—	$M > 4$ , $\Delta t = 2.5...3$ ч	Увеличение скорости счета высокоэнергичных частиц	[3]
«Космос-1809»	1988	круг. 970	$M > 4$ , $\Delta t$ — часы	МГД-волны на L-оболочке ЗТ: $\delta\Lambda \approx 120^\circ$ , $\delta\Phi \approx 3^\circ$ , $\delta B \approx 0.1$ нТл, $f = 140$ Гц	[30]
DE-2 (NASA)	1982	300—1300	63 ЗТ с $M \geq 5$ , $\Delta t = -12, +6$ ч	Эмиссии: 1) КНЧ: $E \approx 100$ мкВ/(м·Гц <sup>1/2</sup> ), $f = 4...12.8$ Гц, 2) ОНЧ: $E \approx 100$ мкВ/(м·Гц <sup>1/2</sup> ), $f = 1...10$ кГц. Вывод об отсутствии корреляции излучений и ЗТ	[17]
«Интеркосмос-24» «Активный»	1989	500—2500	28 ЗТ с $5.2 < M < 6.1$ , $\Delta t = -2, +2$ сут, тах за 12...24 ч до ЗТ	1) Электромагнитные шипения $E \approx 0.1...1$ мкВ/(м·Гц <sup>1/2</sup> ), $f = 10...15$ кГц, в «поясах» $\delta\Lambda \approx 300^\circ$ , $\delta\Phi \approx 10^\circ$ и в магнитосопряженной ионосфере. 2) МГД-волны: $E_{\max} \approx 20$ мкВ/(м·Гц <sup>1/2</sup> ) при $f = 10$ Гц в поясах $\delta\Lambda \approx 50^\circ$ , $\delta\Phi \approx 6^\circ$	[21]

Обозначения: NASA — космическое агентство США, CNSA — канадское космическое агентство, ESA — европейское космическое агентство; h — высота орбиты спутника, M — магнитуда землетрясения (ЗТ), Δt — время регистрации предвестника до начала ЗТ (знак «минус» и «плюс» обозначают наблюдения до и после ЗТ соответственно), ГСО — геостационарная орбита

ионосферы под спутником:  $N_e = \int_{-\infty}^{h_s} n_e dh$ , где  $h_s$  — высота спутника. В работе [24] проанализированы вариации  $N_e$  по данным двухчастотного радиовысоотомера спутника «Торех-Poseidon» за период с октября 1992 г. по март 1994 г. Поскольку измерения высот над сушей не поддаются интерпретации, было выделено 706 шельфовых землетрясений, из которых 238 демонстрируют возмущения ТЕС, т. е. 34 % событий. Контрольные измерения для витков без землетрясений дают возмущения в 16 % случаев — 85 событий из выбранных 540 витков. Кроме того, имеются данные [22] об аномальном понижении ТЕС над эпицентром турецкого землетрясения 17 августа 1999 г. (с  $M = 7.4$ , глубина очага  $D = 17$  км). Эти последние измерения были выполнены с помощью наземного GPS-приемника.

(iv) **Вариации потоков энергичных частиц.** Регистрируются небольшие, но статистически достоверные, увеличения скорости счета энергичных частиц, выпадающих из внутреннего радиационного пояса: электронов с энергиями порядка 100 КэВ и более и протонов с энергиями порядка 100 МэВ. Область локализация событий слабая и формой и размерами подобна области генерации УНЧ-ОНЧ-шипений (вистлерным поясам) [3]. Вероятно, что процессы генерации шипений и выпадания частиц из радиационных поясов физически взаимосвязаны, поскольку, как известно, именно рассеянием на вистлерах определяется питч-угловая диффузия захваченных в магнитосфере частиц и их выведение в конус потерь. Если это так, то предвестник (iv) не имеет самостоятельного значения и возникает как вторичный эффект предвестника (i).

Использованная при написании данного раздела фактическая информация просуммирована в табл. 1.

### 3. ПОПЫТКИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ

Статистическому анализу связи между сейсмическими и ионосферными событиями посвящены около десятка работ ([6, 8, 14, 17, 19—21, 25] и др.), почти все они были проанализированы в обзоре [24]. В большинстве этих работ рассматривается только один тип ионосферного предвестника землетрясений — ОНЧ-шипения («вистлерные пояса»).

Вистлерные пояса были описаны выше как весьма крупномасштабные структуры, благодаря чему они и регистрировались спутниками чаще, чем

другие предвестники. Представим себе один такой пояс: при наблюдении со спутника — овальное пятно с размером порядка 1000 км×10 000 км, заполненное излучением. В течение времени жизни пояса (сутки) под ним и рядом с ним происходит много слабых землетрясений и зачастую несколько сильных. Возникает вопрос: предвестником какого из них является данный пояс?

На этот вопрос нельзя ответить обоснованно до тех пор, пока не известны причинно-следственные связи. Но во всяком случае можно констатировать, что далеко не каждое происходящее на Земле землетрясение сопровождается появлением в ионосфере вистлерного пояса. Соотнося вистлерные пояса и землетрясения, мы сталкиваемся с необходимостью отсеять «лишние» землетрясения. В этом пункте большинство авторов исходит на следующих, интуитивно правдоподобных, критериев: ионосферные шипения связываются с достаточно сильными землетрясениями (с магнитудой  $M \geq 5$ ), которые, кроме того, должны быть мелкофокусными (глубина очага менее 100 км) и происходить на суше или шельфе. Этого недостаточно, и дальнейшее рассмотрение показывает, что число вистлерных поясов вокруг Земли во многих случаях меньше, чем «подходящих» землетрясений. Рассмотрим, в качестве примера, информацию о землетрясениях (табл. 2), происходивших в течение времени жизни двух вистлерных поясов, зарегистрированных спутником «Интеркосмос-19» [28, 29]. Один случай относится к поясу, наблюдавшемуся 23.11.80. Как видно из нижней части табл. 2, в этот период времени произошло только одно, сильно выделяющееся среди других, землетрясение, которое, полагают авторы, и вызывало эффект в ионосфере. Другой случай относится к событию 29.03.79. В этом случае, кроме землетрясения, над которым наблюдался вистлерный пояс, произошло еще не-

Таблица 2. Землетрясения, могущие быть источниками ОНЧ-эмиссий. Курсивом выделены события, с которыми авторами отождествлялся ионосферный предвестник;  $\varphi, \lambda$  — географические координаты эпицентра

Дата	УТ	$\varphi$ , град	$\lambda$ , град	$D$ , км	$M$	Район
<i>29.03.79</i>	<i>02.01.33</i>	<i>42.00</i>	<i>83.41</i>	<i>33</i>	<i>5.9</i>	<i>Тянь-Шань</i>
29.03.79	07.07.22	32.15	96.96	33	5.8	Тибет
30.03.79	13.46.09	-7.83	131.04	33	5.2	Новая Гвинея
30.03.79	16.20.19	-5.39	151.68	69	5.4	Новая Гвинея
21.11.80	14.56.13	51.80	-176.14	53	6.0	Алеутские острова
22.11.80	18.02.33	-3.66	140.04	77	5.5	Новая Гвинея
<i>23.11.80</i>	<i>18.34.53</i>	<i>40.91</i>	<i>15.37</i>	<i>10</i>	<i>7.2</i>	<i>Италия</i>
24.11.80	04.22.14	-37.99	177.86	33	5.2	Новая Зеландия
24.11.80	09.33.05	-22.74	-113.48	10	5.4	Австрали

сколько примерно таких же землетрясений, ионосферные предвестники которых, однако, не наблюдались. Можно найти много случаев, подобных как первому, так и второму примеру.

По-видимому, эти данные свидетельствуют о том, что разные типы землетрясений могут иметь разные типы предвестников или могут не иметь предвестников вообще. Поэтому, не предполагая наличия причинно-следственной связи между вистлерными поясами в ионосфере и землетрясениями, необходимо проанализировать, как и при каких условиях эти события коррелируют между собой. Такой анализ проводился двумя авторскими коллективами — Т. Хендерсоном и др. [17] и О. Молчановым и др. [21], — выразившими соответственно «пессимистическую» и «оптимистическую» точки зрения.

**«Пессимистическая» оценка.** В работе [17] производилась обработка данных спутника DE-2 на «сейсмоактивных» и контрольных орбитах. Сегменты орбит, ассоциированные с землетрясениями, выбирались по следующим признакам: 1) орбиты пересекали широту эпицентра землетрясения, по долготе были удалены от эпицентра не более чем на  $\pm 20^\circ$  и попадали во временной интервал  $\Delta t$  от  $-12$  до  $+6$  ч по отношению к моменту землетрясения; 2) выбирались землетрясения  $M \geq 5$  на суше; 3) широта эпицентра менее  $45^\circ$ , так как высокоширотные измерения зашумлены; 4) отбирались события, происшедшие при малой солнечной активности  $K_p \leq 3+$ ; 5) выбирался режим высокой чувствительности приемника. Сегменты контрольных орбит выбирались так. При выполнении условий 3)–5) требовалось также совпадение по широте  $\pm 10^\circ$  и по времени  $\pm 2$  ч с сегментами сейсмоактивных орбит. Но самое важное условие для контрольных орбит — это отсутствие эпицентров сильных землетрясений ( $M \geq 4.5$ ) в следующих пределах:  $\Delta t$  от  $-12$  до  $+6$  ч по времени,  $\pm 10^\circ$  по широте и  $\pm 20^\circ$  по долготе. В итоге было выбрано 58 сейсмоактивных орбит с 63 сегментами и 45 контрольных орбит с 61 сегментом, при этом длительность сегмента составляла около 4 мин ( $15^\circ$  по широте).

Сравнение сигналов, полученных по сейсмоактивным и контрольным орбитам, показало, что никакие из сейсмоактивных орбит не проявляют необычных эмиссий по сравнению с контрольными. В [17] приводятся примеры сейсмоактивных орбит с эмиссией и без эмиссии, а также контрольных орбит с эмиссией и без нее. Оказалось, что 63 % сейсмоактивных и 62 % контрольных орбит проявляют эмиссию. Те же статистические данные имели место и при замене географической широты на магнитную.

**«Оптимистическая» оценка.** Представленные выше результаты не доказывают независимости ионосферных и сейсмических событий. Все дело в выборе окна, с помощью которого ионосферное возмущение «привязывается» к землетрясению во времени и по координатной сетке. Так, ионосферные эмиссии могут сопровождать землетрясения в течении промежутка времени, большего, чем  $\pm 12$  ч от главного толчка. Если так, то становится понятным полученное авторами [17] малое отличие сейсмоактивных и контрольных орбит — эти орбиты соответствовали одному явлению! Данные спутника «Интеркосмос-24» обрабатывались группой исследователей, оптимистически относящихся к статистической достоверности ионосферных предвестников [8, 9, 10, 21]. Их исходные предположения были следующие. Разность геомагнитных координат области наблюдения и эпицентра (окно) составляет по широте  $\Delta\Phi \geq \pm 10^\circ$ , по долготе  $\Delta\Lambda \geq \pm 120^\circ$ . Кроме того, спектр излучения, связанного с землетрясениями, отличается от природных эмиссий. Данные наблюдений выбирались для землетрясений  $M \geq 5.2$  во временном интервале  $\pm 48$  ч. Геомагнитная широта определялась в предположении, что излучение от эпицентра землетрясения до высоты 300 км идет вертикально вверх, а далее канализуется геомагнитным полем.

Измерения показали, что, кроме возможных предвестников, заведомо наблюдаются и эмиссии явно магнитосферного происхождения. Поэтому была осуществлена определенная селекция принимаемых сигналов, которая позволила отсеять вистлеры и сферички магнитосферного происхождения. В результате анализировались данные, привязанные к 28 сильным толчкам, из которых 15 сопровождались ионосферными эмиссиями в интервале широт  $\Delta\Phi = \pm 10^\circ$ . Вероятность появления эмиссии оценивалась как отношение числа интервалов, где эмиссия наблюдалась, к общему числу интервалов, попадающих в данный временной промежуток. Максимум вероятности (60 %) приходился на временной промежуток 6...24 ч до момента главного толчка, как раз на тот период (ранее 12 ч), который отбраковывался в работе [17].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из настоящего обзора и многих других публикаций, общее количество которых близко к полутысячи, проблема ионосферных предвестников землетрясений очень популярна. Актуальность этих исследований обусловлена несколькими причинами: первая, очень немаловажная и часто име-

ющая «политический» оттенок — поиск новых возможностей для предсказания землетрясений. Однако на данном этапе лучше было бы отказаться от обещаний практической пользы и сконцентрироваться на самом предмете исследований. Вторая причина — необходимость изучения механизмов литосферно-ионосферной связи. Несмотря на обилие гипотез о физических механизмах такой связи, отдать предпочтение какой-либо невозможно. Очевидно, что в этом повинны не авторы работ, а скудность информации об ионосферных событиях, связанных с землетрясениями, с одной стороны, и многообразие и сложность ионосферных и магнитосферных процессов безотносительно их связи с процессами в литосфере и нижней атмосфере, с другой стороны.

Большинство публикаций, в которых сообщается о единичных фактах регистрации со спутников возмущений ионосферы (чаще всего одного-единственного параметра), хотя и представляют ценность сами по себе, мало проясняют сложившуюся ситуацию. Как правило, в таких работах не сообщается о других землетрясениях, произошедших в тот же период, имевших примерно такую же магнитуду, но не вызвавших в ионосфере эффект, регистрируемый спутником. А ведь важно знать причину: то ли научная аппаратура не работала, то ли помехи замаскировали сигнал, то ли не было сигнала. Чаще всего слабо аргументируется и само сейсмогенное происхождение ионосферного события. Причинно-следственные связи неизвестны, и кто кроме самого исследователя, может оценить, насколько случайно или неслучайно совпали во времени и пространстве два события — землетрясение и возмущение ионосферы? Именно такие сообщения о единичных фактах наблюдений ионосферных предвестников и создают впечатление о том, что проблема ионосферных предвестников решена, и пора переходить к практическому использованию научных исследований [1, 5].

В действительности недостаток экспериментальных данных и слабая их систематизация не позволяют составить четкую характеристику происходящего в ионосфере явления. Мы полагаем, что на существующем экспериментальном материале решить эту проблему невозможно, однако для успеха будущих исследований, особенно для постановки новых спутниковых экспериментов, необходимо знать, что уже известно об ионосферных предвестниках и что нужно выяснить в первую очередь. Попытка составить «портреты» возникающих в ионосфере явлений и была предпринята в настоящей работе. Эти портреты — предполагаемые; их

следует рассматривать как рабочую гипотезу, вытекающую из имеющихся данных и подлежащую дальнейшей проверке.

В отличие от сообщений о единичных наблюдениях ионосферных предвестников землетрясений, намного спокойнее и скромнее звучат выводы авторов, использовавших статистический подход к анализу проблемы. Авторы этих работ использовали интуитивно установленные рамки для выделения ионосферных и сейсмических событий: минимальное значение магнитуды землетрясения, допустимый уровень геомагнитной активности, максимальное значение глубины очага, его широты, расположение на материке или шельфе вблизи берега и т. п. Весьма произвольным и поэтому спорным выглядит выбор «окна» для селекции ионосферных эффектов: максимальные разности широт, долгот (часто в геомагнитных координатах) и времени сопоставляемых событий. Но несмотря на заметные различия в подходе, в рамках одной работы критерии не меняются, что дает основания считать полученные результаты корректными в рамках указанного подхода. Как правило, результаты таких исследований обнаруживают небольшое превышение вероятности появления того или иного ионосферного возмущения над очагом землетрясения по сравнению с контрольными измерениями. Это превышение обычно составляет несколько процентов, и его достоверность близка к нулю. На таком фоне резко выделяются работы группы авторов из ИЗМИРАН по данным спутника «Интеркосмос-19». В некоторых публикациях [6] они утверждают о 90 %-м совпадении ионосферных возмущений (ОНЧ-эмиссий) с землетрясениями. Возможно, авторам удалось найти оптимальный подход к селекции событий или же ОНЧ-приемники «Интеркосмос-19» были существенно чувствительнее, чем приборы спутника DE-2. При сравнении чувствительности приборов необходимо учитывать и уровень электромагнитных помех самого аппарата для данного диапазона частот, что сделать постфактум очень трудно. Несомненно, полезным мог бы быть обмен данными «Интеркосмос-19» и DE-2 и их обработка в рамках разных подходов.

Последний вывод, который мы вынуждены повторить вслед за авторами предыдущих обзоров, — для верификации основных представлений об ионосферных предвестниках землетрясений необходим целенаправленный спутниковый проект. Такой проект был бы полезен и с точки зрения изучения возмущений среднеширотной ионосферы, возникающих под действием иных факторов, не только сейсмических.



ПРИЛОЖЕНИЕ.

МОДОВЫЙ СОСТАВ ИОНОСФЕРНЫХ ЭМИССИЙ

На «спутниковых» высотах  $h = 600...1000$  км и выше характерный масштаб изменения плотности ионосферной плазмы составляет более сотни километров по вертикали, а масштаб неоднородности геомагнитного поля превышает тысячу километров. В интересующей нас области частот от десятков Гц до десятков КГц ионосферные эмиссии имеют гораздо меньшие длины волн, что позволяет рассматривать ионосферную плазму как локально однородную (оценка длины плазменной волны с минимальной частотой  $f \approx 10$  Гц дает  $\lambda = V_A/f \approx 30...70$  км, где альвеновская скорость  $V_A = 300...700$  км/с). Дисперсионная картинка волн однородной плазмы приведена на рис. 2 [13]. Численные значения плазменных частот верхней среднеширотной ионосферы указаны в табл. 3, 4 (по [12]). Высокочастотным типам ионосферных эмиссий на рис. 2 соответствуют моды 1, 2, 3, а также не показанные на этом рисунке электронные моды Бернштейна. Волнам КНЧ-ОНЧ-диапазонов соответствует вистлерная мода 4, охватывающая область частот  $0 < \omega < \omega_{wh}^\infty$ . Максимальная частота вистлеров  $\omega_{wh}^\infty$  лежит в промежутке между нижегибридной  $\omega_{lh}$  и электронной циклотронной частотами:  $\omega_{wh}^\infty = \omega_{lh} \equiv$

$\equiv \omega_\pi / \sqrt{1 + (\omega_{pe}/\omega_{ce})^2}$  при  $\theta = \pi/2$  и  $\omega_{wh}^\infty = \omega_{ce}$  при  $\theta = 0$  (где  $\theta$  — направление распространения волны по отношению к геомагнитному полю,  $\omega_{pe, pi}$  — электронная и ионная ленгмюровская частота,  $\omega_{ce, ci}$  — электронная и ионная циклотронная частота). Отметим, что отдельным кусочкам ветви 4 соответствуют: магнитный звук —  $0 < \omega < \omega_{ci}$ , собственно вистлер (или свист) —  $\omega_{lh} \ll \omega \ll \omega_{wh}^\infty$ , электростатический вистлер —  $\omega \approx \omega_{wh}^\infty$ . Последний является квазипродольной плазменной модой  $\delta E \approx -\nabla\phi, \delta B \rightarrow 0$ , предыдущие две моды — поперечные (электромагнитные).

На правой части рис. 2 показаны ионные дисперсионные ветви: кривые 5 и 5' — две ветви ионно-звуковых волн  $0 < \omega < \omega_{ci} \cos\theta$  и  $\omega_{ci} < \omega < \omega_\pi$  (квазипродольные моды); кривая 6 — альвеновская волна  $0 < \omega < \omega_{ci}$  (имеющая поперечную поляризацию); линии 7 — квазипродольные ионные моды Бернштейна  $\omega \approx n\omega_{ci}$ , существующие при  $\theta \approx \pi/2$ .

Рассматриваемым в данной работе эмиссиям КНЧ-УНЧ-диапазонов ( $\omega < \omega_{ci}$ ) соответствуют, очевидно, магнитогидродинамические типы плазменных мод: магнитозвуковая и альвеновская. ОНЧ-шипения ( $\omega_{ci} < \omega < \omega_{ce}$ ) охватывают область сразу нескольких мод: ионных мод Бернштейна, ионного звука, вистлеров. Но исходя из характера поляризации наблюдаемых на эксперименте шипений (в одних случаях почти электростатических  $\delta B \rightarrow 0$ , в других — содержащих также и вихревую составляющую электромагнитного поля), а также учитывая однородную структуру их частотных спектров (не имеющих особенностей в точках плазменных резонансов  $\omega_\pi, n\omega_{ci}$ ) мы приходим к заключению, что ОНЧ шипения возникают в результате возбуждения широкого участка вистлерной моды 4.

Таблица 3. Характерные плазменные частоты слоя F2 среднеширотной ионосферы (высоты 600—1000 км)

Ионно-циклотронная	Нижегибридная	Ионная ленгмюровская	Электронно-циклотронная	Ленгмюровская
$f_{ci} \approx \approx 1$ КГц	$f_{lh} \approx \approx 40$ КГц	$f_\pi \approx \approx 200$ КГц	$f_{ce} \approx \approx 1.6$ МГц	$f_{pe} \approx \approx 10$ МГц

Таблица 4. Шкала частот радиоволн. Как вариант, УНЧ-диапазон может быть объединен с КНЧ-диапазоном. Расстановка плазменных мод дана для параметров верхней среднеширотной ионосферы: 1, 2, 3 — быстрые электромагнитные и медленная необыкновенная волны, 4 — вистлер, 5 — ионный звук, 6 — альвеновская волна, 7 — ионные моды Бернштейна, 8 — моды Бернштейна

Обозначение	Диапазон	Мода
Крайне низкие частоты (КНЧ)	3—300 Гц	4, 6
Ультранизкие частоты (УНЧ)	0.3—3 КГц	4, 5, 6, 7
Очень низкие частоты (ОНЧ)	3—30 КГц	4, 5
Низкие частоты (НЧ)	30—300 КГц	4
Средние частоты	0.3—3 МГц	4, 8
Высокие частоты	3—30 МГц	1, 2, 3, 8
Очень высокие частоты	30—300 МГц	

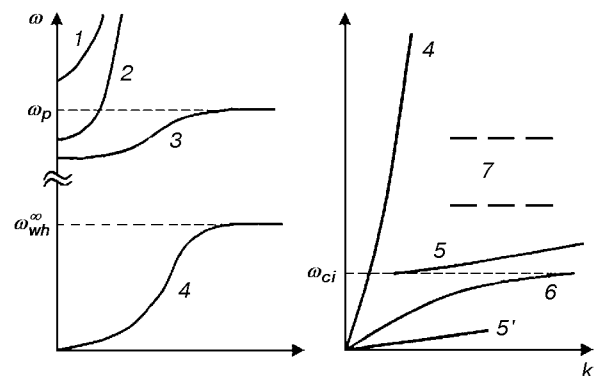


Рис. 2. Моды однородной замагниченной плазмы: 1 — быстрая необыкновенная, 2 — обыкновенная, 3 — медленная необыкновенная волны, 4 — вистлер, 5 — ионный звук, 6 — альвеновская волна, 7 — ионные моды Бернштейна

Работа была поддержана грантом INTAS-CNES N 97-1769.

1. Бучаченко Ф. Л., Ораевский В. Н., Похотелов О. А. и др. Ионосферные предвестники землетрясений // Успехи физ. наук.—1996.—166, вып. 9.—С. 1023—1029.
2. Гайворонская Т. В. Некоторые ионосферные предвестники готовящихся землетрясений // Физика земли.—1996.—В. 9, № 9.—С. 38—42.
3. Гальпер А. М., Дмитренко В. В., Никитин Н. В. и др. Взаимосвязь потоков энергичных частиц в радиационном поясе с сейсмической активностью Земли // Космич. исследование.—1989.—27, вып. 5.—С. 709—712.
4. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А. Наблюдения со спутника электромагнитного излучения над эпицентральной областью готовящегося землетрясения // Докл. АН СССР.—1983.—268, № 1.—С. 56—58.
5. Ларкина В. Радионаблюдения с ИСЗ за предвестниками землетрясений // Радио.—1999.—№ 1.—С. 55—56.
6. Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэронаука.—1983.—23, № 5.—С. 842—846.
7. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—304 с.
8. Лихтер Я. И., Ларкина В. И., Гдалевич Г. Л. Вероятностные характеристики флуктуаций взаимно перпендикулярных электрических и магнитных компонент поля КНЧ-ОНЧ излучений // Геомагнетизм и аэронаука.—1991.—31, вып. 1.—С. 181—183.
9. Михайлова Г. А., Голявин А. М., Михайлов Ю. М. Динамические спектры ОНЧ-излучений во внешней ионосфере, связанные с Иранским землетрясением 21.06.1990 (ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэронаука.—1991.—31, вып. 5.—С. 801—807.
10. Михайлов Ю. М., Михайлова Г. А., Капустина О. В. Тонкая структура спектров сигналов ОНЧ-передатчиков над зоной Иранского землетрясения 1990 г. (ИСЗ «Интеркосмос-24») // Геомагнетизм и аэронаука.—1997.—37, вып. 5.—С. 1003—1007.
11. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. — М.: Энергоатомиздат, 1982.—136 с.
12. Фаткуллин М. Н., Зеленова Т. И. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. — М.: Наука, 1981.—256 с.
13. Электродинамика плазмы / Под. ред. А. И. Ахиезера. — М.: Наука, 1974.—720 с.
14. Afonin V. V., Molchanov O. A., Kodama T., et al. Statistical study of ionospheric plasma response to seismic activity: search for reliable result from satellite observations. — Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.—P. 597—617.
15. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.—996 p.
16. Electromagnetic Phenomena related to Earthquake Prediction / Ed. M. Hayakawa, Y. Fujinawa, TERRAPUB, Tokyo, 1994.—677 p.
17. Henderson T. R., Sonwalkar V. S., Helliwell R. A., et al. A search for ELF/VLF emissions induced by earthquakes as observed in the ionosphere by the DE-2 satellite // J. Geophys. Res.—1993.—98, N A6.—P. 9503—9514.
18. Holtet J. A., Maynard N. C., Heppner J. P. Variational electric fields at low altitudes and their relation to spread F and plasma irregularities // J. Atmos. and Terr. Phys.—1977.—39, N 3.—P. 247—262.
19. Larkina V. I., Migulin V. V., Molchanov O. A., et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in upper ionosphere over earthquake zones // Phys. Earth. Planet. Inter.—1989.—57, N 1/2.—P. 100—109.
20. Matthews J. P., Lebreton J. P. A search for Seismic Related Wave Activity in the Micropulsation and ULF Frequency Ranges Using GEOS Data // Ann. Geophys.—1985.—3, N 6.—P. 749—754.
21. Molchanov O. A., Mazhaeva O. A., Goliavin A. N., Hayakawa M. Observation by the Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes // Ann. Geophys.—1993.—11.—P. 431—440.
22. Oraevsky V. N., Ruzhin Yu. Ya., Shagimuratov I. I. Comparison of Ionosphere TEC above the Turkey during Solar Eclipse action and before two Strong Earthquakes at 1999 // Abstracts of the Tenth International Symposium on Equatorial Aeronomy, May 17-23, 2000, Antalya, Turkey, p. 34—38.
23. Parrot M. Electromagnetic noise due to earthquakes // Handbook of Atmospheric Electrodynamics, VII, CRS Press, 1995, Chapter 4.—P. 95—116.
24. Parrot M. Statistical Studies with Satellite Observations of Seismogenic Effects, in Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes, Ed. M. Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999.—P. 685—695.
25. Parrot M., Lefeuvre F. Correlation between GEOS ULF emission and earthquakes // Ann. Geophys.—1985.—3, N 6.—P. 737—748.
26. Parrot M., Mogilevsky M. VLF-emission associated with earthquakes and observed in the ionosphere and magnetosphere // Phys. Earth and Planet. Inter.—1989.—57, N 1/2.—P. 86—99.
27. Ruzhin Yu. Ya., Depueva A. Kh. Seismoprecursors in space as plasma and wave anomalies // J. Atmospheric Electricity.—1996.—16, N 3.—P. 271—288.
28. Ruzhin Yu. Ya., Larkina V. I., Depueva A. Kh. Magnetic conjunction of appearance regions of the sesmo-ionospheric precursors // Intern. Workshop on Seismo-Electromagnetics, 3-5 March 1997, Tokyo, Abstracts.—P. 198—201.
29. Ruzhin Yu. Ya., Larkina V. I. Magnetic conjunction and time coherency of sesmo-ionosphere VLF bursts and energetic particles // Proc. 13th Wroclaw EMC Symposium (URSI), 1996.—P. 645—648.
30. Serebryakova O. N., Bilichenko S. V., Chmyrev V. M., et al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites // Geophys. Res. Lett.—1992.—19, N 1.—P. 91—94.

#### SATELLITE OBSERVATIONS OF IONOSPHERIC EARTHQUAKE PRECURSORS

V. V. Grimal'skij, V. N. Ivchenko, and G. V. Lizunov

We review satellite observations of seismogenic phenomena in the ionosphere. Based on literature data, hypothetical patterns of seismogenic phenomena were reconstructed. We discuss the reasons which allow the ionospheric «anomalies» to be correlated with earthquake precursors.