

© Журнал «Инженерная экология», № 5, 1996 г.
 © Издательство «Инженерная экология», Москва, РФ, 1996 г.

КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ЭКОЛОГИЯ: ЭФФЕКТЫ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ИОНОСФЕРНЫХ ВЫСОТАХ

**Бирюков А.С., Григорян О.Р., Кузнецов С.Н.,
Ораевский В.Н., Панасюк М.И., Пулинец С.А.,
Чмырев В.Н.**

В настоящее время космическая наука, после исследования в течение почти сорока лет характеристик околоземного космического пространства (ОКП), готова к решению различных прикладных задач в интересах всего человечества. Важнейшее место в ряду этих проблем занимает проблема землетрясений, являющихся одним из наиболее распространенных естественных геофизических явлений, ка-

тастрофические последствия которых приводят к значительным разрушениям и многочисленным человеческим жертвам.

Действительно, ежегодно на земном шаре происходит около 20 сильнейших (с магнитудой $M > 7$), 100...120 потенциально разрушительных и примерно 300 тысяч землетрясений с малыми магнитудами, что приводит к гибели в среднем за год до десяти тысяч

человек. Сейчас каждый второй житель планеты находится под их угрозой. Считается, что землетрясения стоят на первом месте среди стихийных бедствий по масштабу ущерба и количеству уносимых человеческих жизней. За многие годы число жертв и убытки при катастрофических землетрясениях отнюдь не имеют тенденции к снижению. Связано это в основном с резким увеличением населения сейсмоопасных районов, что хорошо видно из рис.1 [1]. На нем приведено распределение сильных (с $M > 7$) землетрясений в первой половине XX века как

неглубоких, так и с глубиной очага 70-300 км и более. Следует отметить, что около 70 % землетрясений происходит на глубине до 60 км (т.е. в пределах земной коры). Однако в некоторых районах велика доля глубокофокусных землетрясений (очаги которых расположены на глубине до 300-700 км). В настоящее время примерно 16 % территории России, на которой проживает более 6 млн. человек, расположены в сейсмоактивных областях, где нередко землетрясения силой более 7 баллов.

Близкая проблема - это проблема так называемых "ис-

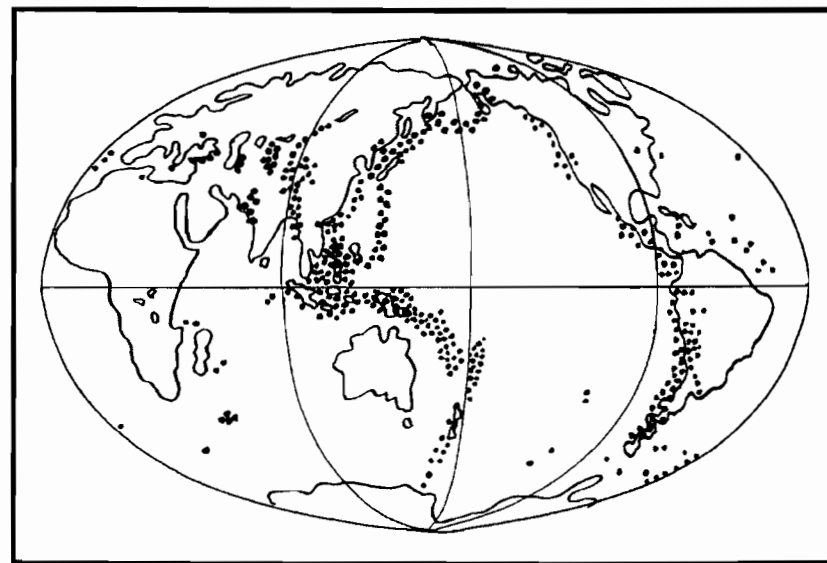


Рис. 1. Распределение сильных ($M > 7$) землетрясений в первой половине XX века (как неглубоких, так и с глубиной очага 70...300 км и более)

кусственных" землетрясений (от промышленных и испытательных, в том числе и ядерных, взрывов в районе крупных водохранилищ и т.д.). И если взрывы, по всей видимости, не влияют существенно на сейсмичность района, то заполнение больших водохранилищ в результате строительства плотин активизирует расположенные рядом разломы и вызывает землетрясения (примерами могут служить: плотина Кремаста в Греции в 1966г., $M=6.2$; плотина Кароба в Замбии и Зимбабве, $M=6.1$ в 1963 г.). Закачивание ядовитых отходов промышленного производства в скважины глубиной 3670 метров около г.Денвера, США, представляет собой известный случай искусственного возбуждения слабых, частых землетрясений (до 120 в месяц с максимальной магнитудой $M=4.3$) [2].

Современное состояние проблемы характеризуется как развитием методики долгосрочного прогноза, так и разработкой теоретических и практических методов предсказания времени, места и магнитуды конкретного землетрясения, т.е. методики краткосрочного прогноза.

В течение многих десятилетий в большинстве разви-

тых стран ведутся традиционные сейсмологические, геофизические, тектонические, томагнитные и др. исследования возможности прогноза землетрясений. Однако проблема все еще далека от разрешения. Число случаев успешного прогноза исчисляется единицами (классическим примером успешного прогноза является предсказание сильного (интенсивностью 9 баллов и $M=7.3$) Хайченского землетрясения (Китай) 04.02.1975 г., когда официальное предупреждение было выдано за несколько часов до землетрясения) [2, с.184].

Однако такие случаи представляют, к сожалению, исключение из правил. Наглядным примером является недавнее землетрясение в Сан-Франциско. В зоне, где оно давно ожидалось, было размещено большое количество традиционной аппаратуры, тем не менее надежных предвестников зарегистрировано не было и предупреждения не последовало.

Поэтому становится очевидным, что в узких рамках изучения только отдельных геофизических параметров невозможно понять общих закономерностей процесса. Необходимо использование более полного комплекса данных со спутников и наземных наблюдений.

Таблица 1

Магнитуда	Протяженность очага, км	Размер области подготовки (проявление многих предвестников), км ²	Продолжительность подготовки (действие уловимых предвестников)
5	5	10000	Месяцы
6	20	100000	Годы
7	70	1000000	Около 10 лет
8	200	5000000	Десятки лет

В настоящее время имеется большое количество экспериментальных и теоретических работ, свидетельствующих о наличии сейсмоионосферных и сейсмомомагнитосферных связей. Отметим, что при наземных ионосферных наблюдениях многократно регистрировались аномальные вариации параметров ионосферы, коррелирующие с сейсмической активностью. Это выражается в вариациях: квазипостоянных магнитных и электрических полей; электромагнитных излучений (вблизи земной поверхности и в ОКП); потоков заряженных частиц.

Таким образом, возникает вопрос об использовании космических средств для поиска в ОКП возможных предвестников для краткосрочного предсказания места,

времени и интенсивности готовящихся землетрясений. Тем более, что большинство сильных землетрясений готовится годами и месяцами и предваряется в радиусе десятков километров вполне уловимыми признаками (см.табл.1).

Изначально необходимо обобщить накопленный за последние годы экспериментальный, в основном полученный на спутниках, материал по регистрации ионосферных эффектов от готовящегося землетрясения. На рис.2 приведен перечень физических эффектов возмущения космической плазмы, которые могут быть зарегистрированы на борту ИСЗ.

Рассмотрим более подробно совокупность основных экспериментальных данных.

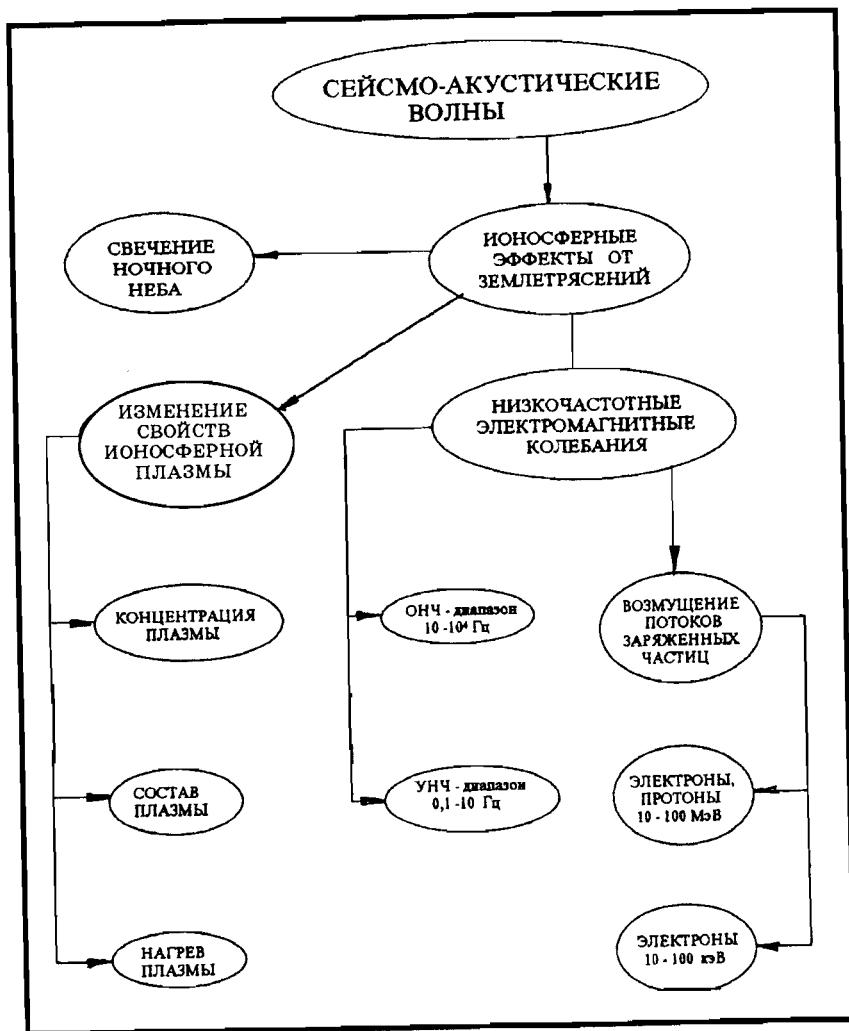


Рис.2. Физические эффекты космической плазмы

Электромагнитное излучение вблизи очага землетрясения

По мере увеличения напряжений в земной коре в будущем районе землетрясения изменяются электрофизические свойства горных пород и возникает широкополосное шумовое

электромагнитное радиоизлучение в низкочастотном диапазоне, длящееся относительно короткое время. Оно может быть зарегистрировано как на поверхности Земли, так и на борту ИСЗ. Важно отметить, что *излучение появляется как после, так и за несколько часов (иногда за сутки) до землетрясения.*

Большая часть зарегистрированных событий приходится на низкоширотную область, где сильные землетрясения происходят более часто. Естественные излучения в этой области сравнительно слабы и связаны в основном со значительным уровнем геомагнитной активности.

Возможность прохождения электромагнитных полей от сейсмических источников в ионосферу Земли исследовалась многими авторами, в частности, в работах [3,4]. Теоретические оценки [3] показали:

* возможно проникновение в верхнюю ионосферу и магнитосферу электромагнитной энергии от сейсмического источника, причем оптимальным является диапазон частот **0.3...10 Гц**;

* положение максимума интенсивности зависит от глубины источника, проводимости Земли и параметров ионосферы;

* магнитный источник более эффективен, чем электрический для проникновения в

верхнюю ионосферу;

* в магнитосферу проникает электромагнитная энергия в виде косых альвеновских мод;

* зона "засветки" проникающей энергии верхней ионосферы имеет круговую форму с радиусом **100...150 км**.

Одна из первых привязок данных по электромагнитным излучениям к землетрясениям была проведена по данным ИСЗ **ОГО-6** [5]. Для анализа отбирались поверхностные (глубина **<80 км**) землетрясения. В ночной ионосфере регистрировались локализованные всплески низкочастотных электромагнитных шумов (в диапазоне частот от сотни до тысячи Гц) над эпицентрами готовящихся землетрясений (с магнитудой **M>5.5**).

Следует отметить, что в дневные часы и при пролетах над эпицентрами глубокофокусных землетрясений электромагнитных возмущений не наблюдалось. Наиболее убедительным примером (см. рис.3) является регистрация **05.08.1969 г.** всплеска на частоте **1 кГц** за **3.5 часа** до землетрясения (**16:32 UT, M=5.4**). Эффект наблюдался в условиях очень слабой геомагнитной возмущенности на низких широтах, где интенсивность естественных излучений мала, особенно в отсутствие сильных магнитных возмущений.

Значительный объем экспериментальной информации был получен в волновом эксперименте (0.1...16 кГц) на ИСЗ "Интеркосмос-19" (на высоте 600-700 км, т.е. выше максимума F-слоя), где были обнаружены аномальные всплески КНЧ-ОНЧ-колебаний при пролетах над средними и низкими широтами. Анализировалась возможная их связь с неглубокими землетрясениями (<60 км) с магнитудой $M > 5.0$, происходившими в основном в магнитоспокойное время. На рис.3 приведен один из примеров регистрации излучения за сутки до землетрясения 12.06.1979г. (происшедшего в 21:11 UT с

магнитудой $M=5.8$). Показаны проекции витков, вдоль которых приведены наблюдавшиеся формы всплесков излучения на частоте 15 кГц по электрической компоненте (слева от проекции витка) и по магнитной компоненте (справа). Получено, что всплеск на витке 1505 наблюдался за 25.7 часов, на витке 1512 - за 14 часов до начала землетрясения. Видно, что излучение регистрировалось на $L < 4$, где подобные квазиэлектростатические колебания (по спектральным характеристикам) ранее не наблюдались. Основные результаты, полученные на спутнике, можно кратко сформулировать следу-

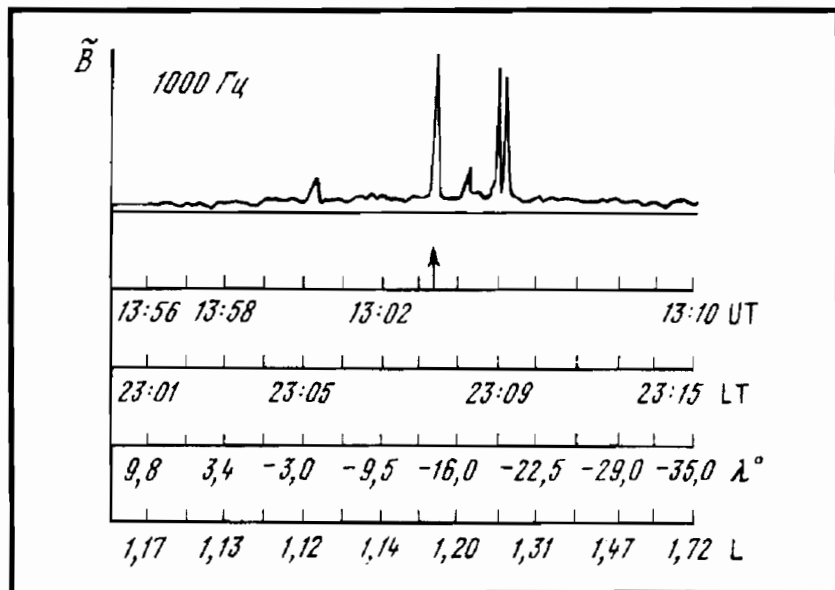


Рис.3. Регистрация магнитного всплеска на спутнике ОГО-6. (Стрелкой показан момент землетрясения)

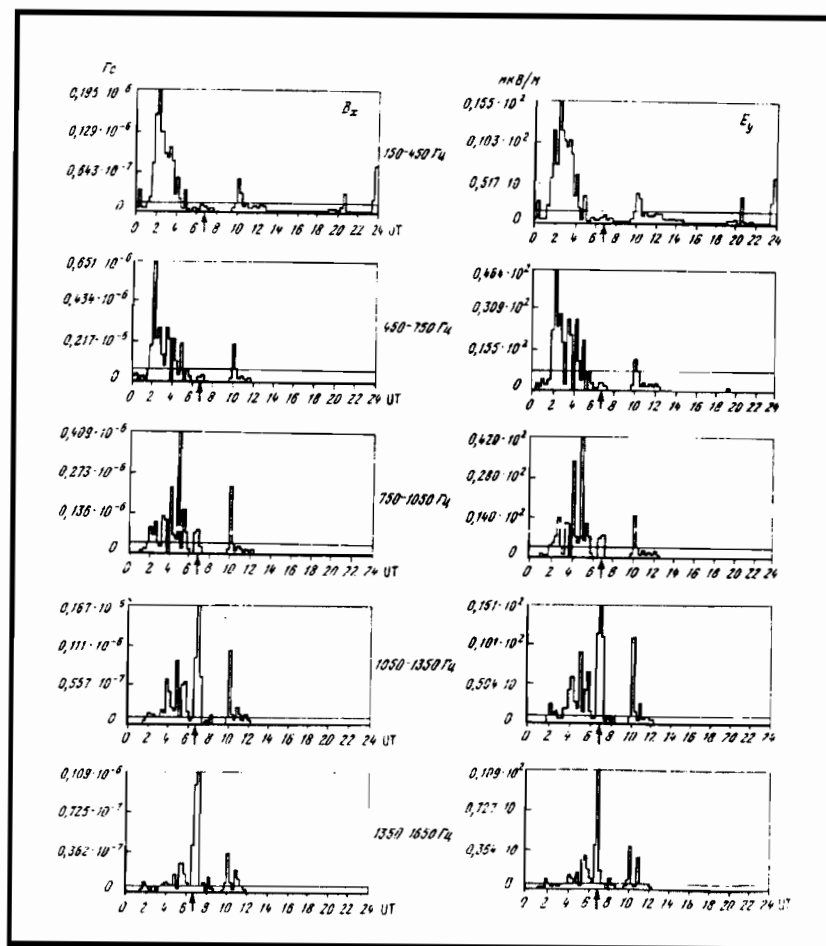


Рис.4. Вариации амплитуды сигнала по компонентам B_z (Гц), E_y (мВ/м) в различных частотных диапазонах (по данным ИСЗ "ГЕОС-2"). (Стрелками показан момент землетрясения, тонкая линия - средний уровень сигнала за день)

образом [6-9]:

* с достоверностью 0.9 показано, что над эпицентром готовящегося землетрясения на высотах верхней ионосферы наблюдается увеличение интенсивности (до 20 дБ) ОНЧ-излу-

чения при пересечении спутником силовых линий, проецирующихся на ионосферу вблизи эпицентра сильного землетрясения;

* аномальные всплески регистрировались за десятки ми-

нут - десятки часов до и после землетрясения;

* максимальная амплитуда всплесков чаще всего наблюдалась на частотах $f \sim 15$ кГц. На частотах до 140 Гц сигналы менее интенсивны. Плазменные колебания были в основном электростатическими (т.к. относительная амплитуда электрической компоненты намного превышала относительную амплитуду магнитной);

* вероятностные размеры зоны регистрации излучений по отношению к эпицентру землетрясения составляют $\pm 2^\circ$ по широте и $\pm 60^\circ$ по долготе.

Интересные результаты были получены на спутниках "ГЕОС-1 и -2" в частотном диапазоне 150 Гц...74 кГц [10]. В частности, спутник "ГЕОС-2" находился вблизи эпицентра поверхностного землетрясения 03.11.1978г. (06:45 UT, $M=4.5$). На рис.4 приведен пример вариаций амплитуды сигнала (усреднение составляет 15 мин.). Отчетливо видно увеличение интенсивности вблизи момента землетрясения. На низких частотах (150...450 Гц) интенсивность максимальна приблизительно за 2 часа до события, а на высоких частотах (1350...1650 Гц) непосредственно в момент землетрясения. Таким образом, происходит явление ужесточения спектра шу-

мовых излучений к моменту главного толчка, т.е. в процессе подготовки землетрясения на заключительной его фазе происходит перекачка энергии из низкочастотной части спектра в высокочастотную.

Значительный экспериментальный материал по связи низкочастотных колебаний с землетрясениями накоплен по данным ИСЗ "Ореол-3" [11-15]. Характерным является пример, когда спутник пролетал в условиях спокойной геомагнитной обстановки над эпицентром землетрясения, которое произошло 21.01.1982 г. (17:50:26 UT, $M=4.6$, эпицентр находился на долготе, свободной от искусственных источников излучений, которые могли бы вносить помехи в измерения), за 4 ч 48 мин до главного удара. На рис.5 приведен ход горизонтальной составляющей КНЧ-излучений на частотах 40...100 Гц и 100...200 Гц и данные контрольного пролета над тем же эпицентром за 2 суток до землетрясения. Хорошо видно, что низкочастотные излучения регистрируются по крайней мере за несколько часов до главного удара [13].

Сходные результаты были получены на ИСЗ "Интеркосмос-Болгария-1300" (ИКБ-130) по наблюдению квазипостоянных электрических полей и

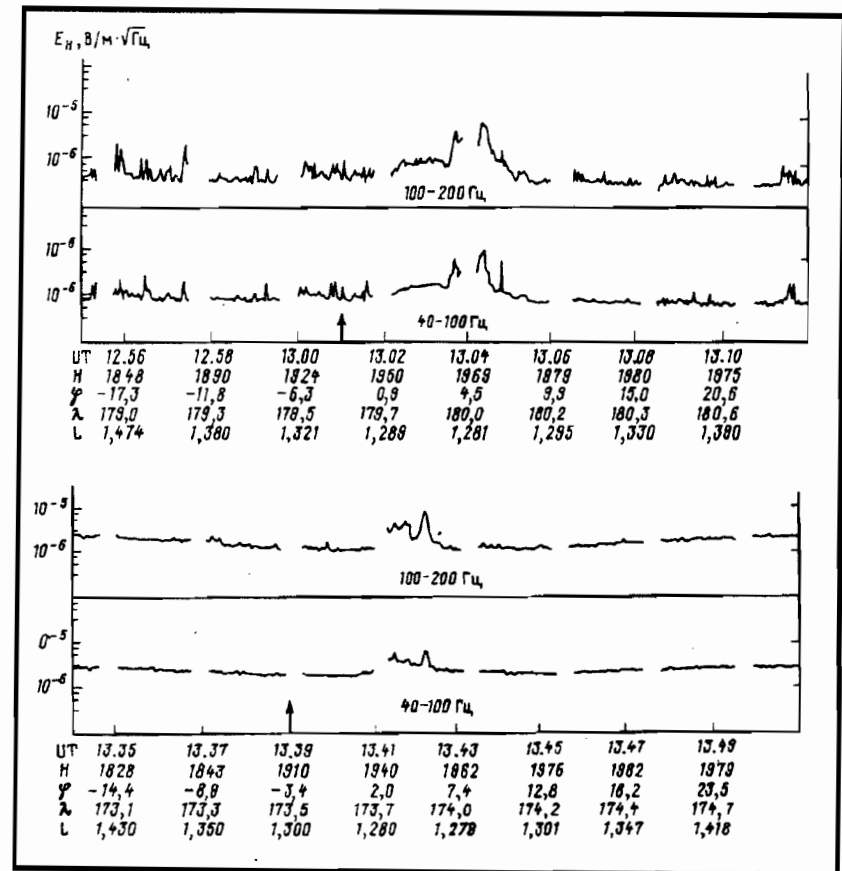


Рис. 5. Временной ход вариаций интенсивностей КНЧ-излучений: а) за несколько часов до землетрясения; б) - за 2 суток до главного толчка.

(Стрелка в обоих случаях указывает моменты, когда орбиты спутника были вблизи эпицентра готовящегося землетрясения)

волн на частотах 0.1-8 Гц. Спутник, кстати, пролетал над областью того же землетрясения 21.01.1982 г., детально проанализированного на ИСЗ «Ореол-3», за 15 мин до главного толчка [13,16,17]. Отметим любопытную особен-

ность в поведении полей. При нахождении спутника в силовой трубке эпицентра готовящегося землетрясения или вблизи нее $E_{перп} \gg E_{прод}$, где $E_{перп}$ и $E_{прод}$ - соответственно поперечная и продольная (по отношению к геомагнитному

полю) компоненты квазипостоянного электрического поля (1...10 Гц); при удалении от эпицентра (как по широте, так и по долготе) $E_{\text{перп}} < E_{\text{прод}}$. На частотах, по крайней мере до 1 кГц, до землетрясения, как правило, $E_{\text{перп}} \gg E_{\text{прод}}$, а после землетрясения - $E_{\text{перп}} \ll E_{\text{прод}}$ [18]. Другой вывод по данным ИКБ-1300 - в ионосфере на высотах 800...900 км над зоной землетрясения за несколько часов до начала и во время основного толчка могут наблюдаться возмущения магнитного поля на частотах $f > 8$ Гц с амплитудой 0.2...0.4 нТл. Размер зоны регистрации составляет 40...100 км вдоль траектории спутника, причем максимум интенсивности лежит на L-оболочке, соответствующей проекции эпицентра землетрясения на высоту 100 км ионосферы [19].

Аналогичные измерения

Потоки заряженных частиц

Как показано выше, источник радиоизлучения сейсмического происхождения создает излучения, проникающие в ионосферу и магнитосферу. Помимо прямой регистрации этого излучения на борту ИСЗ оно может быть зарегистрировано и по физическим эффектам в космическом пространстве, им вызываемым. Причем

были проведены на ИСЗ "Космос-1809", правда, в основном для афтершоков (было зарегистрировано около 40 толчков разной силы), в т.ч. Спитакского землетрясения (07.12.1988 г., $M=6.7$), за период с 13.01 по 17.02.1989 г. Электромагнитное излучение на частотах 100...400 Гц наблюдалось в зоне +/- 6° по долготе (кстати, в отличие от +/-60° по данным "Интеркосмоса -19"). Причем граница области по широте симметрична относительно соответствующей эпицентру L-оболочки [20,21].

ИСЗ "Интеркосмос-24" зарегистрировал электромагнитное излучение от Иранского землетрясения (20.06.1990 г., $M=6.7$), для которого характерна была серия сильных афтершоков ($M=5$, $M=6.1$, $M=5.4$). Аномальные НГР-шумы регистрировались за 3.5...28 часов до афтершоков [22].

результат такого взаимодействия можно увидеть не обязательно в той области, где оно произошло.

Впервые указания на возможную взаимосвязь потоков высокоэнергичных частиц радиационных поясов с сейсмической активностью были получены на орбитальной станции "Салют-7" [23].

Эксперименты были продолжены на орбитальном комплексе "Мир", (высота 400 км) где было зарегистрировано 11 более чем десятикратных возрастаний интенсивности частиц с энергией более нескольких десятков МэВ, причем основную долю (около 80%) составляют протоны с энергией $E_p > 30$ МэВ. В 8 случаях (когда отсутствовали геомагнитные возмущения) через 2.5...3 часа после каждого всплеска интенсивности регистрировалось землетрясение с $M > 4$ [24,25]. Захваченные геомагнитным полем такие протоны могут испытывать резонансное взаимодействие с УНЧ-волнами (на частоте 1...10 Гц) [3].

На ИСЗ "Метеор-3" (высота 1250 км) регистрировались электроны с энергией $E_e > 30$ МэВ и протоны с $E_p > 400$ МэВ. Было зафиксировано 36 резких флуктуаций темпов счета (свыше пяти стандартных отклонений) продолжительностью 1...8 минут; 34 произошли в отсутствие заметных геомагнитных возмущений и группировались на $L=1.1...1.25$. Около 70 % возрастаний в скорости счета зарегистрированы при повышенной глобальной сейсмичности (выше среднесуточного числа землетрясений, вычисленного за период 2 года); в 70 % сеансов, в которых скорость счета оста-

валась на среднем уровне, глобальная сейсмичность была ниже средней. Получено, что появление отклонения скорости счета предшествует землетрясению с $M > 4$ приблизительно на 2-3 часа. Оказалось также, что отмеченная особенность в распределении сохраняется только для землетрясений с эпицентрами, расположенными только на суше [26].

На ИСЗ "ИКБ-1300" в том же диапазоне энергий также было обнаружено 11 случаев отклонений скорости счета высокоэнергичных захваченных частиц, причем в 5 случаях в интервале 2.5-3 часа после начала отклонения зафиксированы землетрясения с $M > 4$ [26]. В [27] указано на наличие пространственной взаимосвязи между координатами очагов землетрясений и областями регистрации высыпаний энергичных заряженных частиц.

На ИСЗ "Ореол-3" из 20 пролетов, на которых на $L=1.25 +/- 0.1$ были зарегистрированы возрастания потоков электронов с энергией $E_e > 100$ кэВ, в 18 случаях на $L < 1.3$ в долготном интервале +/-60° имели место землетрясения с $M > 4$ [13].

В отдельных публикациях [28] сообщалось о регистрации непосредственно перед Спитакским землетрясением

07.12.1988 г. потока релятивистских электронов с энергией не менее нескольких МэВ: вертикальным телескопом космических лучей и одиночным счетчиком, установленными на шаре-зонде, запущенном вблизи Еревана. За 41 минуту до главного удара, во время подъема зонда, начиная с глубин 500 г/см^2 было зарегистрировано увеличение потока проникающих частиц, намного превышающее статистические ошибки.

Из недавних результатов следует отметить эксперимент

по регистрации электронов с энергией $E_e = 17.7...277 \text{ кэВ}$ на борту ИСЗ "Интеркосмос-24" (на высотах 2300-2500 км), пролетавшего вблизи эпицентра сильного Иранского землетрясения перед главным толчком 20.06.1990г. (21:00:09 UT, $M=6.4$, 37°N , 49.4°E) и перед сильным афтершоком 21.06.1990 г. (09:02:14, $M=5.8$). На рис.6 приведен пример, когда резко изменился характер флуктуаций потоков электронов по трем каналам за 16 часов до главного удара (рис.6а) и за 3 часа до афтершока (рис.6б) [29].

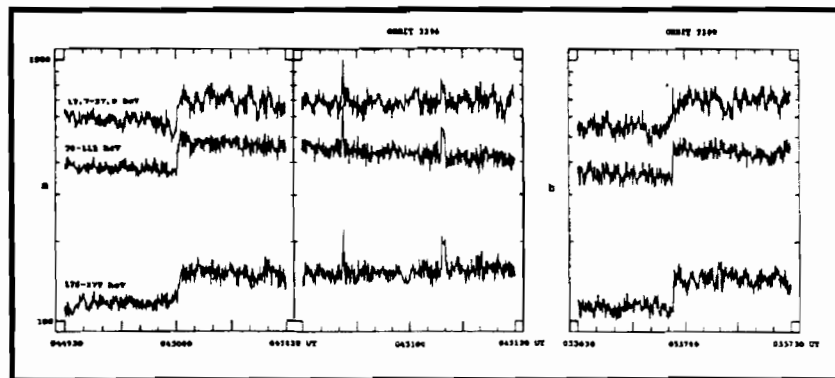


Рис.6. Временная (vt) зависимость потоков электронов $(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср} \cdot \text{кэВ})^{-1}$ с 3 уровнями энергии (кэВ): а - за 16 часов до главного толчка, б - за 3 часа до сильного афтершока

Свечение ночного неба

Остановимся в основном на изучении поведения зеленой эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм и красной линии 630.0 нм , поскольку они отражают в

соответствующих областях ионосферы динамику происходящих там физических явлений. Действительно:

- максимум излучения

линии 557.7 нм локализован на высотах $95...105 \text{ км}$, толщина излучающего слоя - 8 км ;
- толщина светящегося слоя эмиссии 630.0 нм составляет около 50 км , максимум излучения практически совпадает с высотой максимума F2-слоя ($250...300 \text{ км}$), вариации эмиссии практически отражают вариации электронной плотности на высоте свечения.

Анализировалось за период 1974-1982 г.г. около 400 землетрясений с $M < 4$, происшедших в радиусе $< 200 \text{ км}$ от Абастуманской обсерватории [2,18,30]. Из анализа были исключены периоды наблюдения с повышенной геомагнитной активностью ($Kp > 4$). Результаты приведены на рис.7, где представлены вариации отклонения средней за ночь интенсивности линии 557.7 нм (а, б) и линии 630.0 нм (в, г) от ее среднесезонного значения. Представлены средние значения за 8 часов (а, в) и за сутки (б, г). Основные результаты [31]: за 3 суток до главного толчка интенсивность линий 557.7 нм и 630.0 нм превышают среднесе-

зонное значение примерно на 15% ; за 2 суток - интенсивность зеленой линии изменяется относительно среднесезонного значения в пределах вероятной ошибки, а красной линии - относительно понижается, оставаясь абсолютно повышенной; за 1 сутки интенсивность линии 557.7 нм увеличивается, за 6 часов возрастает в среднем до 7% относительно среднесезонного значения, тогда как интенсивность линии 630.0 нм - уменьшается и достигает минимума за 4-6 часов до толчка. В среднем уменьшение составляет $15 \pm 3 \%$ относительно среднесезонного значения. В первые часы после землетрясения отмечается 7% повышение интенсивности в обеих линиях.

Для более сильных землетрясений с $M > 4$ отмеченные эффекты выражены гораздо более ярко: интенсивность в линии 557.7 нм за 5-6 часов может быть в 2.5 раза выше среднесезонного значения, а для линии 630.0 нм за 2 часа до события - в 4 раза ниже среднесезонного [30].

Изменение свойств ионосферной плазмы

Анализ высотно-частотных характеристик ионосферы показывает, что за 2-3 суток до землетрясения над эпицентром

появляются неоднородности, которые могут сохраняться несколько суток спустя. И если ионосферные эффекты, связан-

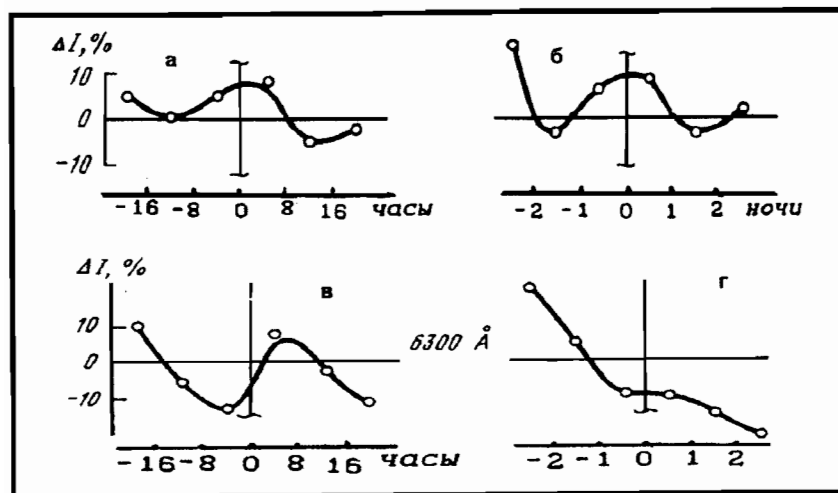


Рис. 7. Вариации отклонения средней за ночь интенсивности линии 557.7 нм (а, б) и линии 630.0 нм (в, г) от ее среднесезонного значения, в том числе: за 8 часов (а, в) и за сутки (б, г) до землетрясений.

ные с землетрясениями, в F-слое затрагивают средние характеристики параметров слоя, то в E-области основные сейсмоионосферные эффекты связаны со спорадическими слоями E_s.

В эксперименте на ИСЗ АЕ-С (высота 150 км) измерялся ионный и нейтральный состав, плотность и температура нейтралов и положительных ионов. И только для плотности ионов за 14 часов до толчка над эпицентром готовящегося землетрясения были зафиксированы аномальные вариации, выразившиеся в образовании над очагом локального "провала" в концентрации плазмы, доходящего до 20 % [5].

Аналогичные результаты были получены на спутнике ISIS-2 (круговая орбита 1400 км, т.е. выше максимума F-слоя), когда за 6.5 часов до начала землетрясения 11.07.1971 г. и за 2 часа - 09.09.1971 г. при пролете вблизи очага наблюдался локальный провал в распределении электронной плотности (на 15-20 %) и небольшое соответствующее повышение электронной температуры [5].

По данным спутниковых измерений состава и температуры холодной плазмы на средних широтах в спокойных геомагнитных условиях поведение легких ионов (H⁺, He⁺) характеризуется тем, что их распре-

ления достаточно гладкие и монотонно спадают с ростом инвариантной широты к резкому провалу на широтах 42-45°. Поэтому они являются достаточно удобным параметром для обнаружения аномальных отклонений [32]. Яркий пример - измерения на ИСЗ "Интеркосмос-24" (перед Иранским землетрясением 1990 г. и перед сильными афтершоками), когда за время от нескольких часов до 2 суток до главного удара зарегистрировано:

* возрастание плотности легких ионов в узкой широтной области над зоной готовящегося землетрясения;

* наблюдались большие возрастания плотности легких ионов на долготах, расположенных ближе к зоне готовящегося землетрясения;

* наибольшая концентра-

ция легких ионов отмечена на меридиане эпицентра по всей широтной области наблюдавшейся аномалии;

* в подготовительную фазу землетрясений усиливалась анизотропия температур (по результатам одновременного измерения температуры электронов) [29].

По данным ИСЗ "Интеркосмос-19" в результате внешнего зондирования ионосферы накоплен обширный материал по сейсмоионосферным эффектам [33,34]. Для анализа отбирались землетрясения с M < 6.5 глубиной < 60 км, происшедшие в сравнительно спокойных геомагнитных условиях, для которых имелись одновременные данные наземных станций по вертикальному зондированию. На рис.8 приведено сравнение суточных вариаций f_oF2

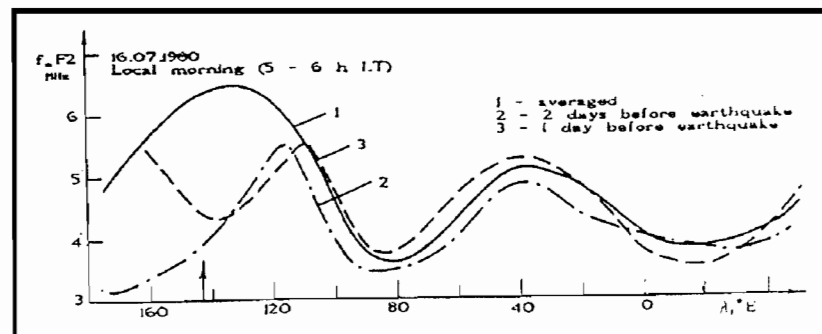


Рис. 8. Сравнение суточных вариаций f_oF2 (сплошные кривые) с месячными медианами (штриховые линии) для интервала времени 00-09 LT: 1 - за несколько суток до, 2 - в момент; 3 - после толчка. Момент землетрясения показан стрелкой, а данные f_oF2 - черными точками.

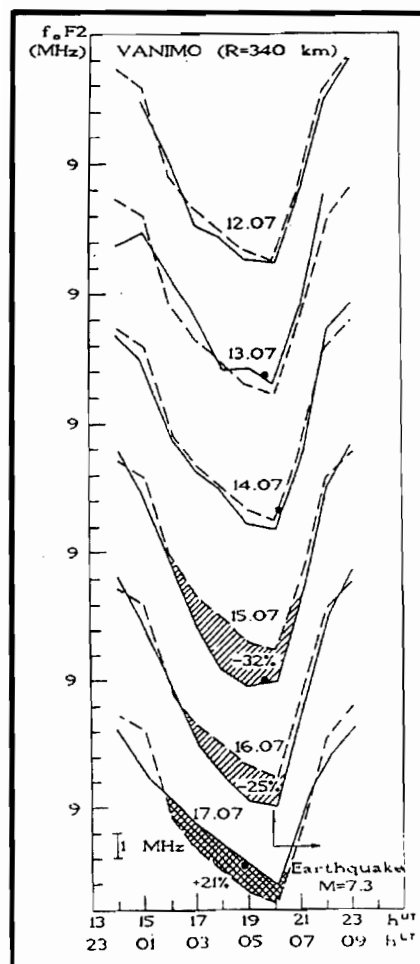


Рис. 9. Долготные вариации f_oF2 в утренние (05-06^hLT) для широт землетрясения 16.07.1980 г.:

1 - средняя кривая, полученная по нескольким сеансам спутника; 2 - за 2 дня; 3 - за 1 день до землетрясения. Долгота эпицентра показана стрелкой

(сплошные кривые) с месячными медианами (штриховые линии) для интервала времени 00-09^hLT по данным станции VANIMO (2.7°S, 141.3°E) за несколько суток до, в момент и после толчка 16.07.1980 г. Расстояние от станции до эпицентра составляло 340 км. На рисунке видна зависимость от местного времени. За двое суток изменение электронной плотности составляет -18 %, достигает максимума - 55 % примерно за сутки до события и в день землетрясения составляет - 40 %. На следующие сутки наблюдалось незначительное превышение концентрации относительно среднемесячного уровня.

На рис.9 приведены долготные вариации f_oF2 в утренние (05-06^hLT) для широт землетрясения 16.07.1980 г. по данным того же спутника соответственно за 2 и 1 день до землетрясения по отношению к средним значениям, полученным по нескольким сеансам в спокойный период. Хорошо видно, что на всех долготах вне очага землетрясения за весь период наблюдений долготные вариации f_oF2 носят устойчивый характер, а на долготах очага наблюдаются резкие отклонения от регулярного для данного местного времени долготного хода, особенно сильные за сутки

до землетрясения, изменение концентрации составляет - 60 %.

Резюмируя данные анализа землетрясения 16.07.1980 г., можно сделать следующие выводы:

* аномальные возмущения

критической частоты, связанные с очагом землетрясения, начинают проявляться за 2-3 суток и максимальны за 0.5...1 суток до момента толчка, амплитуда отклонения значения электронной плотности достигает 60 %;

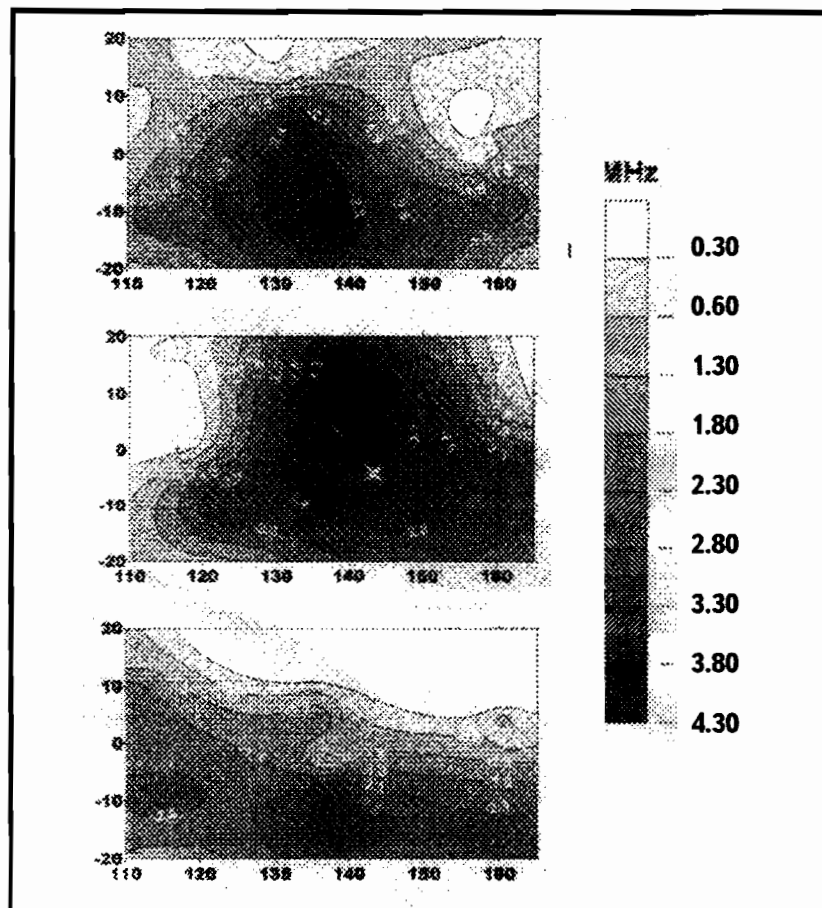


Рис. 10. Отклонения критической частоты от исходного распределения в отсутствие сейсмической активности. Изолинии приведены в географических координатах соответственно за двое суток, сутки и на следующий день после землетрясения 16.07.1980 г., эпицентр которого показан на рисунке звездочкой

* поперечные размеры области возмущений по широте достигают 15° , по долготе - 40° ;

* область возмущения сдвинута к северу от эпицентра на 7° и к востоку на $5-7^\circ$;

* эффекты возмущения наблюдаются в основном в утренние и дневные часы.

Сделанные выводы хоро-

шо иллюстрируются рис.10, на котором приведены отклонения критической частоты от исходного распределения в отсутствие сейсмической активности.

Следует отметить, что аналогичные результаты были получены для Итальянского землетрясения 23.11.1980 г. [35].

В заключение следует отметить, что в нашем обзоре представлены те предвестники, которые могут быть зарегистрированы аппаратурой, установленной на спутниках. Поэтому не рассмотрены такие новые факты, как выбросы аэрозолей с большим содержанием металлов, которые имеют место как до, так и некоторое время после землетрясения и могут вызывать определенные эффекты в атмосфере, а также в D- и E-слоях ионосферы [36, 34], опущено описание возмущений в спорадическом слое E, изменение интенсивности сигнала на радиотрассах. Представляют интерес такие методы исследования, как доплеровское зондирование верхней ионосферы, исследование потока уходящего инфракрасного излучения Земли над Среднеазиатским сейсмоактивным регионом (на основе анализа ежесуточных ночных снимков в диапазоне $10.5...11.3$ мкм со спутника "Тайрос", высота 500 км, показано существование стационарных и нестационарных положительных аномалий этого потока) [37]. Очень подробно все эти методы и явления описаны в работе [18].

Ниже приведены основные экспериментальные результаты по регистрации явлений в ионосфере, предшествующих землетрясениям:

* по данным ИСЗ "ОГО-6", "ГЕОС-1 и -2", "Космос-1809", "Интеркосмос-19, -24", «Интеркосмос-Болгария-1300», "Ореол-3" за несколько суток до землетрясения регистрируются аномалии электромагнитного излучения в КНЧ-ОНЧ-

диапазоне, имеющие размеры: вдоль параметра L - несколько тысяч км, вдоль меридианов - около тысячи км;

* по данным ИСЗ "ИКБ-1300", "Ореол-3", "Метеор-3", "Интеркосмос-24", орбитальных станций "Салют-7" и "Мир" существует пространственная и временная корреляция между изменениями интенсивности энергичных (в диапазоне энергий от сотен кэВ до десятков МэВ) заряженных частиц и сильными землетрясениями;

* по данным наземных наблюдений за свечением ночного неба за несколько суток до землетрясений отмечается повышенное значение интенсивности эмиссии зеленой линии кислорода 630.0 нм, которое за сутки до события сменяется пониженным и достигает минимума за несколько часов до землетрясения;

* спутниковыми плазменными измерениями и методами по высокочастотному зондированию ионосферы получено (ИСЗ АЕ-С, ISIS-2, "Интеркосмос-24, -19"), что за 2-3 суток до землетрясения происходит изменение свойств ионосферной плазмы.

И хотя при сейсмических явлениях трудно ожидать возмущений в ионосфере с большими амплитудами, тем более что большое количество факторов, определяющих возмущения ионосферных параметров, существенно усложняют интерпретацию экспериментальных данных, в настоящее время разработана соответствующая диагностическая аппаратура, которая позволяет, по нашему мнению, адекватно регистрировать на спутниках предвестники землетрясений [38].

Таким образом основной вывод данной работы можно сформулировать следующим образом: обнаруженные явления и современный уровень развития экспериментальной техники и теории позволяют вести работы по разработке проектов по созданию системы регистрации в ОКП космофизических явлений, предшествующих землетрясениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никонов А.А. Землетрясения ...Прошлое, современность, прогноз // 1984. М. "Знание". с.6-7.
2. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф // 1981. М."Недра". с.49.
3. Молчанов О.А. Прохождение электромагнитных полей от сейсмических источников в верхнюю ионосферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т.31. № 1. с.111-119.
4. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления // М. Наука. 1988.
5. Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. Наблюдение со спутника электромагнитного излучения над эпицентральной областью готовящегося землетрясения // ДАН СССР.1983.Т.268. № 1. с.56-58.
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 аэрономия. 1983. Т.23. с.842.
7. Ларкина В.И., Мигулин В.В., Молчанов О.А. Некоторые статистические особенности возбуждения низкочастотных излучений в верхней ионосфере над районами землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т.28. с.812.
8. Larkina V.I., Migulin V.V., Molchanov O.A. et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones // Phys.Earth Planet.Inter. 1989. V.57. p.100.
9. Ларкина В.И. Исследование низкочастотных излучений над сейсмоактивными районами // Космонавтика и экология: концепции и технические решения. 1990. Туансе. Сб.тезисов докладов. с.21-22.
10. Parrot M., Lefevre F. Correlation between GEOS ULF emission and earthquakes // Ann.Geophys. 1985. V.3. p.737.
11. Galperin Yu.I., Gladyshev V.A., Sagdeev R.Z. et al. VLF and ULF effects in the upper ionosphere caused by large-scale

- acoustic waves in the lower ionosphere observed from Aureol-3 satellite // Results of the ARCAD-3 project. Toulouse. 1984. p.661.
12. Larkina V.I., Migulin V.V., Mogilivsky M.M. et al. Earthquake effects in the ionosphere according to Intercosmos-19 and AUREOL-3 satellites data // Results of the ARCAD-3 project. Toulouse. 1984. p.685.
 13. Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Джорджио Н.В. и др. Высыпание энергичных захваченных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Космич.исслед., 1992. Т.30. с.89.
 14. M.Parrot. Electromagnetic disturbances associated with earthquakes: an analysis of ground based and satellite data // J.Sci.Explor. 1990. № 3. p.23.
 15. M.Parrot. Statistical study of ELF/Vlf emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events // J.Geophys.Res. 1994. V.99. p.23339.
 16. Чмырев В.М., Исаев Н.В., Биличенко С.В.. Электрические поля и гидромагнитные волны в ионосфере над очагом землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т.26. с.1020.
 17. Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Stanev G. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over the earthquake centre // Phys.Earth and Planet inter. 1989. V.72. p.110.
 18. Луперовский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений // М. Наука. 1992. с.192.
 19. Bilichenko S.V., Inchin A.S., Kim et al E.F. ULF-response of the ionosphere on pre[earthquake processes // DAN (Doklady). 1990. V.311. p.1077.
 20. Биличенко С.В., Серебрякова С.Н., Похотелов О.А., Чмырев В.М. Электромагнитные УНЧ/КНЧ предвестники землетрясений в ионосфере // Космонавтика и экология: концепции и технические решения. 1990. Туансе. Сб.тезисов докладов. с.52-53.

21. Serebryakova O.N., Bilichenko S.V., Chmyrev V.M. et al. *Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellite // Geophys.Res.Lett.* 1992. V.19. p.91.

22. Michaylova G.A., Golyavin A.M., Mikhaylov Yu.M. *Dynamic spectra of VLF-radiation in the outer ionosphere associated with the Iranian earthquake of June 21,1990 (Intercosmos 24 satellite) // Geomagn.Aeron (engl. transl.).* 1991. V.31. p.80.

23. Воронов С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г. и др. *Регистрация возрастания потоков высокоэнергичных частиц в районе Бразильской аномалии 10 сентября 1985 г. // Космич. исслед.* 1989. Т.29. с. 629.

24. Воронов С.А., Гальпер А.М., Колдашов С.В. и др. *Возрастание потоков заряженных частиц высоких энергий в области Бразильской аномалии и сейсмичность Земли // Космич.исслед.* 1990.Т.28. с.789.

25. Алешина М.Е., Воронов С.А., Гальпер А.М. и др. *О взаимосвязи положений очагов землетрясений и областей высыпаний высокоэнергичных частиц из радиационного пояса // Космич. исслед.* 1992. Т.30. с.79.

26. Гальпер А.М., Дмитриенко В.В., Никитина Н.В. и др. *Взаимосвязь потоков высокоэнергичных заряженных частиц в радиационном поясе с сейсмичностью Земли // Космичес.исслед.* 1989. Т.27. с.789.

27. Алешина М.Е., Воронов С.А., Гальпер А.М. и др. *Высыпание высокоэнергичных частиц из радиационного пояса Земли и сейсмическая активность // Изв.АН СССР. Сер.физическая.* 1993. Т.57. с. 97.

28. Асатрян Г.А., Асатрян Гр.А., Бабаян В.Х. и др. *Скачок интенсивности ионизирующей компоненты космических лучей в стратосфере в период Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. // Изв.АН СССР. Сер.физическая.* 1991. Т.55. с.500.

29. J.Boskova, J.Smilauer, P.Triska, K.Kudela. *Anomalous behaviour of plasma parameters as observed by the Intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 june 1990 // Studia geoph. et geod.* 1994. V.38. p. 213.

30. Fishkova L.M., Gokhberg M.B., Pilipenko V.A. *Relation-ship between night air glow and seismic activity // Ann. Geophys.* 1985. V.3. p.679.

31. Фишкова Л.М., Торошелидзе Т.И. *Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба // ВИНТИ.* 1989. М. № 33. с.17.

32. J.Boskova, J.Smilauer, F.Jiricek, P.Triska. *Is the ion composition of the outer ionosphere related to seismic activity? / J.Atm.Terr.Phys.* 1993. V.55. p.1595.

33. Pulinets S.A. *Prospects of topside sounding // WITS Handbook, published for SCOSTEP, Urbana,II. ed.by C.H.Liu.* 1989.V.2. p.99.

34. Pulinets S.A., Legenka A.D., Alekseev V.A. *Pre-earthquake effects and their possible mechanisms // In "Dusty and dirty plasmas, noise and chaos in space and in the laboratory". Plenum Publishing. NewYork.* 1994. p.545.

35. Legenka A.D., Pulinets S.A., Gregory S.D. *Reaction of the ionosphere to the Italian earthquake of November 23, 1980 // Preprint. IZMIRAN. Moscow.* 1995. 17 pp.

36. Alekseev V.A., Alekseeva N.G. *Investigation of metal transfer in the ionosphere during gaseous emission in zones of tectonic activity using methods of nuclear-physics // Nucl. Geophys.* 1992. V.6. p.163.

37. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. *Уходящее инфракрасное излучение Земли - индикатор сейсмической активности // Докл. АН СССР.* 1988. Т.301. с.67.

38. Беляев М.И., Гальпер А.М., Григорян О.Р. и др. *Программа исследований предвестников сейсмической активности Земли на автономном экологическом модуле "Гамма-Э" // Труды XXVI чтений К.Э.Циолковского. ИИЕТ РАН.* 1992. М. с.20.