

7. Намгаладзе А.А., Ю.Н.Кореньков, В.В.Клименко, И.В.Карпов, Ф.С.Бессараб, В.А.Суроткин, Т.А.Глущенко, Н.М.Наумова. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т.30. №4. С.612-619. 1990.
8. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. 1998. Т.168, №5. С.582-589.
9. Пулинец С.А., Легенька А.Д. Динамика приэкваториальной ионосферы в период подготовки сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т.42. №2. С.239-244.
10. Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т.42. №6. С.821-830.
11. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // Rus. J. Earth Sci. 2004. V.6, №5. P.339-354.
12. Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Stanev G.A. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over on earthquake center // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989.V.57. P.110-114.
13. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M.. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1991. V.53. №11/12. P.1113-1124.
14. Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2003. V.65. P.1337-1347.
15. Pulinets S.A. and Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, Berlin, Germany. 2004. 315p.
16. Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh. Seismoprecursors in Space as Plasma and Wave Anomalies // J. Atmosph. Electr. 1996. V.16. №3. P.251-288.
17. Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I. Modification of the low-latitude ionosphere before December 26, 2004 Indonesian earthquake // Nat. Hazards and Earth System Sci. 2006. V.6. P.817-823.

## **КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ НИЗКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

### **SPACE MONITORING OF LOW ENERGY ELECTRON FLUXES WITH THE PURPOSE OF EARTHQUAKE FORECAST**

***В.М. Панков, О.Л. Вайсберг, Е.Н. Евланов, А.А. Гусев, В.Н. Смирнов,  
Г.И. Пугачева, Н.С. Ерохин***

*Институт космических исследований РАН*

We give a detailed analysis of early performed space experiments directed to the search of earthquake precursors by satellite equipment. New suggestions of the space experiments devoted to global space monitoring of low energy electron fluxes at the satellite orbit with the purpose of elaboration of earthquake forecasting modern methods are described.

#### **Введение**

Одной из наиболее важных проблем современной геофизики является проблема прогноза землетрясений. Традиционный сейсмический мониторинг, существующий уже около 150 лет, пока не привел к выработке методов достоверного прогноза землетрясений. В то же время развитие космической геофизики, использующей космические аппараты (КА) для исследования разнообразных природных явлений в атмосфере и на поверхности Земли (цунами, циклоны, молнии, землетрясения, и др.), открывают перспективу для поиска в ближнем космосе физических эффектов, способных служить надежными

предвестниками землетрясений. Наземные обсерватории, как бы они хорошо ни были оснащены, дают лишь локальную информацию, тогда как спутниковые методы обеспечили бы глобальный обзор и выявление всех сейсмоактивных зон, а также региона возможного крупного землетрясения.

Более двадцати лет тому назад по данным спутника "Интеркосмос-19" был обнаружен эффект резкого возрастания интенсивности низкочастотных электромагнитных излучений в верхней ионосфере над зоной готовящегося и затем происходящего землетрясения с амплитудой 5 баллов и выше [5, 3]. Появление всплесков широкополосного электромагнитного низкочастотного излучения над эпицентрами крупных землетрясений за несколько часов до события был подтвержден наблюдениями и на других космических аппаратах [1, 6-8, 10-12]. Например, на КА "Космос-1809" детектировались электромагнитные сигналы с частотами 140 Hz и 450 Hz после М6+ землетрясения в Спитаке, Армения, в 1989 году, причем эти сигналы регистрировались в течение всего времени прохождения спутником области размерами  $\pm 6^\circ$  широты и долготы от эпицентра землетрясения [13].

Данные, полученные с российских и зарубежных спутников, позволяют сделать вывод о том, что сейсмоионосферные электромагнитные шумы в широком диапазоне частот от 0.1 Гц до 20 кГц длительное время присутствуют в области над эпицентром готовящегося землетрясения, что в принципе, могло бы быть положено в основу разработки прогноза сейсмособытий. Установлено, что широтная протяженность зоны регистрации всплесков составляет  $\pm 3^\circ$ , а долготная  $\pm 60^\circ$ , то есть всплески наблюдаются в виде «шумового пояса», вытянутого вдоль геомагнитной широты эпицентра. До землетрясения наблюдается как магнитная, так и электрическая компоненты поля шумовых излучений; после землетрясения преобладает электрическая составляющая [4,9].

К настоящему времени возникла и развивается новая научная дисциплина «сейсмоэлектромагнетизм», занимающаяся анализом связи мощных сейсмических событий с электромагнитным излучением. Предполагается, что при разломе горных пород в эпицентре землетрясения (см. Рис.1), в районе площадью несколько десятков километров, на глубинах 5-80 км возникают акустические волны в УНЧ и КНЧ диапазонах. Они проникают через атмосферу в ионосферу (100-200 км), где приводят к появлению электромагнитных волн, которые затем распространяются вдоль силовых линий геомагнитного поля (изменяя при этом характеристики захваченной радиации) на высоты орбит спутников (400-1000 км), где и могут быть зарегистрированы соответствующей аппаратурой. Однако крайне ограниченный объем, имеющейся в настоящее время экспериментальной информации, не позволяет установить механизмы наблюдаемых всплесков электромагнитных излучений и разработать детальную теорию явления.

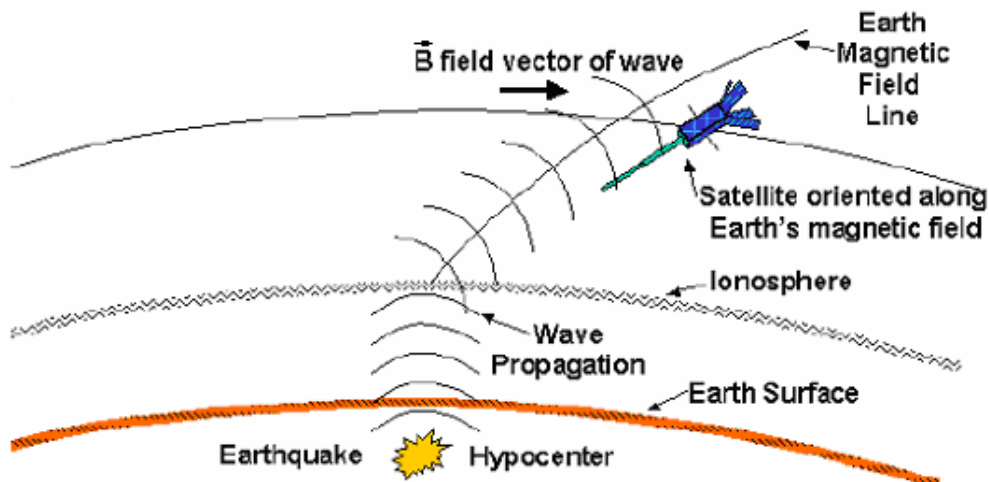


Рис.1. Сценарий распространения сейсмоэлектромагнитных волн.

В исследованиях сейсмоэлектромагнетизма и разработке методов спутникового сейсмического мониторинга участвуют практически все страны, где происходят сильные разрушительные землетрясения, а именно: Россия, Япония, Соединенные Штаты, Индия, Тайвань, Китай, Италия (см. сайт: [www.ntsomz.ru/news/news\\_kosmos/vittori\\_8\\_feb\\_2005](http://www.ntsomz.ru/news/news_kosmos/vittori_8_feb_2005)), Мексика (см. сайт: [www.ntsomz.ru/news/news\\_kosmos/earth\\_8\\_jan\\_2005](http://www.ntsomz.ru/news/news_kosmos/earth_8_jan_2005)) и Франция.

### **1. Спутниковые эксперименты по разработке методов прогнозирования землетрясений**

В настоящее время выполняется несколько спутниковых экспериментов, целью которых является исследование связи электромагнитных излучений с землетрясениями. В частности на борту американского микроспутника "Quakesat", запущенного 30 июня 2003 с космодрома Плесецк ракетоносителем "Рокот", установлена аппаратура для регистрации КНЧ/ОНЧ излучений, ассоциированных с землетрясением.

Первая возможность проверить технологию "Quakesat" представилась 22 декабря 2003, когда при пролётах над районом г.Сан Симеон, Калифорния, спутник начал регистрировать КНЧ сигналы, ассоциированные впоследствии с происшедшим там через месяц 6.5 бальным землетрясением. Французский спутник "Aureol-3" также регистрировал КНЧ, проходя над активными сейсмическими зонами [11].

29 июня 2005 г. с Байконура ракетой-носителем "Днепр" был запущен ещё один французский микроспутник "Demeter" (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions), для изучения ионосферных возмущений, связанных с естественными геофизическими явлениями, такими как землетрясения, цунами и др. и, в особенности, для исследования электромагнитных эффектов, предшествующих землетрясению, и их прогноза. Вес спутника 125 кг.

В рамках совместного проекта между Автономным Национальным Мексиканским Университетом (UNAM) и Московским государственным университетом предполагается запуск в 2008-2009 г.г. 10-ти килограммового спутника с аппаратурой для прогнозирования землетрясения по концентрации ионосферного радона. В программу исследований входит также измерение концентрации электронов в ионосфере и наблюдения за характеристиками электромагнитных полей, динамика которых может свидетельствовать о скором землетрясении. (CNews.ru [http://www.ntsomz.ru/news/news\\_cosmos/earth\\_28\\_jan\\_2005](http://www.ntsomz.ru/news/news_cosmos/earth_28_jan_2005))

На основе малых спутников в ИЗМИРАНе создаётся комплексная многофункциональная геокосмическая система "Вулкан" для прогноза и мониторинга природных и техногенных катастроф. Система позволит осуществлять глобальное наблюдение за поверхностью, атмосферой и ионосферой Земли и обнаруживать электромагнитные предвестники землетрясений, предсказывать координаты их эпицентров и время начала катастроф. Данная система создается в рамках федеральной космической программы России. Заказчиком является Росавиакосмос, а головным исполнителем космического сегмента – НИИ электромеханики. На ИЗМИРАН возложено научное руководство проектом, разработка и изготовление приборов. Ожидается, что система обеспечит краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный прогноз стихийных бедствий для служб по чрезвычайным ситуациям в России и других странах мира.

Система включает в себя:

- группировку малых КА, размещаемых на круговых орбитах с высотами (400–500) км и (900–1100) км, наклоном 82°;
- комплекс наземных геофизических обсерваторий и станций приема и обработки информации;
- ситуационный центра на базе ЦУП ИЗМИРАНа.

Система создаётся в несколько этапов. Первым из них был запуск в 2003 г. микроспутника «Компас-2», разработанного в ИЗМИРАНе совместно с Государственным ракетным центром "КБ им. академика В.П.Макеева". К сожалению, из-за технических

неполадок эксперимент не дал результатов. Следующие спутники планируется запускать с помощью РН "Рокот" или "Стрела" по два или три КА одновременно. Низкоорбитальная группировка будет состоять из 12 КА по три в каждой орбитальной плоскости. Высокорабитальная группировка будет состоять из шести КА по три КА в двух плоскостях.

## **2. Экспериментальная методика мониторинга землетрясений из космоса**

### **2.1. Мониторинг электромагнитных процессов в ионосфере и магнитосфере**

Мониторинг предвестников землетрясений из космоса включает наблюдение целого ряда электромагнитных эффектов в ионосфере и магнитосфере Земли, таких как: электромагнитные волны низкой частоты, слабые флуктуации геомагнитного поля (регистрируемые, например, магнитометром на борту космического аппарата "Quakesat"), концентрация электронов в ионосфере, динамика потоков энергичных частиц радиационных поясов Земли. Необходимо отметить, что спутниковые исследования ионосферных фоновых электромагнитных излучений в звуковом диапазоне частот проводятся в нашей стране многие годы.

Для исследования дискретных сигналов и детального изучения спектра шумовых и квазишумовых излучений применяются широкополосные приемники. Как правило, эти приемники используются совместно с анализаторами спектра, дающими информацию об абсолютной интенсивности и пространственном распределении частот излучений. Однако, применение подобных методов в течение уже двух десятилетий пока не привело к существенному улучшению ситуации с выработкой методов прогноза сейсмической опасности. Такая ситуация обусловлена в основном трудностью идентификации именно сейсмоэлектромагнитных достаточно слабых сигналов на фоне имеющегося колоссального многообразия электромагнитных всплесков, обусловленных, в частности, динамикой магнитосферы.

### **2.2. Исследование связи динамики потоков низкоэнергичных электронов в магнитосфере с сейсмической активностью**

В отличие от описанного выше метода, для поиска сейсмоэлектромагнитных эффектов, мы предлагаем использовать наблюдение за потоками достаточно низкоэнергичных (0.1–20) кэВ электронов. Как было показано Ю.Гальпериним [2] на основе данных спутника "Ореол-3", за несколько часов до начала землетрясения над его эпицентром наблюдаются одновременные всплески интенсивности низкочастотных (0.01–20) кГц излучений и потоков электронов с энергиями  $E > 40$  кэВ и  $E > 100$  кэВ. Эта одновременность объясняется тем, что электромагнитные излучения естественного и искусственного происхождения, взаимодействуя с электронами РПЗ и ионосферными электронами (ускорение электростатическим полем волны и рассеяние магнитной компонентой), ускоряют их, вызывая изменения их спектров, а также рассеивают их, изменяя их пичч-угловое распределение, что, в свою очередь, приводит к высыпаниям электронов.

Таким образом, функция распределения электронов может играть роль своеобразного детектора электромагнитного излучения. Его преимуществом является большее (по сравнению с электромагнитным излучением) время жизни захваченных электронов, позволяющее в течение некоторого времени сохранять в их энергетическом и пичч-угловом распределениях "отпечаток" взаимодействия с электромагнитным излучением. Вследствие этого вариации потоков низкоэнергичных электронов могут более надёжно детектироваться и служить эффективным предвестником землетрясений.

Для изучения связанной с сейсмоактивностью динамики распределений низкоэнергичных электронов, предлагается использовать два электростатических спектрометра – приборы "КАМЕРА-Э" и "АСЭ-Е" с сильно отличающимися геометрическими факторами, с целью обеспечить максимальный динамический диапазон

измерений потоков электронов, Это необходимо вследствие существующей неопределенности в величине потоков и угловых распределений электронов, ассоциированных с землетрясениями.

Прибор КАМЕРА-Э позволяет измерять энергетические распределения в диапазоне энергий (0.01-15) кэВ с достаточно высокой точностью до 7%, и угловые распределения в телесном угле  $2\pi$  с разрешением до  $5^\circ \times 5^\circ$  при высокой скорости опроса, что необходимо для получения распределений за короткое (несколько секунд) время нахождения КА над эпицентром события. Геометрический фактор прибора в  $3 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup>стер достаточен для регистрации электронов, высыпавшихся из радиационных поясов, достигающих интенсивности  $\sim (10^7-10^8)$  (см<sup>2</sup>стер с)<sup>-1</sup> в максимуме пояса, и  $\sim (10^5-10^6)$  (см<sup>2</sup>стер с)<sup>-1</sup> у подножия силовых линий в ионосфере. Таким образом, скорость счёта при регистрации высыпаний составит  $(10^3-10^5)$  сек<sup>-1</sup>. Подобные характеристики прибора являются уникальными, не имеющими аналогов среди аппаратуры, уже установленной на "LEO" для обнаружения связи с землетрясениями.

Прибор "АСЭ-Е<sup>2</sup>" регистрирует потоки электронов примерно в том же диапазоне энергий (0.1–20) кэВ и с энергетическим разрешением 0.5 кэВ. При этом его угловое разрешение существенно ниже, чем у предыдущего прибора (регистрируются все электроны попадающие в конус между  $35^\circ$  и  $65^\circ$ ). Однако преимуществом прибора является большой геометрический фактор (100 см<sup>2</sup> стер.), позволяющий зарегистрировать даже очень небольшие потоки электронов, связанные с сейсмоактивностью и "невидимые" спектрометром "АСЭ-Е" вследствие его небольшого геометрического фактора. Предполагается, что таким образом приборы способны зарегистрировать потоки электронов высыпавшихся под воздействием низкочастотного излучения как естественного, так и искусственного происхождения и/или резонансно ускоренные этим излучением. Нашей задачей является установить наличие связи между появлением таких потоков и мощными землетрясениями. По сравнению с приборами, регистрирующими непосредственно электромагнитное излучение, прибор, регистрирующий частицы, имеет преимущество поскольку "видит" эпицентр землетрясения, находясь не только непосредственно над ним, но и на соседних меридианах к востоку от эпицентра, куда дрейфуют электроны со скоростью  $V_D = 0.136 LE$  град/сек ( $E$  – энергия электрона в МэВ). Например, поток 7-кэВ электронов, возникший над эпицентром землетрясения, будет наблюдаться через 1,5 часа на меридиане, отстоящем от меридиана эпицентра на  $+15^\circ$ , и через 3 часа на меридиане  $+30^\circ$  и т.д. Линейная зависимость скорости дрейфа электронов от их энергии в принципе позволяет определить меридиан  $M_0$  их генерации, т.е. меридиан эпицентра события. Например, долготы меридианов, пересекаемых "LEO" при двух последовательных оборотах КА, составляют  $M_1$  и  $M_1+15^\circ$  при периоде в 90 мин. Тогда скорости дрейфа  $V_1$  и  $V_2$  электронов, возникших на меридиане  $M_0$  и регистрируемых при двух последовательных прохождениях, связаны очевидным соотношением:  $(M_1 - M_0)/V_1 = (M_1+15^\circ - M_0)/V_2 - 90 \text{ мин}$ , из которого однозначно определяется широта события  $M_0$ . Этот эффект полностью аналогичен наблюдаемому на геостационарных КА явлению дисперсных структур, используемого для определения места и времени инъекции частиц. Поскольку реальные распределения отличны от моноэнергетических, то  $V_1$  и  $V_2$  будут соответствовать минимальным энергиям регистрируемых спектров.

Дополнительно к этому, по номеру  $L$  оболочки, на которой была зарегистрирована особенность в функции распределении, возможно определение широты эпицентра. Естественно, что подобная методика должна быть промоделирована математически (например, определены линии равного поля на заданных  $L$ -оболочках на высоте КА и т.п.) с учётом реальных форм генерируемых спектров и проверена на событиях, произошедших во время функционирования приборов на орбите. Этот пример демонстрирует возможность использования вариаций электронной популяции для прогноза землетрясений. Основная же задача предлагаемого эксперимента заключается собственно в выявлении тех вариаций потоков электронов, которые могут быть пригодны для

прогноза. В настоящее время проведена проработка и обоснование принципов работы и основных характеристик приборов для описанного выше современного космического эксперимента, сроков их изготовления.

Необходимо подчеркнуть, что такие высокоточные приборы, как "КАМЕРА-Э", и "АСЭ-Е" впервые предлагаются для подобных исследований. Прибор "КАМЕРА-Э" будет использован также в эксперименте "РЕЗОНАНС" по изучению взаимодействия антропогенного электромагнитного излучения с плазмой. Как показывает опыт, решение проблемы выявления предвестников землетрясений оказывается весьма сложным. Применение для её решения современных, ранее неиспользованных, методов и экспериментальной аппаратуры, описанных выше, с учетом накопленных данных наблюдений позволит существенно продвинуться в нашем понимании механизмов сейсмоэлектромагнетизма и предсказания землетрясений.

#### Список литературы

1. Биличенко С.И., Инчин А.С., Ким Э.Ф. и др. ULF пульсации магнитного поля в ионосфере, ассоциируемые с землетрясениями // ДАН СССР. 1990. Т.311. № 5. С.1077-1081.
2. Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Ларкина В.И. и др. Высыпание энергичных захваченных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Космические исследования. 1992. Т.30. № 1. С.89-106.
3. Ларкина В.И., Наливайко А.В., Гершензон Н.И. и др. Наблюдения на спутнике "Интеркосмос-19" ОНЧ излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрномия. 1983. Т. 23. № 5. С. 842-845.
4. Ларкина В.И., Мигулин В.В. и др. Некоторые особенности возбуждения низкочастотных излучений в верхней ионосфере над районами землетрясений // Геомагнетизм и аэрномия. 1988. Т.28. № 5. С. 812-817.
5. Мигулин В.В., Ларкина В.И., Молчанов О.А. и др. Обнаружение эффектов воздействия землетрясений на ОНЧ-КНЧ шумы во внешней ионосфере. Препринт № 25 (390).-М.: ИЗМИРАН. 1982. 28 с.
6. Fraser A.C., Smith R. et. al. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // Geophysical Research Letters. 1990. V.17. No.9. P.1465-1468.
7. Hendersen T.R., Sonwalkwer V.S., Helliwell R.A. et al. Search for ELF/VLF Emissions Inducted by Earthquakes as Observed in the Ionosphere by the DE-2 Satellite // Journal of Geophysical Research. 1993. V.98. № A6. P.9503-9514.
8. Larkina V.I., Migulin V.V., Mogilevsky M.M. et al. Earthquake Effects in the Ionosphere according to the Intercosmos 19 and Aureol 3 Satellite Data, Results of the ARCAD 3 Project and of the Recent Programmes in Magnetospheric Physics. // Proceeding of International Conf., Toulouse, May 1984 /Ed. By CNES, CEPADUES-EDITIOS; P.685-699. 1985.
9. Larkina V.I., Migulin V.V., Molchanov O.A. et al. Some Statistical Results on Very Low Frequency Radio Wavv Emissions in the Upper Ionosphere over Earthquake Zones // Phys. Earth. Planet. Inter. 1989. V.57. P.100-109.
10. Molchanov O.A.,\_Mazhaeva O.A., Golyavin A.N. and M.Hayakawa. Observation by Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes // Ann. Geophysics. 1993. V.11. P.431-440.
11. Parrot M. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events // Journal of Geophysical Research. 1994. V.99. No.A12. P.23,339-23,347.
12. Rodger C.J., Thomson N.R., Dowden R.L. A Search for ELF/VLF Activity Associated with Earthquakes using ISIS Satellite Data // J. Geophys. Res. 1996. V.101. № A6. P.13369-13378.
13. Serebryakova O.N. et. al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites // Geophysical Research Letters. 1992. V.19. No.2. P.91-94.