УДК 538.338

# МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Н. А. Казакова, Б. М. Шинкевич**

**Обсуждается возможность физического обоснования появления электромагнитных предвестников сильных землетрясений и описан исследовательский измерительно-вычислительный комплекс для мониторинга таких предвестников. Исследованы изменения электродинамических параметров ионосферы, вызывающие изменение амплитуды принимаемых радиосигналов на сверхдлинноволновых радиотрассах, усиление собственной волновой структуры $F2$-слоя и образование спорадического $E_s$-слоя (экранирующий эффект) в ионосфере.**

## Введение

Несмотря на то, что в последние годы выявлены многочисленные предвестники различного рода, наблюдавшиеся в разных регионах мира перед сильными землетрясениями, проблема прогноза землетрясений остается по-прежнему актуальной.

Процессы подготовки землетрясений, проходящие в литосфере Земли, проявляются не только на ее поверхности, но и в ионосфере. Более того, ионосферные возмущения, связанные с литосферными процессами, гораздо доступнее для обнаружения и регистрации радиофизическими методами. В связи с этим представляет интерес систематизировать сведения о сейсмоионосферных предвестниках и их параметрах.

Целью исследований, проводимых нами в этом направлении, было выделение основных ионосферных параметров, подверженных изменениям в процессе подготовки землетрясения.

К аномальным явлениям, наблюдаемым в сверхдлинноволновом радиодиапазоне (СДВ) в процессе подготовки землетрясения, относятся изменения параметров излученного радиопередатчиком электромагнитного сигнала, прошедшего по трассе вблизи сейсмоактивных районов. Из научно-технической литературы [1, 2] известно об аномальных изменениях распространяющихся СДВ-радиосигналов, которые могут трактоваться как отклик на процессы в приземной атмосфере. Авторами этих работ анализировалось аномальное поведение сигналов, т. е. вариации амплитуды и фазы СДВ-сигнала по отношению к фоновым, наблюдаемые за несколько суток до землетрясений на трассах, проходящих вблизи сейсмоактивных районов, и подобное поведение СДВ-радиосигналов на трассах, проходящих вблизи атомных электростанций при аварийных ситуациях на них, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ. Показано, что в обоих случаях присутствует общая причина — изменение проводимости атмосферы. Увеличение проводимости атмосферы вблизи Земли приводит к изменению вертикального тока проводимости, что в свою очередь приводит к изменению параметров ионосферы.

Попытка объяснить наблюдаемые аномалии СДВ-сигнала известными способами пока не дали результатов. По-видимому, такое положение связано с тем, что $D$-область ионосферы, ответственная за распространение сигналов этого диапазона радиочастот, имеет существенные отличия от остальной части ионосферы. С одной стороны, это обусловлено ее составом, а именно наличием отрицательных ионов и преобладанием кластерных ионов. С другой стороны, для ее описания недостаточно учесть только аэрономические факторы и известные механизмы ионизации солнечными и галактическими космическими лучами. Необходимо привлечь к рассмотрению метеорологические влияния и литосферно-ионосферные взаимодействия.

В работах [2, 3] приведены основные характеристики ионосферных предвестников землетрясений (в диапазоне высот $90 \div 2500$ км) по результатам наблюдений методами наземного и спутникового вертикального зондирования. Ионосферными предвестниками землетрясений являются:

изменение электронной концентрации ($N$) на всех ионосферных уровнях и высотах $h$, что обусловливает характерные вариации $N(h)$-профилей;

изменение регулярных параметров волноводного канала Земля–ионосфера;

генерация слабых переменных электромагнитных полей в диапазоне частот от единиц до десятков килогерц;

образование во всей толще ионосферы неоднородностей различных масштабов;

усиление колебаний критических частот ионосферы;

возмущения высот и критических частот отдельных слоев ионосферы;

импульсное и шумовое радиоизлучение в диапазоне частот 10 Гц $\div$10 кГц и более.

Перечисленные предвестники характерны для землетрясений с магнитудой $M > 4$ и проявляются в

Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете.

период от нескольких суток до часов (десятков минут) до землетрясения на обширных территориях в сотни–тысячи километров. Авторами [2, 3] отмечается, что они могут быть обусловлены вариациями атмосферного электрического потенциала, связанными с литосферными процессами. Качественно новые сведения, необходимые для прогноза землетрясений, можно получить, контролируя весь объем ионосферы, возмущенной предвестником, и оценивая его эволюцию, т. е. осуществляя мониторинг пространственно-временных параметров ионосферы в широком диапазоне высот и на большой площади.

Нами были проанализированы результаты наблюдений характеристик электромагнитного фона, полученные при радиопросвечивании методом вертикального зондирования ионосферы и исследовании амплитудно-фазовых характеристик сигналов, распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера на СДВ-трассах.

## 1. Исследовательский радиотехнический комплекс мониторинга

В Сибирском физико-техническом институте используются методы и средства высокочувствительного радиоприема и мониторинга фоновых электромагнитных полей. Разработан и введен в действие для непрерывных мониторинговых измерений параметров ионосферы в области КНЧ*)—ОНЧ**) радиоизлучений приемный измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий вести:

наблюдения флуктуаций электромагнитных полей в области шумановских резонансов в диапазоне от 0 до 40 Гц с разрешением 0,01 Гц;

одновременный прием сигналов от трех реперных радиостанций либо нерегулярно действующих источников радиоизлучений в диапазоне частот 3÷100 кГц с оценкой амплитудных и фазочастотных параметров принимаемых сигналов;

измерение вариаций компонент и модуля вектора магнитного поля Земли.

В тракте приема излучения от реперных радиостанций эталонных сигналов частоты и времени, работающих в диапазоне $20,5 \div 25,0$ кГц, используются радиоприемные СДВ-устройства. Чувствительность радиоприемных устройств (РПУ) с симметричной магнитной рамочной антенной в полосе пропускания тракта промежуточной частоты 130 Гц не хуже 0,06 мкВ, а при работе с открытой антенной — не хуже 35 мкВ. Этими же РПУ ведутся регулярные наблюдения сигналов сети радионавигационных радиостанций глобальной системы «Омега» Все РПУ синхронизированы молекулярным стандартом частоты типа Ч1-50. Фазовые характеристики сигналов измеряются измерителями разности фаз типа Ф2-16 и Ф2-34.

Магнитное поле Земли и его вариации измеряются магнитовариационной станцией, позволяющей определить вариации компонент $H, D$ и $Z$ магнитного поля Земли в пределах до 1000 нТ каждого знака с разрешением до 0,5 нТ, а также квантовым магнитометром, способным измерить модуль вектора магнитного поля Земли в пределах $15000 \div 70000$ нТ с разрешением при максимальной скорости 100 измерений в секунду не хуже 1 нТ.

Управление комплексом и его программирование осуществляются от IBM PC. Результаты измерений накапливаются в специализированной базе данных. Комплекс позволяет измерять электродинамические параметры волновода Земля–ионосфера и их изменения под воздействием различных факторов природного и техногенного происхождения.

## 2. Экспериментальные результаты. Аномалии, наблюдаемые в процессе подготовки землетрясений

Нами проанализированы некоторые данные регулярных измерений параметров СДВ-сигналов на двух трассах (Томск — Япония и Томск — Иркутск), проходящих вблизи сейсмоактивных районов, и данные вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы. Для анализа были взяты непрерывные измерения за март–май 1997 г.

На записях амплитуды СДВ-сигнала наблюдается широкий спектр различных аномалий: понижение, сильный всплеск и квазипериодические вариации большой интенсивности и др.

На 15-минутных ионограммах ВЗ ионосферы (по данным ионосферной станции Томска) и в вариациях $\Delta f_{0F2}$, $f_{bEs}$ как до, так и после землетрясения также наблюдаются различные аномальные эффекты: рассеивание $F$- и $E$-слоев, расслоение, боковые отражения, возмущения критических частот и высот отдельных слоев.

На рис. 1 приведены записи амплитуды СДВ-сигнала на частоте 12,9 кГц (*а*) и вариации критической частоты $\Delta f_{0F2}$ (*б*), полученные нами 4 марта 1997 г. За этот период наблюдений произошло 4 сильных землетрясения: *1* — в 2 ч 35 мин 34,2 с $UT$ на Курильских островах с магнитудой $M = 4,8$; *2* и *4* — в 2 ч 49 мин 33 с и в 13 ч 03 мин 47,2 с $UT$ в Пакистане с $M = 4,4$ и 5,9; *3* — в 3 ч 51 мин 29 с $UT$ в Японии с $M = 5,3$.

Вариации критических частот определялись следующим методом: из суточного хода $f_{0F2}$ вычиталась квазирегулярная низкочастотная составляющая ($\overline{f_{0F2}}$), для нахождения которой проводилось сглаживание методом скользящего среднего по трем точкам ($\Delta f_{0F2} = f_{0F2} - \overline{f_{0F2}}$).

В результате совместного анализа СДВ-записей и ионограмм ВЗ ионосферы было обнаружено, что в

*) Крайне низкие частоты.

**) Очень низкие частоты.

период от 15 мин до 4 ч перед землетрясением фиксируется подъем амплитуды СДВ-сигнала (по сравнению с фоновой) и усиление колебаний флуктуаций критических частот. На рис. 2 приведен пример зафиксированного всплеска амплитуды на СДВ-записи перед землетрясениями в Японии 26 марта 1997 г.: *1* — в 7 ч 7 мин 12 с ($M = 4,3$), *2* — в 8 ч 31 мин 47,9 с ($M = 5,9$) и *3* — в 9 ч 31 мин 32,7 с ($M = 4,8$).

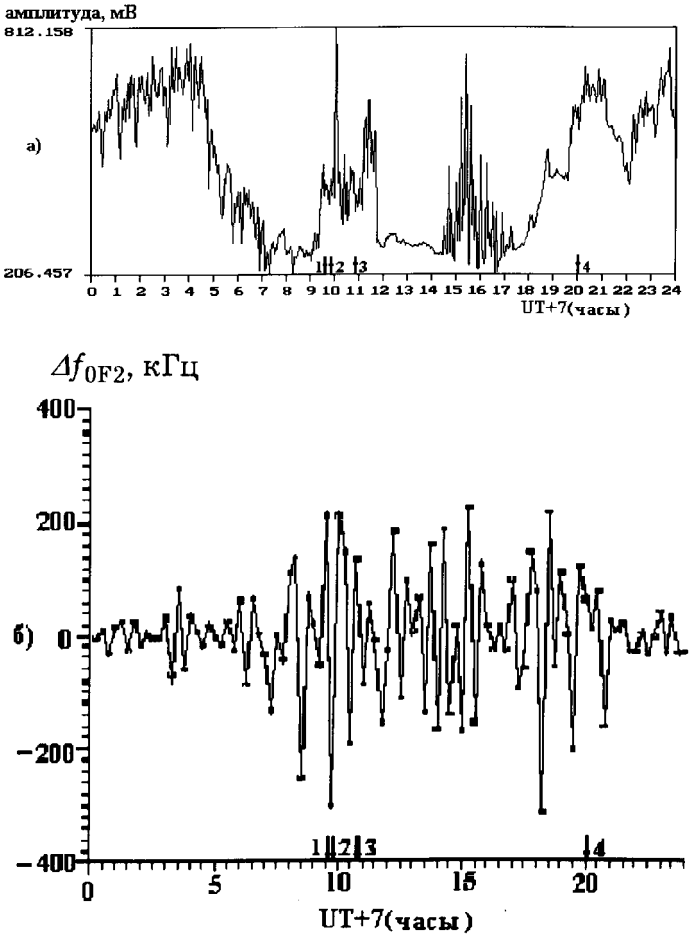


*Рис. 1.* Суточный ход амплитуды принятого СДВ-сигнала с частотой 12,9 кГц на трассе Томск — Цусима (*а*) и вариации критических частот $F2$-слоя (*б*), полученные 4 марта 1997 г. Здесь и на следующих рисунках стрелки показывают начало землетрясений

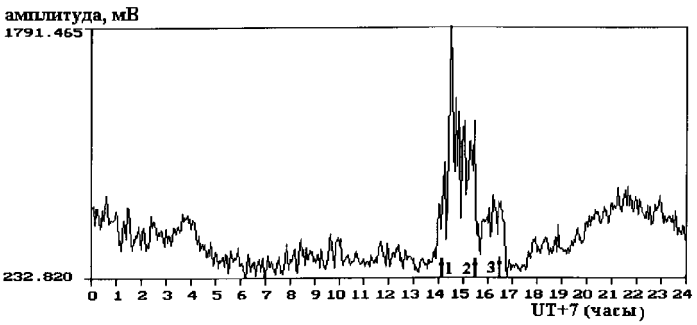


*Рис. 2.* Суточный ход амплитуды принятого СДВ-сигнала с частотой 12,9 кГц на трассе Томск — Цусима, полученный 26 марта 1997 г.

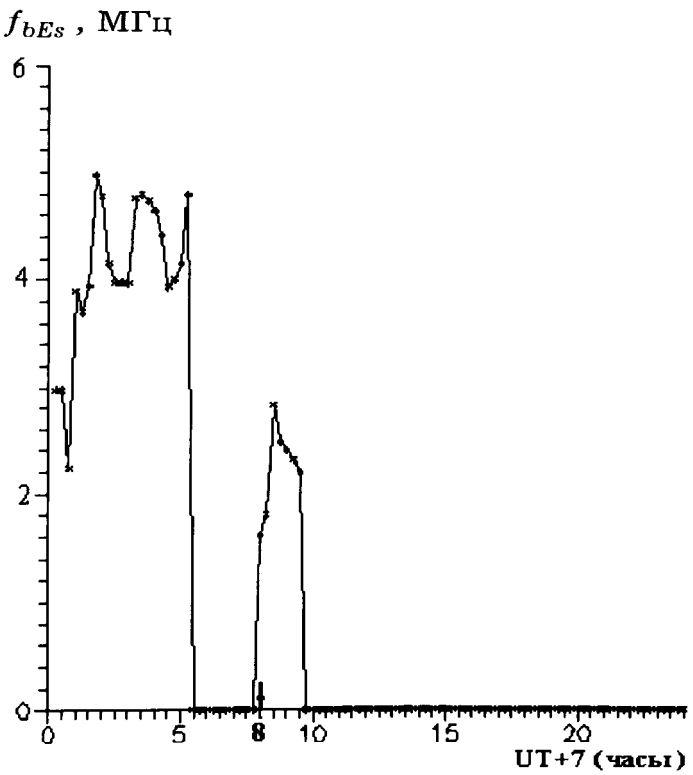


*Рис. 3.* Критическая частота $E_s$-слоя по данным вертикального зондирования ионосферной станции Томска, проведенного 2 марта 1997 г.

Спектральный анализ вариации $\Delta f_{0F2}$ (по аналогии с результатами работы [4]) показал, что за сутки до группы сильных землетрясений вблизи СДВ-трасс происходит увеличение отдельных спектральных пиков (периоды следования которых: 4,8; 1,846; 1,2 и 0,522 ч). Этот факт может трактоваться как один из возможных эффектов в ионосфере, обусловленный процессом подготовки сильного землетрясения.

Полученные выводы подтверждаются результатами ранее проведенного нами анализа ионосферных эффектов, связанных с сильным землетрясением, которое произошло 4 октября 1994 г. в районе Южных Курил. Анализировались данные, полученные на двух ионосферных станциях в Иркутске и Томске, отстоящих от эпицентра на расстоянии $\sim 3200$ и $\sim 4400$ км соответственно за период с 1 по 10 октября 1994 г.: особенности поведения 15-мин ионограмм и суточные спектральные характеристики флуктуации критической частоты $F2$-слоя ($\Delta f_{0F2}$). Было обнаружено трехкратное увеличение амплитуды отдельных спектральных пиков (периоды следования которых: 0,6; 1,3; 2 и 4 ч) и частоты $f_{bEs}$ (до 8 МГц в Иркутске и 6 МГц в Томске) на обеих станциях за сутки до первого подземного толчка.

В некоторых работах, например в [5, 6], отмечено, что перед сильными землетрясениями в области будущего эпицентра регистрируются изменения в ночной $E$-области среднеширотной ионосферы: наряду с молекулярными ионами в ионосферной плазме при-

сутствуют также ионы металлов. Во многих случаях перед сильными землетрясениями в $E$-области образуется плотный слой ионов металла, который толще обычного спорадического слоя $E_s$ примерно вдвое. Кроме того, $E_s$-слой, связанный с сейсмической активностью, центрирован относительно фиксированной высоты $z \sim 120$ км. Иногда наблюдается полная экранировка $E_s$-слоем других слоев. Нами была зарегистрирована 2 марта за 3 ч до землетрясения на Курильских островах такая экранировка, длившаяся примерно 3 ч (рис. 3).

**Выводы**

Из проведенного анализа следует, что до и во время землетрясений фиксируются возмущения ионосферы. На это указывают следующие экспериментальные данные.

1. В период от 15 мин до 3 ч перед землетрясением на СДВ-записях наблюдаются подъем амплитуды сигнала и усиление собственных волновых возмущений в вариациях критических частот ($\Delta f_{0F2}$) $F2$-слоя (по сравнению с фоновыми значениями).

2. За сутки до начала группы сильных землетрясений вблизи СДВ-трасс фиксируется увеличение спектральных пиков в 2–3 раза (периоды следования которых: 4,8; 1,846; 1,2 и 0,522 ч) критических частот $F2$-слоя.

3. Во многих случаях перед землетрясением (в период от 15 мин до 3 ч) фиксируется $E_s$-слой на ионограммах ВЗ ионосферы.

Полученные результаты анализа аномалий в ионограммах вертикального зондирования и СДВ-сигналов, обнаруженных перед и во время землетрясений, подтверждают экспериментальные данные других авторов о существовании ионосферных предвестников землетрясений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-64907).

**Литература**

1. *Мартыненко С.И., Фукс И.М., Шубова Р.С.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. **34**, № 2. С. 121.
2. *Фукс И.М., Шубова Р.С.* // Там же. С. 130.
3. *Депуева Х., Ораевский В.Н., Ружин Ю.Я.* // Физика космической плазмы. 1994. С. 137.
4. *Зеленкова Т.И., Легенька А.Д.* // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1989. № 10. С. 89.
5. *Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. **33**, № 5. С. 114.
6. *Колоколов Л.Е., Липеровская Е.В., Шалимов С.А.* // Физика Земли. 1992. № 7. С. 101.