

А.Ж. МУРАДЯН, А.А. ПОГОСЯН, М.В. АДИБЕКЯН

## МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СДРВ ПРИ НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

Разработана методика выявления слабых возмущений ионосферного сигнала на основе выделения суточного периода из периодограмм временных рядов  $\Delta\varphi$ . Получены корреляционные функции для серий выборок землетрясений и аномалий, рассчитанных в соответствии с предложенной методикой. Показано, что интервал корреляции в основном колеблется в пределах 35...40 дней для землетрясений с магнитудой  $M \geq 4,5$ . Выявленная закономерность позволяет утверждать, что наклонное зондирование ионосферы является предвестником землетрясений.

**Ключевые слова:** зондирование ионосферы, распространение радиоволн, сейсмоионосферные связи.

**Методика и техника эксперимента.** Со дня основания Национальной службы сейсмической защиты при Правительстве РА (НССЗ РА) проводятся исследования пре-, ко-, постсейсмических процессов на Кавказе посредством многопараметрового мониторинга литосферы и атмосферы. Являясь составной частью многопараметрового мониторинга, наблюдения за состоянием ионосферы посредством наклонного зондирования проводятся в Армении (НССЗ РА) с 1992 года.

В процессе наблюдений контролируется распространение сверхдлинных радиоволн (СДРВ) по трассам, пересекающим различные сейсмоактивные регионы планеты. Построение радиотрасс осуществляется на базе фазовой радионавигационной системы (ФРНС) "Омега". Прием осуществляется на станции НССЗ (г. Ереван) с установленными приемниками-компараторами Ч7-38. При измерениях регистрируется разность  $\Delta\varphi$  между фазой принимаемой радиоволны (по моменту прихода фронта волны) и стандартным сигналом, генерируемым атомным стандартом частоты и времени СЧВ-74, синхронизированным с передатчиками станций ФРНС "Омега". Измерение ( $\Delta\varphi$  производится с частотой в одну минуту).

Для мониторинга выбраны четыре станции ФРНС "Омега": Монровия (Либерия), о. Реюньен (Франция), о. Цусима (Япония), Алдра (Норвегия), радиотрассы по которым составляют четыре взаимно-перпендикулярных направления, охватывая таким образом основные Евразийские сейсмически активные регионы (рис. 1).

Процесс распространения СДРВ носит дифракционный характер, благодаря чему имеет место огибание радиоволнами кривизны земной поверхности. Скорость распространения сигналов зависит от физического состояния приземной части атмосферы и нижней ионосферы. Состоянием ионосферы определяется время прихода сигнала или измеряемая разность фаз относительно эталона. Кроме того, на определяемую  $\Delta\varphi$  прихода СДРВ-сигнала влияет высота нижнего слоя ионосферы: днем

слой D, ночью - E. Таким образом, в случае возмущенной ионосферы, т.е. при образовании неоднородностей, вызванных внешними воздействиями, фиксируются изменения  $\Delta\varphi$  по отношению к невозмущенному состоянию.

Невозмущенное состояние графиков функций  $\Delta\varphi$  определяется изменением состояния ионосферы день-ночь, при котором график  $\Delta\varphi(t)$  имеет синусоидальный вид (рис. 2).

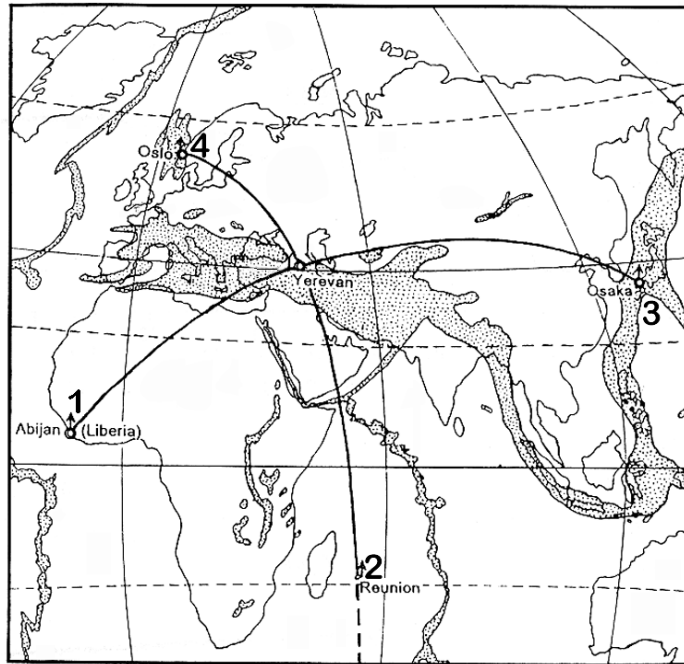


Рис. 1. Карта радиотрасс наклонного зондирования ионосферы с выделенными основными сейсмоактивными регионами планеты. Станции ФРНС "Омега":  
1 - Монровия, 2 - о. Реюньен, 3 - о. Цусима, 4 - Алдра

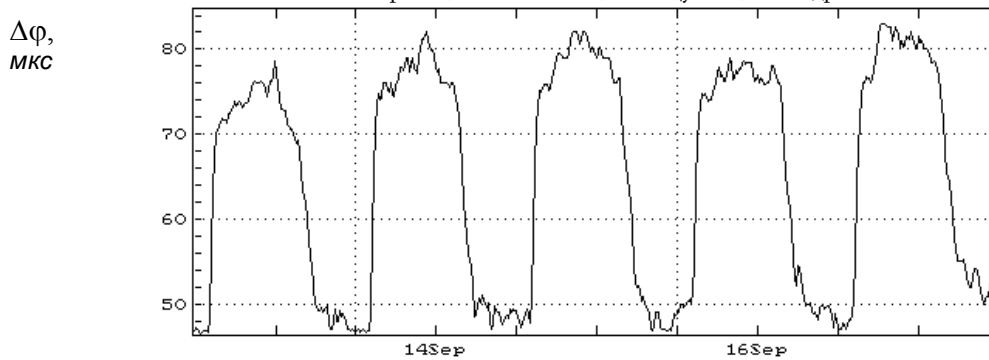


Рис. 2. График  $\Delta\varphi$  для невозмущенной ионосферы по трассе Алдра (Норвегия)- Ереван, 09.13.93. - 09.17.93 г.

Появление нерегулярных неоднородностей в случае возмущений сейсмогенного характера является причиной отклонений  $\Delta\varphi$  от нормального хода. Такие возмущения наблюдались на зависимости  $\Delta\varphi(t)$  (рис. 3), соответствующей Ардебильскому землетрясению ( $M=6,1$ ).

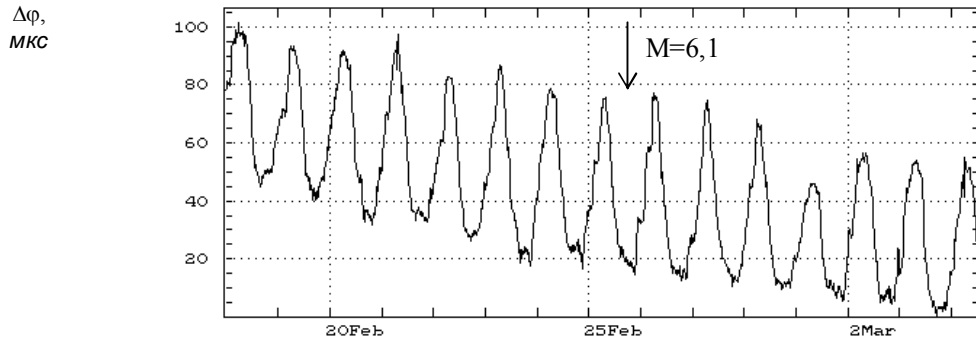


Рис. 3. Период с аномалиями распространения СДРВ

Таким образом, процесс подготовки землетрясения влияет на состояние ионосферы, вследствие чего над сейсмогенными зонами образуются области возмущенной ионосферы, на которых наблюдается аномальное распространение СДРВ. Это проявляется в виде различных искажений суточного хода. Однако не всегда отклонения оказываются настолько явными, чтобы выявить их в процессе визуального анализа. Для более детального количественного анализа аномалий разработана методика выявления аномалий, позволяющая ввести критерии оценки влияния процессов подготовки землетрясений на ионосферу.

Отметим, что отклонения от нормального хода наблюдаются и при влиянии таких возмущающих факторов несейсмогенной природы, как солнечные вспышки (рис. 4), техногенные воздействия и др., которые удастся исключить при фильтрации данных.

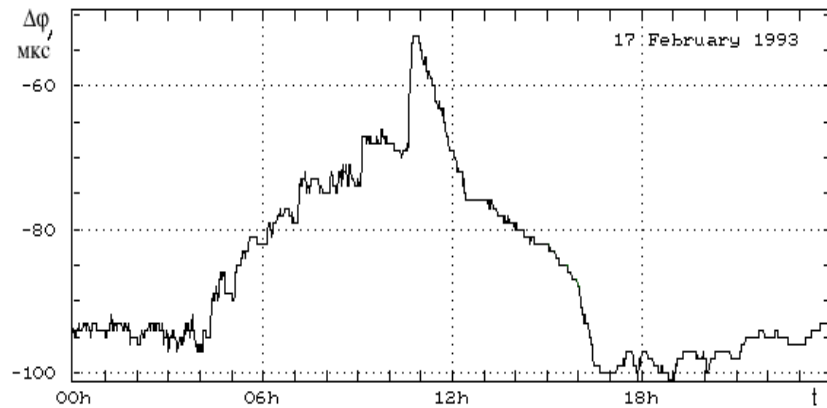


Рис. 4. Воздействие солнечной вспышки на распространение СДРВ

**Описание методики.** Вращение Земли вокруг своей оси, в основном, приводит к квазипериодическим изменениям геофизических параметров окружающей нас среды. В идеальных и стационарных условиях

эти изменения перешли бы к строго периодическому виду. Однако в реальных условиях зачастую наблюдаются отклонения от строгой периодичности вследствие таких внешних воздействий, как вариации потока солнечной энергии, неоднородности и анизотропности среды, орбитального движения Земли и т.д. В процессе долговременных наблюдений выявлено, что подобные нарушения, как правило, малы, и в среднем временное поведение параметров среды в первом приближении можно считать периодическим.

Однако, как было указано выше, в определенные интервалы времени регистрируются относительно большие отклонения измеряемых величин от основного хода вследствие значительных изменений внешних условий в исследуемых регионах.

Предлагаемая методика разработана на основе следующих качественных положений с учетом специфики объекта наблюдений.

Каждая квазипериодическая величина может быть разложена в ряд Фурье, следовательно, каждой функциональной зависимости измеряемой величины  $f(t)$  соответствует своя периодограмма – определенный дискретный набор амплитудных значений  $f_i$ . В случае строгой периодичности независимо от рассматриваемого временного интервала  $t$  будут получены идентичные периодограммы  $f^1=f^2$  при  $\Delta t \gg T$ , где  $T$  – период измеряемой величины  $f(t)$ , в данном случае  $T=24$  ч. При наличии аномалий на одном или нескольких интервалах  $\Delta t$  временной ход  $f(t)$  отклоняется от строгой периодичности, что отражается на соответствующих периодограммах, которые представляются новым набором  $f_i$ . Таким образом, информацию об аномалиях несут в себе периодограммы "аномальных" периодов времени, а разность  $\Delta f$  между двумя периодограммами разных временных интервалов есть количественная мера аномалии. Подобное определение количественной меры аномалии имеет следующие важные свойства:

- разность ( $f$  равна нулю при отсутствии аномалий, т.е. количественно определяется относительно нулевого "фона", что позволяет достичь большой точности статистической обработки;

- абсолютное значение ( $f$  пропорционально аномалии  $f(t)$ ).

Разбив интервал наблюдений на равные промежутки  $\Delta t$  и вычислив  $\Delta f^k$  для последовательности временных интервалов, получим временное развитие или аномалию, где  $\Delta f_i^k$  определяется как

$$\Delta f_i^k = f_i^{k+1} - f_i^k,$$

где  $k=1,2, \dots$  - текущий номер интервала.

Таким образом, получается  $p$  зависимостей аномального сигнала от времени  $a(t)$ , где  $p$  - количество значений в наборе  $f_i$ , а каждая функция  $a(t)$  получается при фиксированном  $i$ , где  $k$  пробегает все свои значения  $1,2,\dots$ . Величина  $a(t)$  определяется с временной точностью  $2\Delta t$  при последовательно непрерывном выборе промежутков  $\Delta t$ , т.е. всегда больше  $T$  ввиду  $\Delta t \gg T$ . Для повышения чувствительности метода, с целью выявления времени появления аномалии, целесообразно уменьшить длительность  $\Delta t$  при соблюдении условия  $\Delta t \gg T$ . Однако большей чувствительности можно достигнуть при выборе частично пересекающихся промежутков, т.к. из вышесказанного ясно, что взаимные перекрытия промежутков никоим образом не противоречат сделанным ранее рассуждениям. Выбор последовательных, частично пересекающихся

промежутков с временными смещениями  $\tau$  позволяет получить сколь угодно высокую временную чувствительность метода ввиду того, что смещения  $\tau$  могут быть произвольными, сколь угодно малыми,  $\tau \ll T$ .

**Применение методики при анализе данных СДРВ наблюдений.** На основе предложенной методики в работе исследована связь аномалий состояния ионосферы, выявляемых наклонным зондированием, и процессов подготовки землетрясений. Выявление и количественное описание аномалий распространения СДРВ, излучаемых передатчиками ФРНС "Омега", производилось по радиотрассе: Алдра (Норвегия) - Ереван (северное меридиональное направление) (рис. 1).

При этом использовались данные за 1993-1995 гг., т.е. непрерывный временной ряд примерно тысячедневной длительности. Среднее  $\Delta\varphi$  около 30..40 мкс.

Для расчета аномалии были получены периодограммы для временных интервалов длительностью 5 дней с однодневным смещением каждого последующего отрезка относительно предыдущего. Полученная таким образом последовательность представляет собой порядка тысячи 5-дневных периодограмм с временным шагом один день. Естественно, что измерения не могут производиться непрерывным образом. В НССЗ измерения производятся с частотой опроса одно измерение в минуту. Подобная дискретность временного ряда для  $\Delta\varphi$  приводит к тому, что на каждой периодограмме, кроме ярко выраженного 24-часового максимума (суточный ход ()), появляются частотно кратные ему максимумы. Кроме того, максимумы появляются на периодах, не кратных 24-часовому, которые в идеальном случае отсутствовали бы. Именно периоды, не кратные 24 часам, и есть выражение отклонений  $\Delta\varphi$  от идеальной периодичности - аномалии распространения СДРВ. Однако появление этих частот ведет к изменению абсолютных значений максимума, соответствующего периоду  $T=24$  ч. Таким образом, информация о нарушениях хода  $\Delta\varphi$  содержится также и в динамике суточного максимума. По этой причине исследовались изменения, соответствовавшие суточному периоду.

Следует отметить, что прямое использование периодограмм для выявления аномалий нецелесообразно по двум причинам. Во-первых, здесь сильно отражены невозмущенные квазипериодические колебания; во-вторых, интересующая нас информация не определена относительно нулевого фона. Исходя из сказанного, как мера (количественная характеристика) аномалий использована разность между двумя последовательными периодограммами.

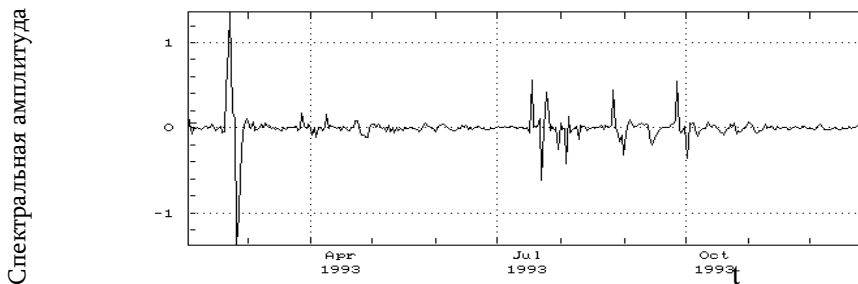


Рис. 5. Функция аномалии для периода  $T=24$  ч. за 1993 г.

На рис. 5 показана функция аномалии. Построением этой картины завершается первый этап исследований - выделение аномалий в квазипериодическом процессе.

**Аномалии распространения СДРВ и сейсмическая активность.** Следующим этапом обработки данных является вычисление кросс-корреляционных функций между аномалией  $a(t)$  и временными функциями величин, которые могут быть источниками аномалий. Значения кросс-корреляционных функций и производные от них величины служат количественными характеристиками статистической связи аномальных сигналов с их предполагаемыми источниками.

На этом этапе ход аномалий СДРВ сопоставляется с сейсмическим режимом (временным распределением землетрясений) в регионах, прилегающих к трассе распространения СДРВ. Нужно отметить, что регионы выбраны по разным направлениям по отношению к пункту приема СДРВ (Ереван) (рис. 6), благодаря чему можно судить о направленности чувствительности радиотрассы. Для этого проведена выборка землетрясений по каталогам Национального центра информации о землетрясениях США (NEIC) и Сейсмологического бюллетеня ОИФЗ РАН, употребляемым многими сейсмологическими и геофизическими службами мира (в частности, при ретроспективном анализе), по изучаемому интервалу времени.

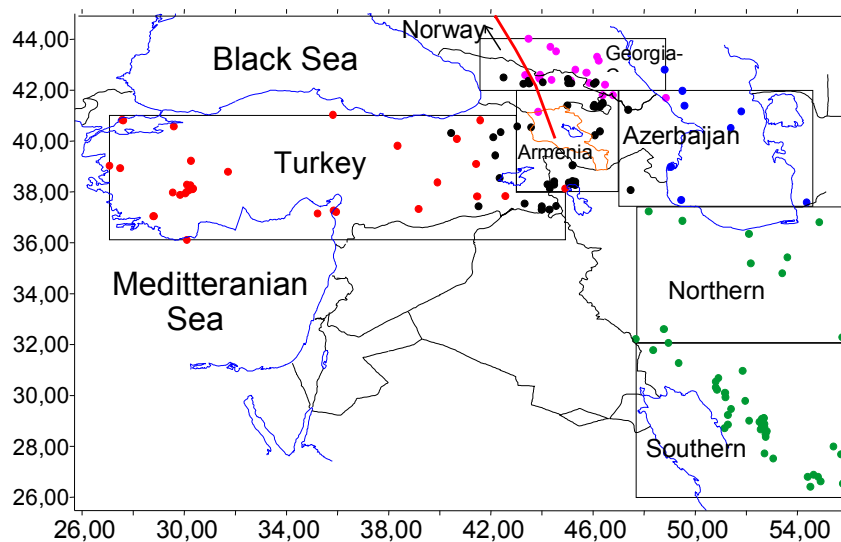


Рис. 6. Радиотрасса Алдра (Норвегия) - Ереван с выделенными регионами. Точками обозначены эпицентры землетрясений

Основываясь на исследованиях [1] по "чувствительности" радиотрасс к сильным землетрясениям  $M \geq 7$ , можно сказать, что дальность воздействия зоны подготовки сейсмического события на распространение СДРВ доходит до трех зон Френеля. Линейные размеры регионов, прилегающих к радиотрассе, выбраны равными примерно 300 км. Таким образом, выбраны землетрясения по регионам во все стороны от трассы Алдра-Ереван с условными названиями: "Армения", "Грузия-Кавказ",

"Азербайджан", "Северный Иран" и тестовый регион "Турция" со значительным удалением от трассы, вне пределов трех зон Френеля. При этом для региона "Армения" взяты землетрясения с  $M \geq 4,0$ , а в остальных случаях нижняя граница определена как  $M \geq 5,0$ . На рис. 7 показаны все сейсмические события за период 1993-1995 гг. в каждом из выделенных для анализа регионе.

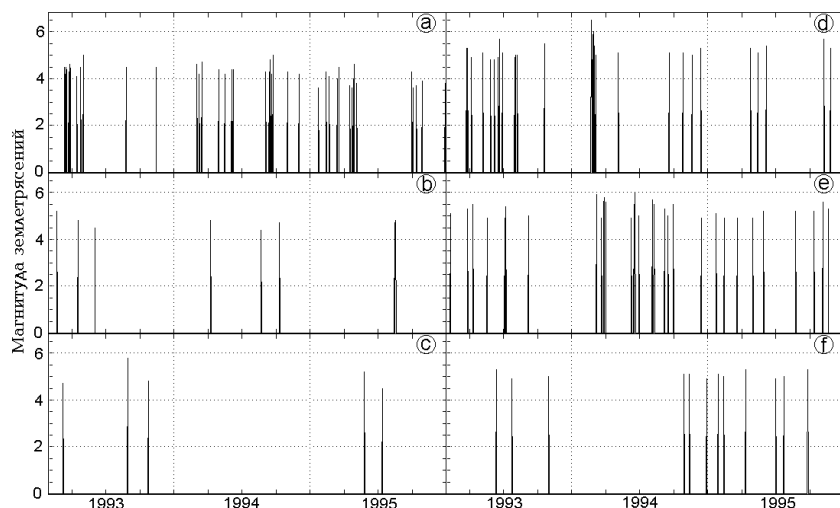


Рис. 7. Сейсмическая активность в исследуемом интервале времени по радиотрассе Алдра (Норвегия) - Ереван по выделенным регионам: а – Армения, б – Грузия-Кавказ, с – Азербайджан, d – Северный Иран, е – Южный Иран, f – Турция

Имея функцию аномалий СДРВ (рис. 5) и сейсмический режим (рис. 7), определенный для тех же интервалов времени, можно получить кросс-корреляции между ними. Для этого период 1993-1995 гг. разделен на трехмесячные интервалы, длительность которых значительно превышает известное из других работ [2, 3] время корреляции между сильными землетрясениями и атмосферными возмущениями (в пределах 40 дней). Заметим, что такое разбиение увеличивает статистику исследуемых событий и, соответственно, повышает их достоверность.

На рис. 8-12 приведены примеры функций кросс-корреляции по регионам, рассчитанные по трехмесячным временным интервалам.

До сих пор известные результаты [4, 5], полученные для других сейсмоактивных районов, относятся к случаям сильных землетрясений ( $M \geq 5,5$ ), в то время как благодаря разработанной методике оказывается возможным снизить порог чувствительности при анализе данных наклонного зондирования ионосферы к землетрясениям до магнитуд  $M \geq 4,0$ .

В целом корреляционные функции, полученные для региона "Армения", характеризуются высокой степенью корреляции, выражающейся как в величинах максимумов, так и в степени их группировки (рис. 8).

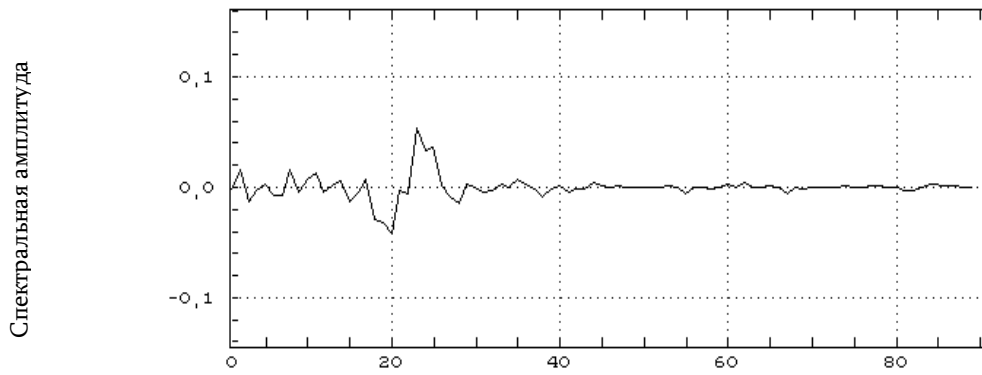


Рис. 8. Кросс-корреляция по региону “Армения”, I интервал 1993 г.

Аналогичная серия корреляционных функций для региона “Грузия-Кавказ” представлена на рис. 9. Сравнение графиков показывает, что для этой зоны корреляция между аномалиями СДРВ и имевшими место землетрясениями практически повторяет ту же закономерность, которая наблюдается по региону “Армения” - максимумы корреляции находятся в 40-дневном интервале, однако по своим абсолютным значениям максимумы чуть меньше.

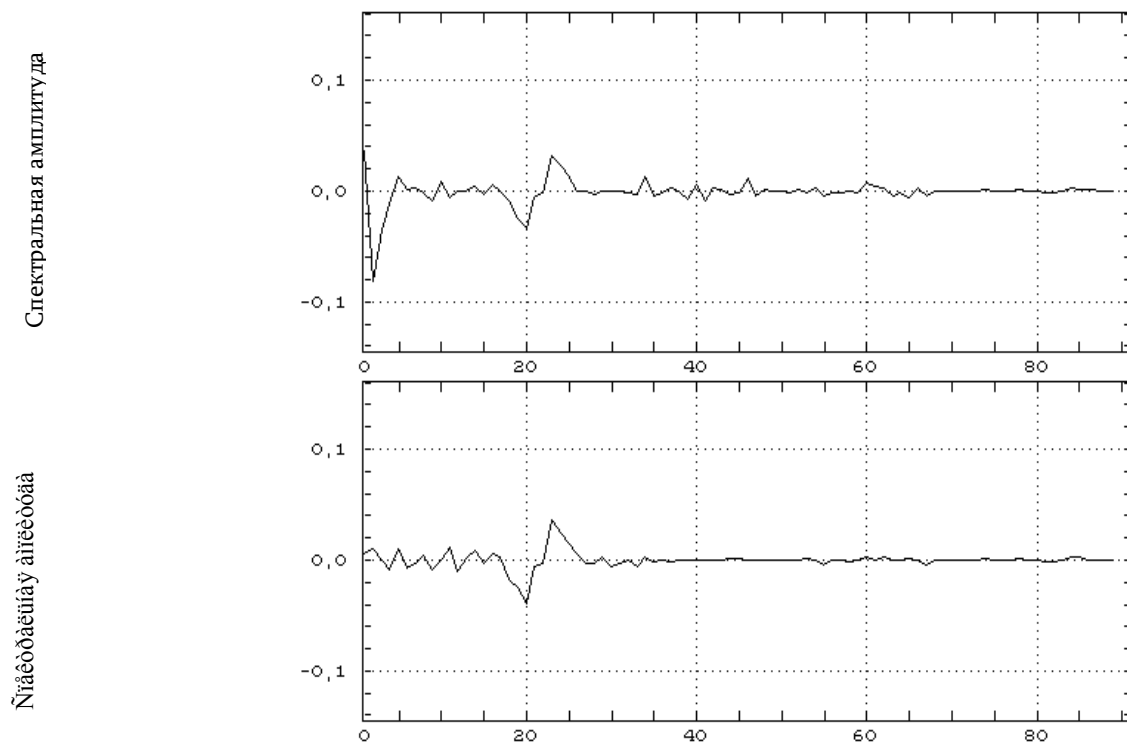


Рис. 9. Кросс-корреляция по регионам “Грузия-Кавказ” (вверху) и “Северный Иран”, I интервал 1993 г.



Для регионов “Азербайджан” и “Северный Иран” (рис. 9) также наблюдается схожая зависимость с некоторыми исключениями.

Разницы между корреляцией по регионам “Азербайджан” и “Грузия-Кавказ” практически не наблюдается, хотя эти регионы находятся в разных условиях. Регион “Грузия-Кавказ” пересекается радиотрассой, в то время как регион “Азербайджан” лежит вне ее.

Для “Южно-Иранского” и особенно “Турецкого” регионов характерна картина с относительно равномерным распределением максимумов по всему исследованному трехмесячному интервалу времени, или же наличие нескольких выделяющихся групп как в пределах, так и вне 35...40 - дневного интервала (рис. 10).

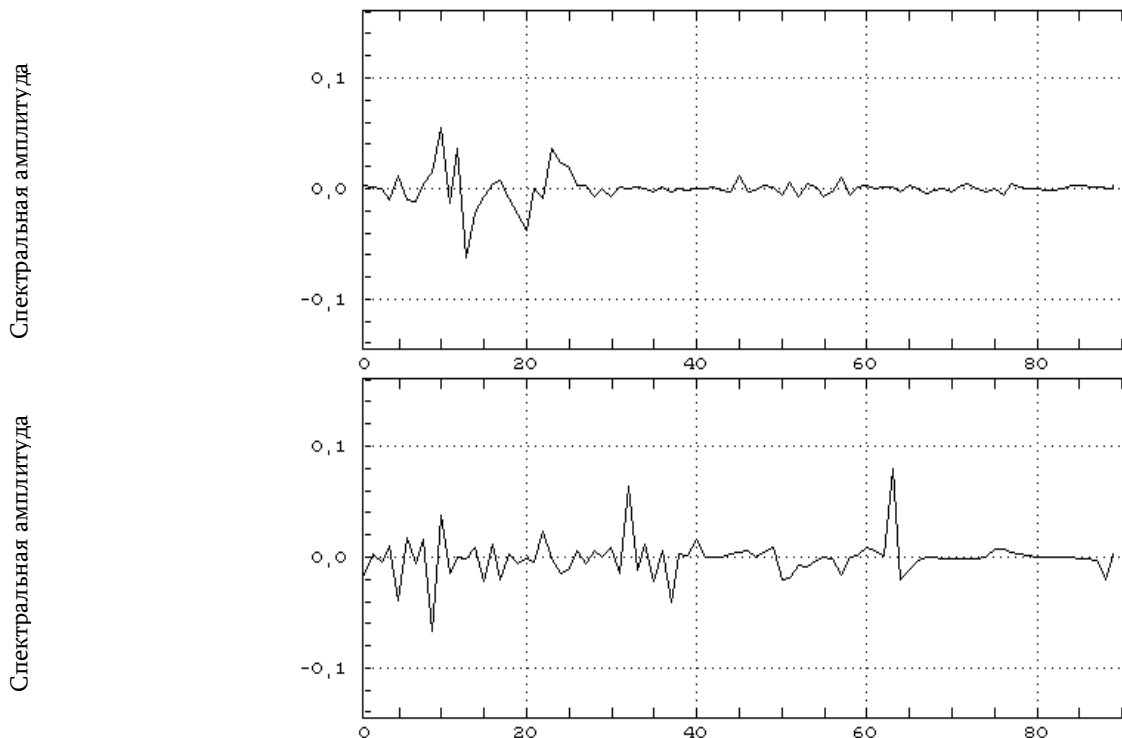


Рис. 10. Кросс-корреляция по регионам “Южный Иран”, I интервал (вверху) и “Турция”, III интервал 1993 г.

Корреляция по региону “Турция” изначально предполагалась низкой ввиду сильно неравномерного распределения землетрясений внутри региона (рис. 6).

Таким образом, анализ корреляционных функций показывает, что интервал корреляции в основном колеблется в пределах 35...40 дней для землетрясений с магнитудой  $M \geq 4,5$ .

Выявленная закономерность позволяет утверждать, что наклонное зондирование ионосферы - распространение СДРВ в волноводе Земля – ионосфера – является предвестником сильных землетрясений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воинов В.В., Гуфельд И.Л.** и др. Эффекты в ионосфере и атмосфере перед Спитакским землетрясением 7 декабря 1988 г. // Изв. АН (Россия). Физика Земли. - 1992. - № 3. - С. 96-101.
2. **Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Ямпольский В.С.** Статистический анализ связи возмущений фазы сигналов ФРНС "Омега" с сейсмотектоническим процессом: Препринт № 1. - М.:ИФЗ АН СССР, 1989. - 11 с.
3. **Маренко В.Ф.** Исследование связи сейсмотектонических процессов с возмущениями нижней ионосферы методом радиопросвечивания на длинных волнах: Автореф. дис. к.т.н. Иркутск / СИБИРИЗМИР АН СССР, 1989. - 19 с.
4. **Balassanian S., Mouradian A., Sahakian A., Kalinin S., Babayan M., Pogossian A.** The investigation of electromagnetic precursors to earthquakes in Armenia// Annali di Geofisica. - 1997. - Vol. XL, № 2. - P. 209-225.
5. **Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Тюменцев С.Н., Шерстюк С.В., Ямпольский В.С.** Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // Изв. АН (Россия). - Физика Земли. - 1992. - № 3. - С. 102-106.

НССЗ РА. Материал поступил в редакцию 30.12.2000.

**Ա.Ճ. ՄՈՒՐԱԴՅԱՆ, Ա.Ա. ՊՈԴՈՍՅԱՆ, Մ.Վ. ԱԴԻԲԵԿՅԱՆ**

### **ԻՈՆԱՈՒԼՈՐՏԻ ԹԵՔ ԶՈՆԴԱՎՈՐՄԱՆ ԸՆԹԱՅՔՈՒՄ ԳԵՌԱ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ԱՆՈՄԱԼԻԱՆԵՐԻ ԱՆՋԱՏՄԱՆ ՍԵԹՈՂԻԿԱ**

Մշակված է իոնոսֆերայում ազդանշանի թույլ զրգռումների բացահայտման մեթոդիկա, որը հիմնված է  $\Delta\varphi$ -ի ժամանակային շարքերի պերիոդոգրամներից օրեկան պարբերության անջատման վրա: Մտացվել են կորելացիոն ֆունկցիաներ երկրաշարժերի ընտրությունների և առաջարկված մեթոդիկայով հաշվարկված անոմալիաների միջև: Ցույց է տրված, որ կորելացիայի ժամանակը հիմնականում տատանվում է 35...40 օր ժամանակահատվածում՝  $M \geq 4,5$  մագնիտուդայով երկրաշարժերի համար: Ներկայացված օրինաչափությունը թույլ է տալիս պնդել, որ իոնոսֆերայի թեք զոնդավորումը երկրաշարժերի կանխանշան է:

**A.ZH. MOURADYAN, A.A. POGHOSSIAN, M.V. ADIBEKYAN**

### **A TECHNIQUE FOR REVEALING ANOMALIES OF ELF PROPAGATION DURING SLOPE SOUNDING OF IONOSPHERE**

On the basis of allocation of the daily period from periodograms of  $\Delta\varphi$  time sequences, a technique for weak disturbances revealing ionospheric signal is developed. The correlation functions for chosen series of earthquakes and anomalies are calculated according to the offered technique. It is shown that the interval of correlation basically changes within the limits of 35...40 days for earthquakes with magnitude  $M \geq 4,5$ . The revealed law allows to state that the slope sounding of an ionosphere is a precursor of earthquakes.