

## Пеленгатор ионосферных предвестников землетрясений

Т.Г. Асланов<sup>1</sup>, О.И. Гасанов<sup>2</sup>, Р.Б. Казибек<sup>3</sup>, Р. Р. Мусаибов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет, Махачкала

<sup>2</sup>ОАО «Производственное объединение “Азимут”», Махачкала

<sup>3</sup>АО «Дагестанский НИИ “Волна”, Дербент

**Аннотация:** Статья посвящена вопросам создания пеленгаторов для пеленгования ионосферных предвестников землетрясений. Приводятся структурные схемы двух вариантов пеленгаторов, показаны их преимущества и недостатки. Разработаны алгоритмы функционирования пеленгаторов и селекции ионосферных предвестников.

**Ключевые слова:** радиопеленгатор, ионосферный предвестник землетрясения, селекция сигналов, фазированная антенная решетка, волна, колебания, фаза, азимут, угол места.

В конце прошлого века был установлен факт изменения параметров сигналов навигационных систем "Лоран-С" и "Омега" на трассах, проходящих, через эпицентральных зоны землетрясений (Рудбарско 1990 г. в Иране и Грузинское в 1991г).

Кроме того, перед Рубдарским и Спитакским землетрясениями штатными средствами ПВО были обнаружены интенсивные электрические разряды большой мощности. Также, помехи возникали на радиотелескопах Бюраканской астрофизической обсерватории перед и после Спитакского землетрясения [1].

На рис. 1 приведена запись ионосферных помех, произведенных на Бюраканской астрофизической обсерватории перед Спитакским землетрясением. Здесь, по горизонтальной оси отложено время от 12 часов 30 минут до 17 часов 30 минут. Записи произведены в период с 02.12.88 по 15.12.88 гг.

Анализ рисунка показывает, что за 5 дней до землетрясения в ионосфере появились помехи, которые достигли максимума перед землетрясением. После землетрясения помехи постепенно исчезли.

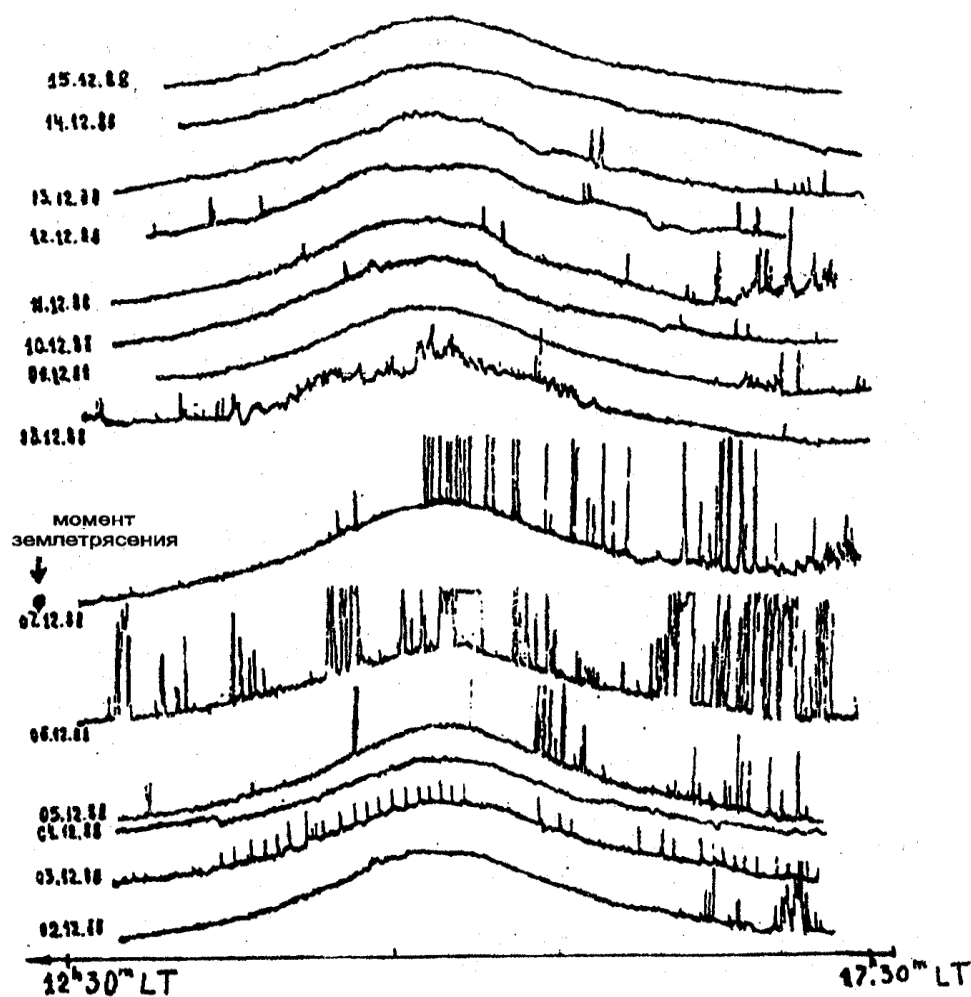


Рис.1. –Запись ионосферных помех, произведенная на Бюраканской астрофизической обсерватории

В 80-х годах прошлого века в Омском педагогическом институте, а в последующем в институте физики Земли АН СССР для оценки сейсмоопасности начали использовать возмущения в работе глобальных импульсно-фазовых навигационных систем «ЛОРАН-С», «ОМЕГА» [2-4].

Одним из предвестников землетрясений является изменение (повышение) напряженности магнитного поля Земли над очагом землетрясения [5-7]. При этом, над очагом сильного землетрясения, как отмечалось ранее, наблюдаются световые явления - свечение ионосферы в виде широких полос, сравнимое с полярным сиянием.

Для обнаружения зон источников ионосферных помех могут быть использованы простые по сравнению с радиолокационными системами автоматические радиопеленгаторы (АРП) и системы АРПС [8, 9].

Следует иметь в виду, что для слабых землетрясений уровень ионосферных помех является маленьким. Для пеленгования слабых сигналов обычно применяются методы обработки информации, связанные с построением диаграммы направленности (ДН) [10, 11].

ДН может быть сформирована с помощью управляемых фазовращателей (ФВ). Принцип работы такого пеленгатора поясняется рис 2.

Он состоит из следующих устройств: антенная система (АС), управляемые ФВ, сумматор, радиоприёмное устройство, микропроцессорное устройство управления и обработки информации.

АС представляет собой  $N$  симметричных вибраторов, размещенных по окружности и центрального вибратора (ЦВ).

Если, круговую АС с помощью ФВ привести к линейной, то при вращении такой линейной АС, с направления прихода сигнала ионосферного предвестника землетрясения, будет иметь место максимум суммарного сигнала.

Рассмотрим принцип формирования и сканирования искусственной линейной АС. Пусть требуется формировать диаграмму направленности в направлении источника сигнала  $I$ , расположенного по азимуту  $\theta$ .

Для этого необходимо искусственно перенести все вибраторы на линию  $AB$  – к перпендикуляру к линии, проходящей через центр антенной решетки и источник излучения в точке расположения ЦВ, что обеспечивается фазовой задержкой сигналов с выходов вибраторов АС на величину

$$\varphi_i = \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left[ \left( \frac{2\pi(i-1)}{N} \right) - \theta \right] \quad (1)$$

---

где:  $R$  – радиус АС;  $i$ – номер вибратора АС;  $\beta$  – угол места на источнике помехи;  $\lambda$  – длина волны пеленгуемой помехи;  $N$  – количество элементов антенной решетки;  $\theta$ – пеленг на источник излучения.

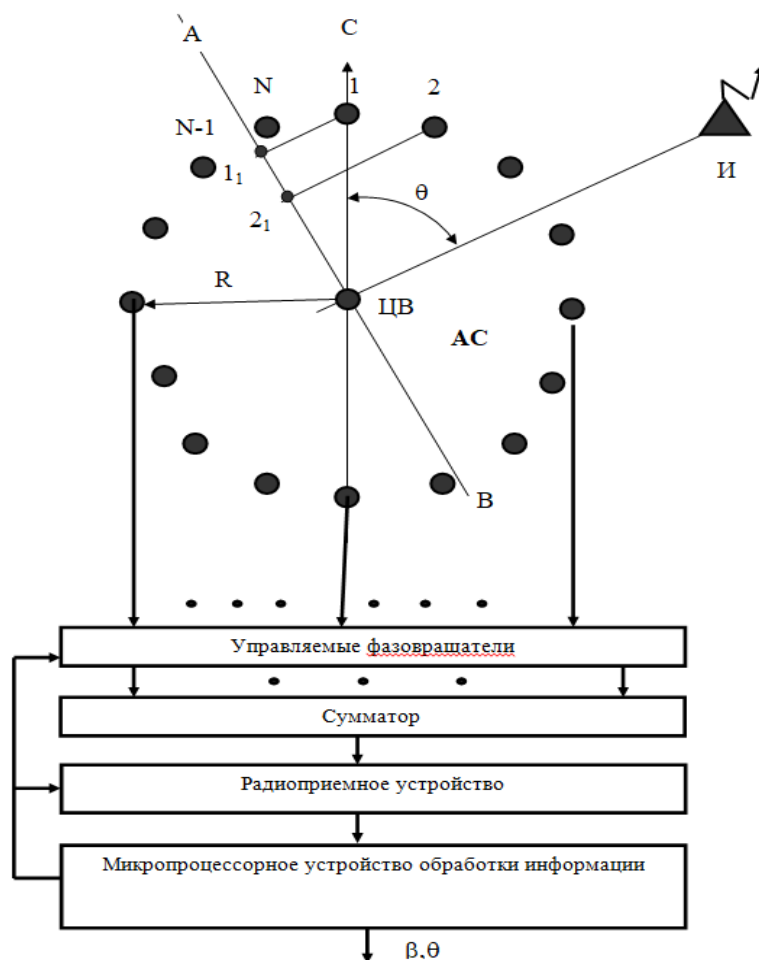


Рис. 2. – Структура пеленгатора с управляемыми ФВ.

Микропроцессорное устройство, в соответствии с выражением (1), вычисляет для каждого вибратора АС значение фазовой задержки и передает их в соответствующие ФВ, которые задерживают сигналы с вибраторов на расчетные значения, Сигналы после ФВ поступают на сумматор, где, при совпадении направления сканирования АС с направлением прихода сигнала от источника, наблюдается максимум.

Значения суммарных сигналов для разных значений азимутов и углов места поступают на микропроцессорное устройство, где определяются пеленг  $\theta$  и угол места  $\beta$  на источник излучения, при котором был зафиксирован максимальный сигнал.

По азимуту и углу места, зная структуру ионосферы (высоту, соответствующего слоя ионосферы) может быть локализован район источника сигнала – предполагаемого места землетрясения. Более точно координаты источника сигнала-предвестника землетрясения могут быть уточнены триангуляцией, с использованием сети пеленгаторов.

Достоинством такого пеленгатора является высокое быстродействие и высокая чувствительность, а недостатком – большие аппаратные затраты. При этом, необходимо учесть, что для предлагаемого пеленгатора быстродействие не является критичным.

Координаты ионосферного предвестника землетрясения могут быть определены также с помощью корреляционной обработки. На рис. 3 приведена упрощенная структурная схема такого пеленгатора. Назначение составных частей пеленгатора, аналогичны составным частям квазидоплеровского автоматического радиопеленгатора.

Антенная система представляет собой кольцевую антенную решетку, состоящую из вертикальных симметричных вибраторов, расположенных по окружности. Сигнал центрального вибратора используется в качестве опорного при измерении пеленга, т.к. его фаза не зависит от направления прихода волны.

Коммутатор предназначен для поочередного подключения кольцевых вибраторов антенны на вход однополосного модулятора и усиления принимаемых сигналов.

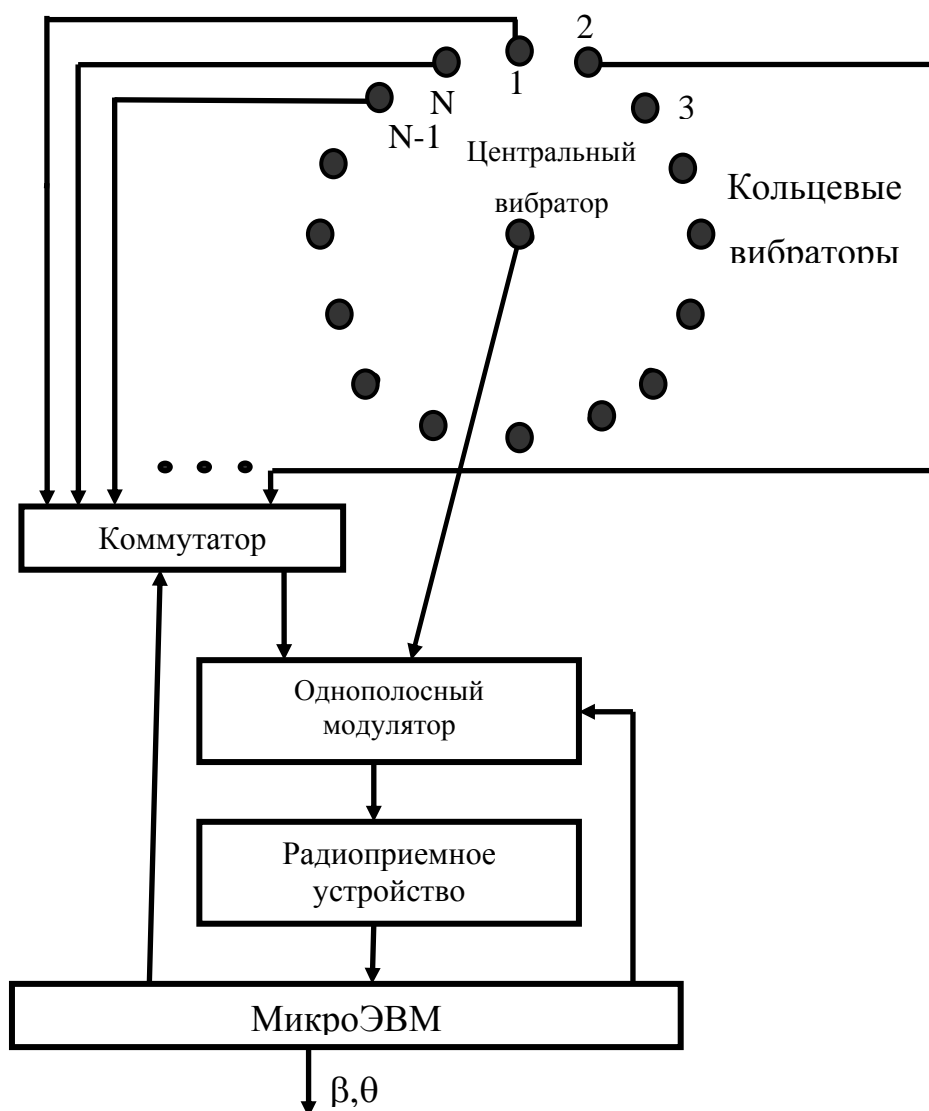


Рис. 3. – Упрощенная структура пеленгатора ионосферных предвестников землетрясений с корреляционной обработкой.

Однополосный модулятор включен в состав АС для выделения пеленгационной информации на выходе связного приемника на низкой стабильной частоте.

Радиоприемное устройство предназначено для выделения и переноса функции модуляции фазы с минимальными искажениями на стабильную измерительную частоту.

Сигнал на входе приемного устройства имеет вид, приведенный на рис. 4 и описывается выражением:

$$e(t) = A \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left( \frac{2\pi}{N} (i-1) - \theta \right) \right], \quad (2)$$

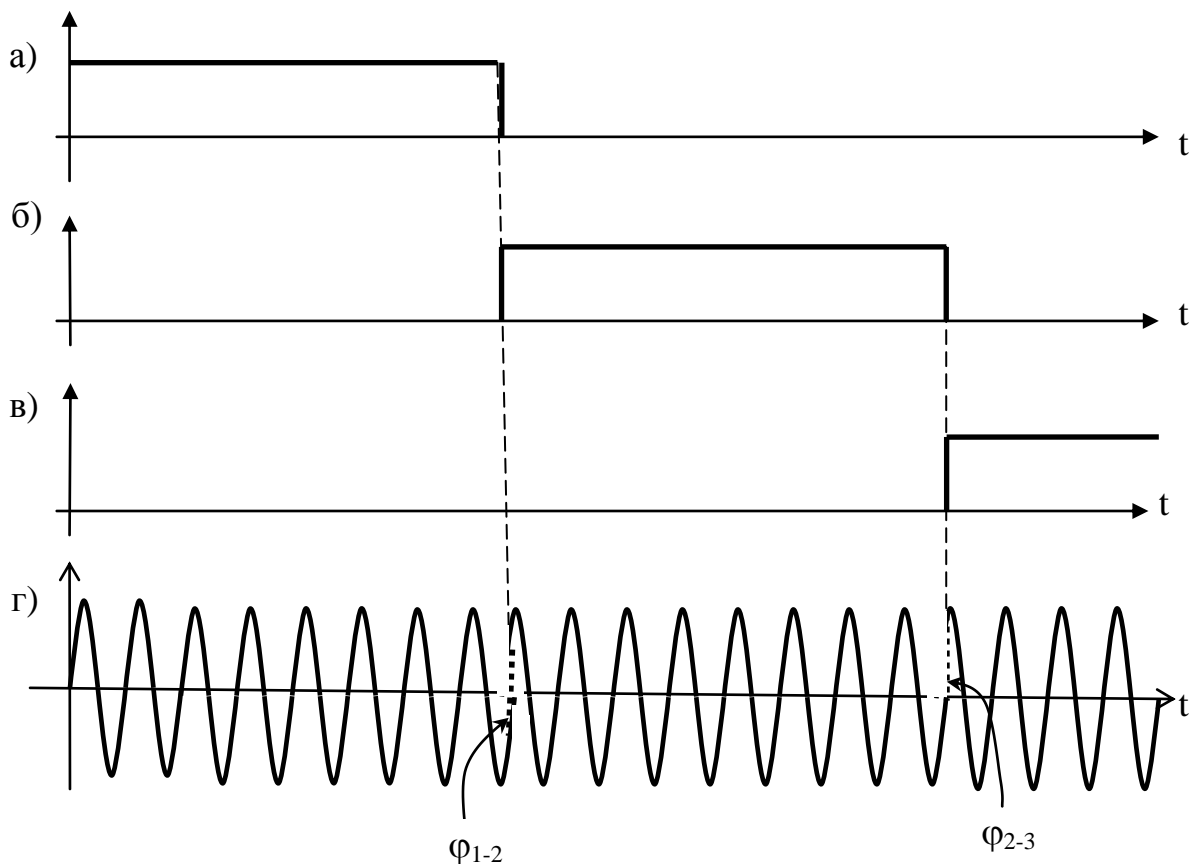


Рис.4. – Вид сигнала на выходе антенной системы. а), б), в) соответственно импульсы коммутации первого, второго и третьего вибраторов, г) сигнал на выходе радиоприемника.

Здесь,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ , соответственно, разности фаз сигналов, между вибраторами(1 – 2), и (2 – 3) на частоте  $\omega$ .

На рис. 5 приведена укрупненная блок-схема алгоритма определения пеленга на ионосферный предвестник землетрясения.

Суть корреляционной обработки заключается в том, что в микро ЭВМ производится определение разностей фаз сигналов  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$  и формируется последовательность сигналов вида (2), приведенных на рис. 4 г.

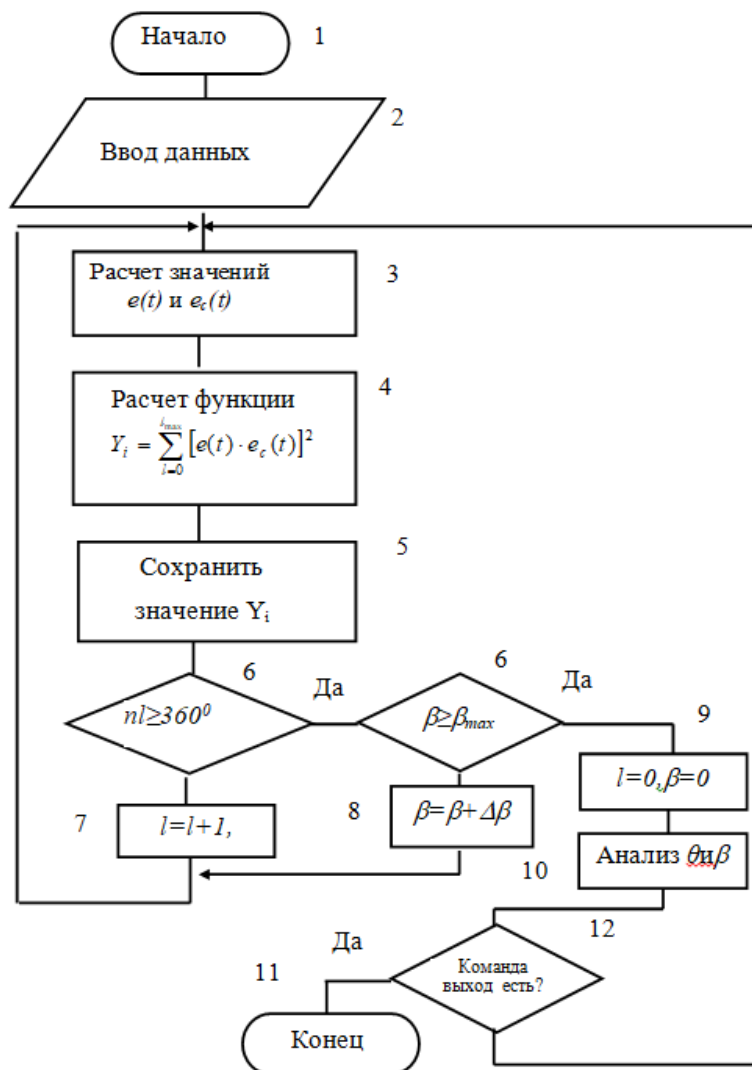


Рис. 5. – Алгоритм определения пеленга на ионосферный предвестник землетрясения.

Значение  $l$  увеличивается на единицу (блок 7).

Кроме того в ЭВМ для заданного азимута, угла места и частоты формирует синтезированный сигнал вида



$$e_c(t) = A \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left( \frac{2\pi(\kappa - 1)}{N} - nl \right) \right], \quad (3)$$

где:  $l$  – номер шага сканирования антенной решетки;  $\kappa$ –номер вибратора, для которого формируется синтезированный сигнал;  $n$ – шаг сканирования антенной решетки.

При этом, производится сканирование одновременно по  $\beta$ .

В дальнейшем производится корреляционная обработка входного сигнала: сигнал с каждого вибратора антенной системы перемножается на соответствующий этому вибратору синтезированный для заданного значения  $l$ (для заданного направления) сигнал и возводится в квадрат и суммируются (блок 4), т.е. находится выражение

$$Y_i = \left\{ A^2 \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left( \frac{2\pi}{N} (i - 1) - \theta \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \cos \left[ \omega t + \frac{2\pi R}{\lambda} \cos \beta \cos \left( \frac{2\pi(\kappa - 1)}{N} - nl \right) \right] \right\}^2$$

Сканирование по  $l$  и по  $\beta$  производится до тех пор, пока произведение  $nl$  не станет больше или равно  $360^0$  (блоки 6, 7), а  $\beta$  не станет равным или больше  $\beta_{\max}$  (блоки 6, 8).

Блок 10 определяет, при каких значениях  $l$  и  $\beta$  функция  $Y_i$  достигает максимального значения, которые и будут определять искомые значения пеленга  $\theta=ln$  и угла места  $\beta$  ионосферного предвестника землетрясения..

В связи с тем, что в эфире все время присутствуют шумы, то требуется дополнительная обработка и селекция сигналов ионосферных предвестников землетрясений от иных естественных и искусственных помех.

Если в пеленгаторах, используемых в навигации, радиоразведке, радио контроле приходится извлекать полезный сигнал из смеси сигнал+помеха, то

в пеленгаторе, пеленгующем ионосферный предвестник, необходимо извлекать из смеси помех только один из ее видов – ионосферный предвестник.

На рис. 6 приведена укрупненная блок-схема алгоритма вторичной обработки информации, с целью идентификации ионосферных предвестников землетрясений.

Блок 1 обеспечивает определение пеленгов на различных частотах, по алгоритму, приведенному на рис. 5.

Блоки 2, 3, 5, производят селекцию узкополосных сигналов.

Блоки 4, 7 выделяют кратковременные или широкополосные естественные и искусственные помехи от ионосферных предвестников землетрясений.

Ионосферные предвестники возникают на высотах, начиная от 60 километров, т.е. угол места  $\beta$  не может быть маленьким.

Исходя из этого, блок 6 выделяет ионосферный предвестник от остальных сигналов.

Пеленг со всех азимутов будет наблюдаться при пеленговании помех, вызванных солнечными вспышками или, если пеленгатор расположен над эпицентром землетрясения. Для этого требуется дополнительная обработка информации (блок 8 на рис. 6).

На рис. 7 приведен алгоритм дополнительной обработки информации.

Здесь блок 1 производит определение пеленгов аналогично блоку 1 на рис. 6. Селекцию помех, вызываемых солнечной вспышкой, производят блоки 2,3, 4, 5.

Если же пеленгатор на позиции 1 находится над эпицентром землетрясения, то на второй пеленгаторной позиции, разнесенной от первого на сотни километров в случае пеленгования помех, вызванных солнечной вспышкой, пеленг будет наблюдаться со всех азимутов, если же это помеха

---

ионосферный предвестник, то пеленгатор укажет направление на позицию первого пеленгатора.

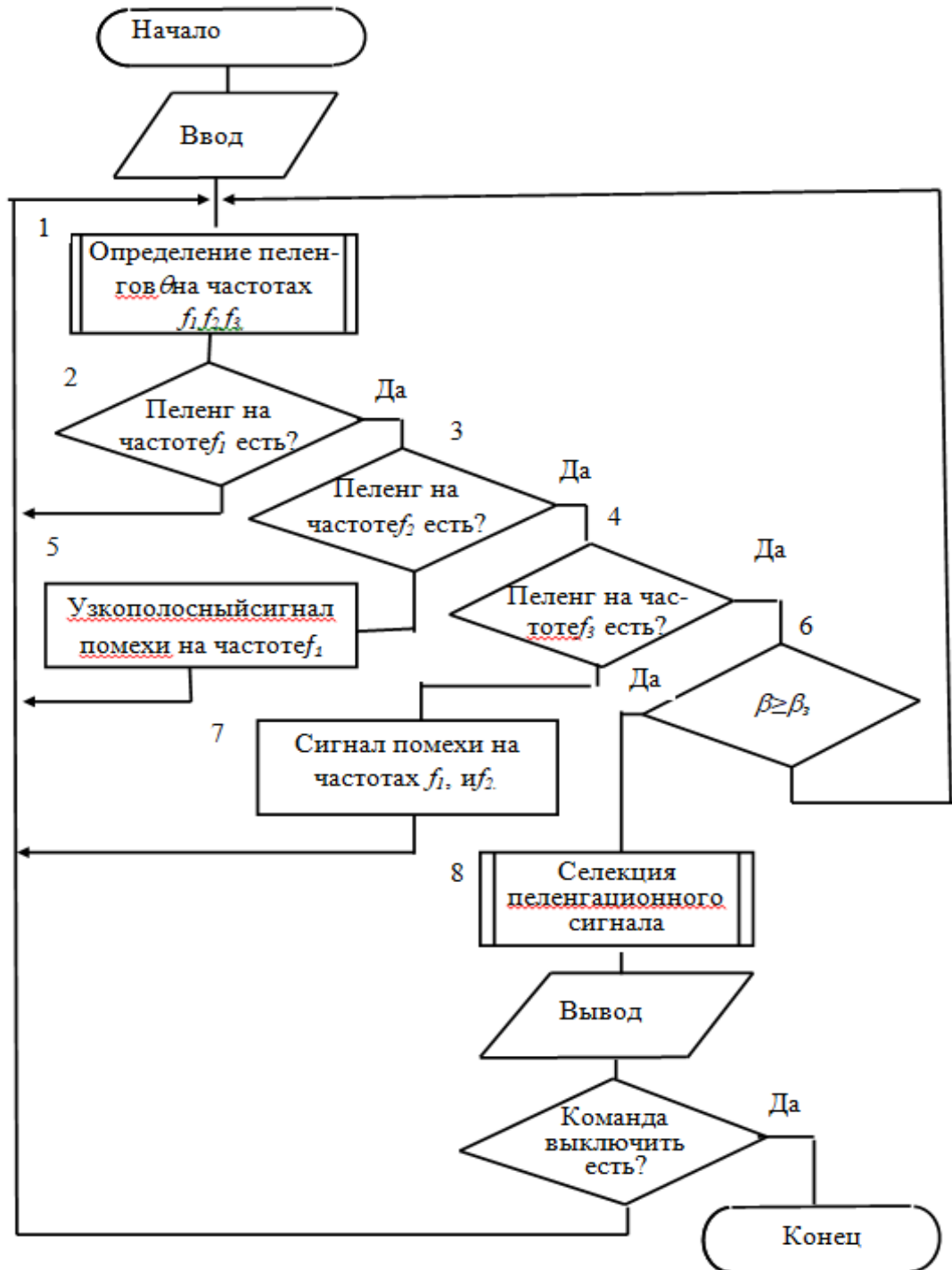


Рис. 6. – Вторичная обработка пеленгационной информации.

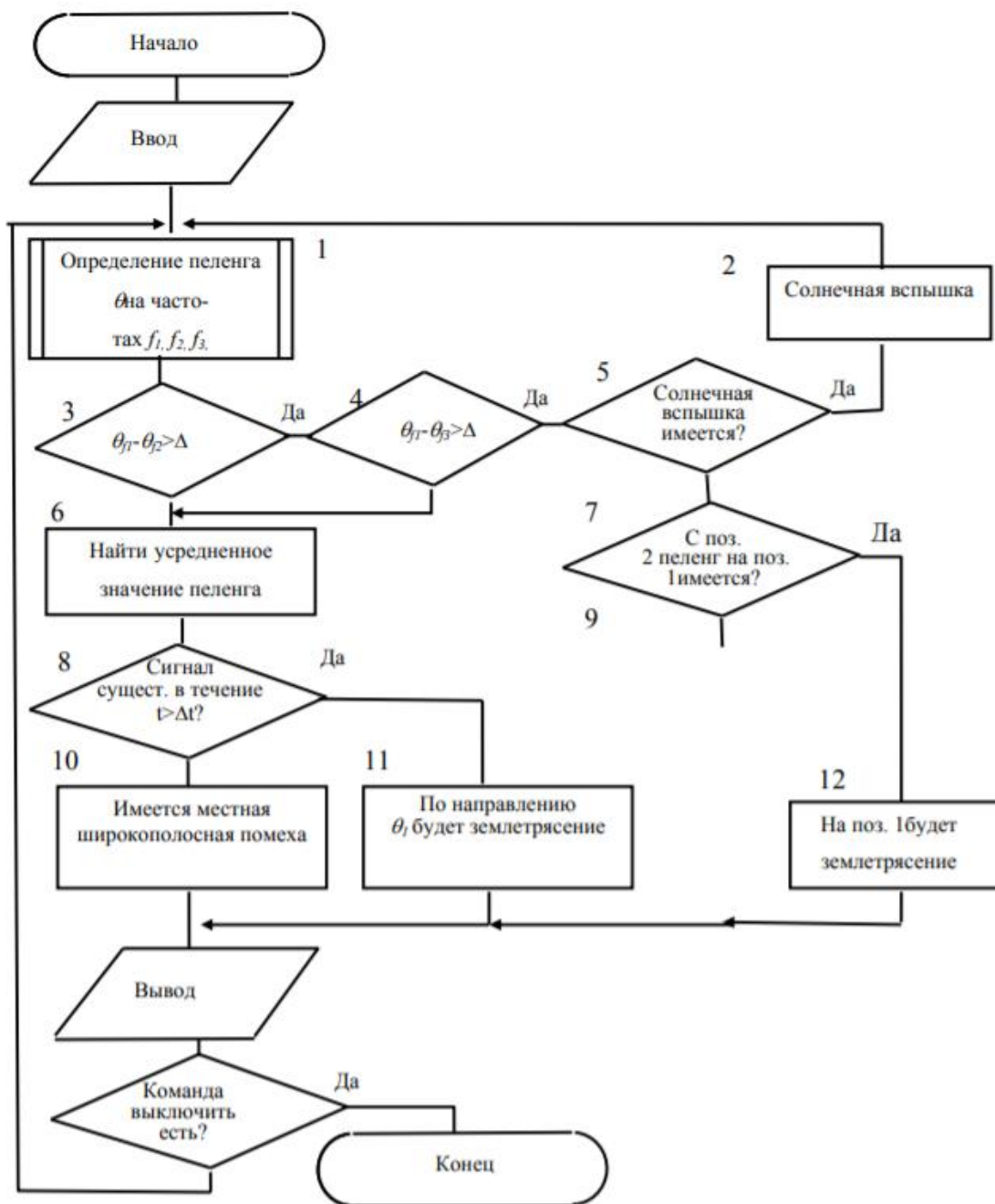


Рис. 7. – Алгоритм селекции сигнала

Если первая пеленгаторная позиция находится в районе эпицентра землетрясения, то на позиции 1 будет наблюдаться пеленг со всех азимутов, а остальные пеленгаторные позиции будут показывать пеленг в направлении позиции 1. Причем, при пеленговании ионосферного предвестника пеленг должен меняться в широких пределах (блоки 3, 4), а сигнал должен существовать в течение длительного времени (блок 8)

Если с позиции 2 на позицию 1 пеленг отсутствует, то требуется принятие решения сейсмологами, с учетом данных по другим предвестникам землетрясений

В связи с тем, что очаги ионосферных помех перед землетрясениями обычно бывают размерами примерно 30x30 км., то дискрет сканирования при удалении очага землетрясения от пеленгаторной позиции на 500 км. должен быть не более 3 градусов.

### Литература

1. Гуфельд И.Л., Асланов Г.К. и др. Отчет по научно-исследовательской работе «Исследование возможностей использования радиотехнических дистанционных методов для оценки сейсмоопасности». Институт физики Земли АН СССР, Москва 1990. Стр. 97-105

2. Депенева А.Х., Михайлов А.В., Деви М., Барбара А.К. Пространственные и временные вариации критических частот области F ионосферы над зоной подготовки экваториального землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия изд.: Российская академия наук ISSN: 0016-7940 Т. 47, № 1, 2007. Стр. 138-142.

3. Золотов О.В., Прохоров Б.Е., Намгаладзе А.А., Мартыненко О.В. Вариации полного электронного содержания ионосферы в период подготовки землетрясений // Химическая физика изд.: Российская академия наук ISSN: 0207-401x Т.30, №5, 2011. Стр. 84-87.

4. Пулинец С.А., Легенька А.Д. Пространственно-временные характеристики крупномасштабных возмущений электронной концентрации, наблюдаемых в области F ионосферы перед сильными землетрясениями // Космические исследования изд.: Российская академия наук ISSN: 0023-4206 Т. 41, № 3, 2003. Стр. 240-249.

5. Сергеева Н.Г., Турунен Е., Оглоблина О.Ф., Черняков С.М. Отклики на землетрясения в высокоширотной ионосфере // Геомагнетизм и



аэрономия изд.: Российская академия наук ISSN: 0016-7940Т. 49, № 5, 2009. Стр. 713-720.

6. Zhima Z. VLF radio signal anomalies associated with strong earthquakes / 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Pub.: IEEE. 2014.

7. Zhi Ma Z. R., Zhang X. M., Shen X. H. Ionospheric disturbances associated with Tonga Mw7.9 earthquake — Results from Langmuir Probe Instrument onboard DEMETER satellite / 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pub.: IEEE. 2010.

8. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Анализ причин возникновения аномальных ошибок в квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2009. - №2 (76). - С. 87-93. (0,75/0,35).

9. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Анализ причин возникновения аномальных ошибок в квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2009. - №2 (76). - С. 87-93. (0,75/0,35).

10. Асланов Г.К., Мамедов Л.К., Магомедов К.М. Математические модели процесса вычисления пеленга в аэродромных квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – №2. – С.267-272. (0,62/0,21 п.л.).

11. Асланов Г.К., Мамедов Л.К. Обнаружение пеленгационного сигнала методом формирования диаграммы направленности // Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике: материалы шестой Всероссийской конференции по актуальным проблемам внедрения и развития сектора IT-технологий, 28 – 29 сентября 2011 г. – Махачкала: ДГТУ, 2011. – С.39-42. (0,2/0,1 п.л.).

12. Ким В.П., Пулинец С.А., Хегай В.В. Теоретическая модель возможных изменений в ночной среднеширотной D-области ионосферы над зоной подготовки сильного землетрясения // Известия высших учебных

---

заведений. Радиофизика изд.: Национальный исследовательский нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского ISSN: 0021-3462 Т. 45, № 4, 2002. Стр. 289-296.

13. Сорокин В.М., Ружин Ю.Я. Электродинамическая модель процессов в атмосфере и ионосфере накануне землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия изд.: Российская академия наук ISSN: 0016-7940Т.55, №5, 2015.Стр. 641.

14. Jusoh M. H. Earthquake prediction technique based on GPS dual frequency system in equatorial region / 2008 IEEE International RF and Microwave Conference. Pub.: IEEE. 2008. Pp. 369-374

### References

1. Gufel`d I.L., Aslanov G.K. i dr. Otchet po nauchno-issledovatel`skoj rabote «Issledovanie vozmozhnostej ispol`zovaniya radiotexnicheskix distancionny`x metodov dlya ocenki sejsmoopasnosti» [Study of the possibilities of radio-technical remote methods using for seismic hazard assessing]. Institut fiziki Zemli AN SSSR, Moskva 1990. Str. 97-109

2. Depueva A.X., Mixajlov A.V., Devi M., Barbara A.K. Prostranstvenny`e i vremenny`e variacii kriticheskix chastot oblasti F ionosfery` nad zonoj podgotovki e`kvatorial`nogo zemletryaseniya [Spatial and temporal variations of critical frequencies of the ionosphere F region over the zone of Equatorial earthquake preparation]. Geomagnetizm i ae`ronomiyaizd.: Rossijskaya akademiya naukISSN: 0016-7940 Т. 47, № 1, 2007. Str. 138-142

3. Zolotov O.V., Proxorov B.E., NamgaladzeA.A., Marty`nenko O.V. Variacii polnogo e`lektronnogo soderzhaniya ionosfery` v period podgotovki zemletryasenij [Variations of the total electronic content of the ionosphere during the earthquakes preparation]. Ximicheskaya fizikaizd.: Rossijskaya akademiya nauk ISSN: 0207-401xТ.30, №5, 2011.Str. 84-87



4. Pulinecz S.A., Legen`ka A.D. Prostranstvenno-vremenny`e xarakteristiki krupnomasshtabny`x vozmushhenij e`lektronnoj koncentracii, nablyudaemy`x v oblasti F ionosfery` pered sil`ny`mi zemletryasenyami [Spatio-temporal characteristics of large-scale electronic concentration perturbations observed in the ionosphere F region before strong earthquakes]. Kosmicheskie issledovaniya izd.: Rossijskaya akademiya nauk ISSN: 0023-4206 T. 41, № 3, 2003. Str. 240-249

5. Sergeeva N.G., Turunen E., Ogloblina O.F., Chernyakov S.M. Otkliki na zemletryaseniya v vy` sokoshirotnoj ionosfere [Responses to the earthquake in the high-latitude ionosphere]. Geomagnetizm i ae`ronomiya izd.: Rossijskaya akademiya nauk ISSN: 0016-7940 T. 49, № 5, 2009. Str. 713-720

6. Zhima Z. VLF radio signal anomalies associated with strong earthquakes. 2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). Pub.: IEEE. 2014.

7. Zhi Ma Z. R., Zhang X. M., Shen X. H. Ionospheric disturbances associated with Tonga Mw7.9 earthquake — Results from Langmuir Probe Instrument onboard DEMETER satellite. 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pub.: IEEE. 2010.

8. Gaivoronskaya T. V., Karpachev A. T. Ionosphere indicators of seismic activity. 2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). Pub.: IEEE. 2017.

9. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Analiz prichin vozniknoveniya anomal`ny`x oshibok v kvazidoplerovskix avtomaticheskix radiopelengatorax [Analysis of the causes of anomalous errors in quasi-Doppler automatic radio direction finders]. Nauchno-texnicheskie vedomosti SPbGPU. 2009. №2 (76). S. 87-93. (0,75/0,35).

10. Aslanov G.K., Mamedov L.K., Magomedov K.M. Matematicheskie modeli processa vy`chisleniya pelenga v ae`rodromny`x kvazidoplerovskix avtomaticheskix radiopelengatorax [Mathematical models of the bearing calculation



process in aerodrome quasi-Doppler automatic radio direction finders]. Nauchno-  
texnicheskie vedomosti SPbGPU. 2008. N2. S.267-272. (0,62/0,21 p.l.).

11. Aslanov G.K., Mamedov L.K. Obnaruzhenie pelengacionnogo signala  
metodom formirovaniya diagrammy` napravlenosti [Detection of a direction  
finding signal by directional diagram forming method]. Sovremennyye  
informacionny`e tekhnologii v proektirovanii, upravlenii i e`konomie: materialy`  
shestoj Vserossijskoj konferencii po aktual`ny`m problemam vnedreniya i razvitiya  
sektora IT-tekhnologij. September , 28-29, 2011. Makhachkala: DSTU, 2011.  
Pp.39-42. (0.2/0.1 PS.).

12. Kim V.P., Pulinez S.A., Xegaj V.V. Teoreticheskaya model`  
vozmozhny`x izmenenij v nochnoj sredneshirotnoj D-oblasti ionosfery` nad zonoj  
podgotovki sil`nogo zemletryaseniya [Theoretical model of possible changes in the  
ionosphere night-time mid-latitude D-region above the zone of a strong earthquake  
preparation]. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Radiofizika izd.: Nacional`ny`j  
issledovatel`skij nizhegorodskij gosudarstvenny`j universitet im. N.I. Lobachevskogo.  
ISSN: 0021-3462 Vol.45, No. 4, 2002. Pp. 289-296

13. Sorokin V.M., Ruzhin Yu.Ya. E`lektrodinamicheskaya model`  
processov v atmosfere i ionosfere nakanune zemletryaseniya [Electrodynamic  
model of the processes in the atmosphere and ionosphere on the earthquake eve].  
Geomagnetizm i ae`ronomiya izd.: Rossijskaya akademiya. ISSN: 0016-7940 Vol.  
55, №. 5, 2015. P. 641

14. Jusoh M. H. Earthquake prediction technique based on GPS dual  
frequency system in equatorial region. 2008 IEEE International RF and Microwave  
Conference. Pub.: IEEE. 2008. Pp. 369-374