

УДК 534.2

## ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИРОДЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТЬЮ НЯЦ РК

<sup>1)</sup>Смирнов А.А., <sup>1)</sup>Дубровин В.И., <sup>2)</sup>Эверс Л.

<sup>1)</sup>Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

<sup>2)</sup>Королевский метеорологический институт Нидерландов, Голландия

Приведены результаты исследования вторых по частоте встречаемости сигналов, регистрируемых инфразвуковой станцией IS31-Актюбинск. Анализ спектрального состава этих сигналов (не более 0,5 Гц), азимут от станции на источник (совпадающий с направлением на северную Атлантику), позволили предположить, что станция может регистрировать сигналы от штормов в Баренцевом море – микробаромы. Привлечение для комплексного анализа метеорологических и сейсмических данных подтвердило сделанное предположение.

Начиная с марта 2005 г., по записям казахстанской инфразвуковой станции IS31-Актюбинск в автоматическом режиме ведется поиск когерентных сигналов. Алгоритм поиска основан на методе прогрессивной многоканальной корреляции (PMCC - Progressive Multi-Channel Correlation) [1]. Главное достоинство метода заключается в его способности посредством поиска взаимной корреляции между записями инфразвуковой или сейсмической групп выделять сигналы, регистрируемые не одним, а несколькими элементами этих групп. Кроме того, метод позволяет детектировать сигналы от постоянно действующих источников. Записи сигналов 8 элементов станции IS31-Актюбинск, обрабатываемые изо дня в день на основе PMCC, заносятся в автоматический бюллетень, представляющий набор строк, расположенных в хронологическом порядке и содержащих информацию об основных параметрах сигнала события - время, азимут, скорость, частота, амплитуда. На рисунке 1 показано азимутальное распределение событий, зарегистрированных станцией за период с 01 по 31 января 2008 г.

Как следует из рисунка 1, существуют направления, по которым когерентные сигналы приходят регулярно, т.е. имеется ряд постоянно действующих источники инфразвука, регистрируемых станцией IS31-Актюбинск. Некоторые результаты изучения этих источников отражены в [2]. Так, например, изучение наиболее представительных сигналов с азимутом прихода 180° - 195°, проведенное с использованием космоснимков и путем наблюдений временной инфразвуковой группой, установленной внутри сейсмической группы Акбулак, показало, что источником этих сигналов является группа газовых факелов месторождения Жанажол [2]. Из рисунка 1 также следует, что на северо-западе от станции находится источник, второй по представительности детектированных в бюллетенях. Анализ сигналов от этого источника показал (рисунке 2), что их преобладающие частоты существенно ниже, чем у сигналов от газовых факелов месторождения Жанажол.

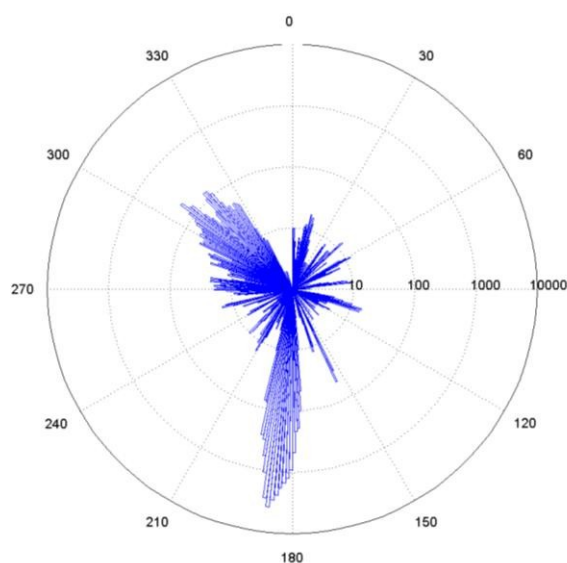


Рисунок 1. К анализу азимутального распределения детектированных по станции IS31-Актюбинск за январь 2008 г.

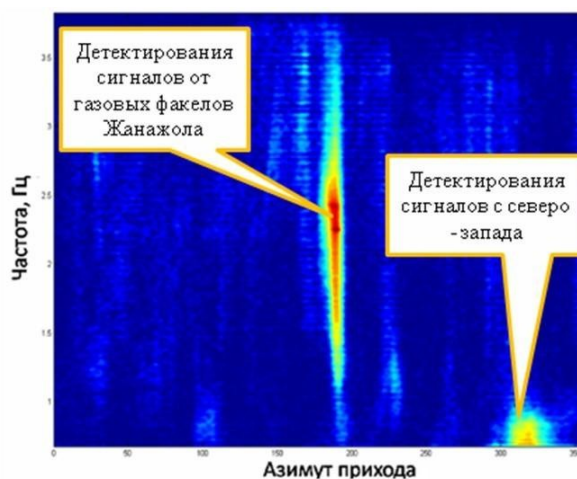


Рисунок 2. Частотная характеристика детектированных с различными азимута прихода

Преобладающие частоты, как правило, не превышают 0,5 Гц, азимут от станции на источник сигналов совпадает с направлением на северную Атлантику, это позволило предположить, что станции могут регистрировать микробаромы - сигналы от штормов в этом регионе.

Впервые микробаромы были наблюдаемы Беньюфом и Гутенбергом [3], предположившими, что эти сигналы генерируются областями низкого давления. В 1950 г. Лонгвэ-Хиггинс [4] впервые сформулировал основы современных представлений о механизме генерации микробаром. Он, в частности, предположил, что микросейсм генерируются в результате колебаний давления на поверхности, образующихся в области встречи систем бегущих океанических волн одинаковой частоты [5]. В области такой встречи образуются стоячие водяные волны (СВВ). Область СВВ генерирует периодически изменяющееся давление на дно океана, не затухающее с глубиной [4, 6]. Под влиянием этого давления в земной коре возникают слабые колебания, так называемые штормовые микросейсм. Стоячие волны образуются при столкновении двух противоположно направленных систем бегущих волн или взаимодействии встречного ветра с волнами зыби. Область стоячих водяных волн, располагающаяся в тыловой части циклона (тайфуна), составляет сотни квадратных километров. Такие колебания могут быть уподоблены поршню, совершающему возвратно-поступательные движения. Поднимаясь вверх, они образуют микробаромы, вниз — микросейсм на дне. Колебания, вызванные стоячими волнами, когерентны (синфазны). Этот комплекс явлений экспериментально подтвержден и подробно описан в работах специалистов Ламонтской геофизической обсерватории и др. [7, 8]. Микросейсм, вызванные стоячими водяными волнами движущихся циклонов, распространяются на большие расстояния. Их записывают все сейсмические станции мира, работающие в непрерывном режиме. Например, микросейсм от атлантических циклонов фиксируют не только станции, расположенные на европейском континенте, но и станции азиатские (в Ташкенте и Ашхабаде), сибирские (в Иркутске и Новосибирске) и многие другие [9].

Для выяснения того, регистрирует ли инфразвуковая станция IS31-Актюбинск именно микробаромы от океанических штормов, проведен комплексный анализ метеорологических, сейсмических и инфразвуковых данных. Учитывая, что в областях образования СВВ высокой энергии должны одновременно генерироваться микросейсм и микробаромы, проведен анализ сейсмических и инфразвуковых данных за один и тот же период времени с 01 июля 2007 г. по 30 июня 2008 г. С использованием детектора РМСС в полосе частот от 0,07 Гц до 0,5 Гц проведен поиск когерентных сигналов, зарегистрированных четырьмя

сейсмическими группами: Акбулак, Боровое, Каратау и Маканчи, - и инфразвуковой группой IS31- Актюбинск. На рисунке 3 в виде двумерной гистограммы количества детектирований за год наблюдения представлены результаты поиска.

Рисунок показывает, что в картинах распределения низкочастотных детектирований по азимутам, имеются как общие черты для всех станций, так и индивидуальные особенности. Наиболее ясным является распределение событий для станции Акбулак. Эта сейсмическая группа, за редким исключением, регистрировала искомые сигналы с азимутами прихода  $300^{\circ} - 360^{\circ}$ . На гистограмме для группы Боровое также отчетливо проявляются детектирования с азимутами в диапазоне  $300^{\circ} - 360^{\circ}$ , однако в летние месяцы, наряду с более редкими сигналами северо-западного направления, группой Боровое регистрировались сигналы с южного направления. Для группы Каратау картина распределения регистрируемых событий по азимутам в целом аналогична картине для станции Боровое, но в зимние месяцы группа Каратау дополнительно регистрировала еще один источник, находящийся к востоку от станции. Станция Маканчи почти весь год (кроме периода январь – апрель) регистрировала некий источник, находящийся к югу от станции. В январе – апреле станция Маканчи, как и все выше-названные станции, регистрировала источник, находящийся к северо-западу от нее. Инфразвуковая группа IS31-Актюбинск, подобно сейсмической группе Акбулак, регистрировала сигналы, приходящие с северо-запада, а в летние месяцы, иногда - сигналы южного направления. Таким образом, хотя общая картина меняется от станции к станции, все сейсмические и инфразвуковые станции регистрировали сигналы от источника, находящегося от них в северо-западном направлении.

По метеорологическим данным, таким как карты высоты и периода водяных волн на всей площади мирового океана, были найдены области, где образовывались области СВВ и где, в свою очередь, могли генерироваться микробаромы и микросейсм. Для расчета амплитуды микробаром или микросейсм в идеальном случае необходимо выполнить следующие процедуры: рассчитать спектр направленности водяных волн для каждого из значений, по которым построены карты; определить области, где волны бегут во встречных направлениях [10]. Поскольку реализация этого метода требует больших затрат машинного времени, применен более простой метод. С учетом того, что области СВВ находятся вблизи мест, где водяные волны имеют максимальную энергию [11], для каждого узла карты рассчитана величина, пропорциональная энергии водяной волны, - квадрат отношения амплитуды водяной волны к ее периоду.

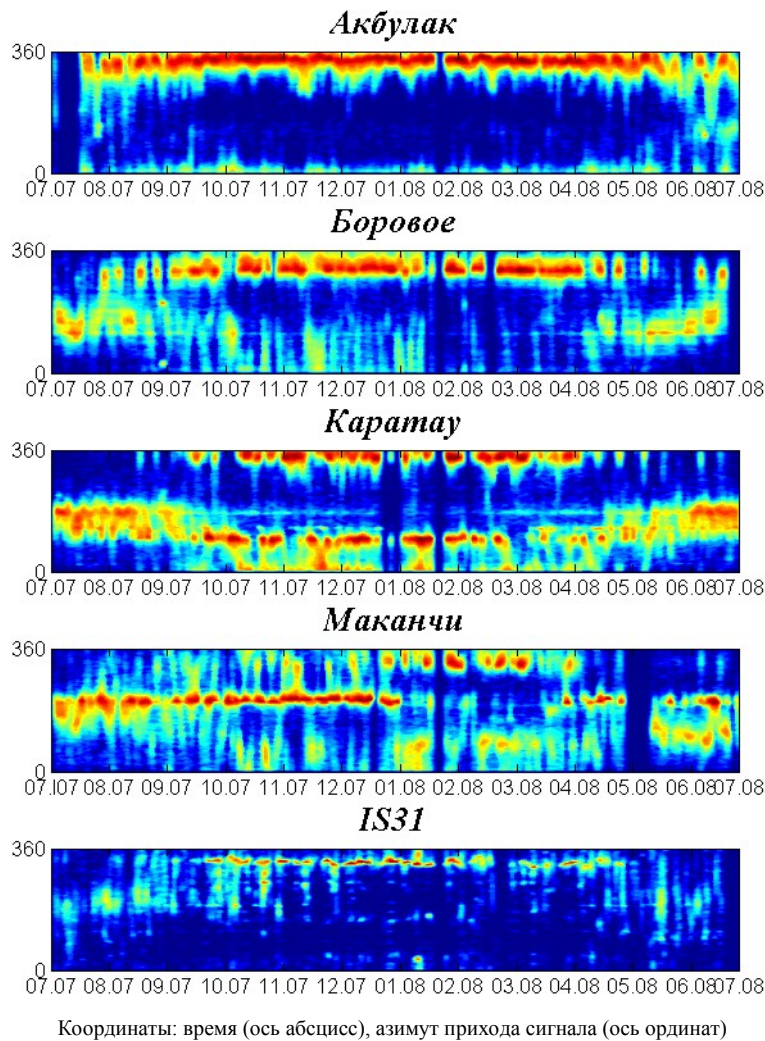


Рисунок 3. Двумерные гистограммы количества детектирований в полосе частот 0,07 – 0,5 Гц за период 01 июля 2007 г. - 30 июня 2008 г по сейсмическим группам и инфразвуковой станции IS31-Актюбинск

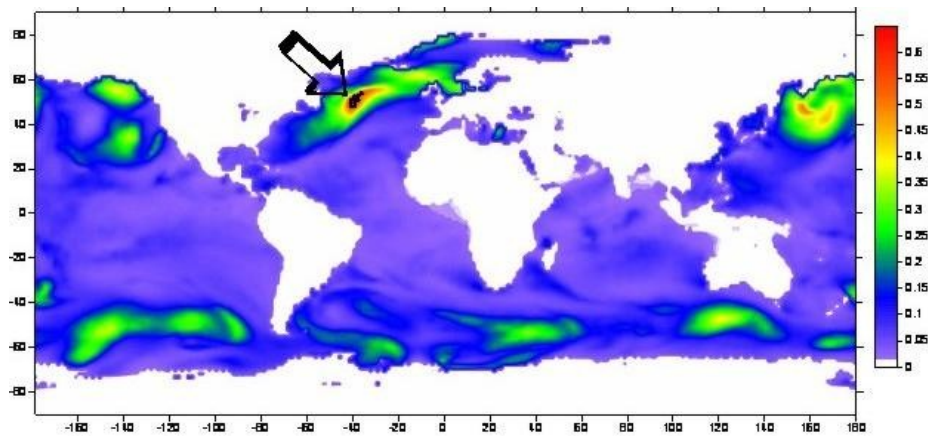
В соответствии с принятой точкой зрения на образование микросейсм и микробаром, наряду с максимальной энергией водяной волны, должна быть максимальна и энергия самих микросейсм и микробаром. Исходные данные для расчетов - значения высоты и периода водяных волн, - взяты из архивов Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) за январь 2008 г. Используются материалы проекта расширенной переобработки архивных данных (ERA interim [12]), открытые для свободного доступа в сети интернет. Данные по высоте и периоду водяных волн для всего мирового океана представлены по равномерной прямоугольной сетке с шагом  $1,5^\circ$  по широте и долготе. Для каждого дня января месяца 2008 г. были отобраны по два значения параметров, для 0 и 12 час, по которым затем были рассчитаны значения квадратов отноше-

ния высоты водяной волны к ее периоду для каждого узла сетки. Затем из полученных наборов были выбраны 10 максимальных значений этих параметров для региона северной Атлантики. На рисунке 4 приведен пример результатов расчета пространственного распределения энергии водяных волн и 10 точек, где энергия микросейсм - микробаром должна быть, в соответствии с принятыми допущениями, максимальной. Приведенный пример описывает распределение энергии водяных волн для 0 часов 26 января 2008 г.

Такие места в мировом океане с максимальной энергией, где могли генерироваться микросейсм и микробаромы, найдены для каждого дня января 2008 г. Как показано выше (рисунок 3), именно из этих мест на 4 сейсмические группы и инфразвуковую станцию регулярно приходили низкочастотные сигналы.



**ОБЪЯСНЕНИЕ ПРИРОДЫ ИСТОЧНИКОВ КОГЕРЕНТНЫХ  
НИЗКОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ МОНИТОРИНГОВОЙ СЕТЬЮ НЯЦ РК**



Стрелка - область максимальных значений энергии водяных волн для северной Атлантики, показанных черными точками

*Рисунок 4. Распределение энергии микросейсм/микробаром в мировом океан, рассчитанное по данным проекта ERA Interim ECMWF 26 января 2008 г.*

Перед использованием данных сейсмических групп для уточнения местоположения источников низкочастотных сигналов проведены специальные работы с целью снижения погрешности определения азимутов прихода сигналов. Известно, что эти погрешности вызваны геологическими неоднородностями различного масштаба в местах подхода и на пути распространения сейсмической энергии к группам, а величина погрешностей зависит от эпицентрального расстояния и азимута прихода волн [13]. Для определения поправок использован следующий метод. По данным Международного сейсмологического центра (International Seismological Center, ISC) были отобраны пять эталонных сильных землетрясений (с магнитудой более 5), произошедших в северной Атлантике [14], начиная с 2006 г. Из бюллетеней ISC были взяты координаты эпицентров этих землетрясений и затем рассчитаны азимуты от четырех сейсмических групп на эпицентры этих землетрясений (истинные азиму-

ты). Затем по волновым формам записей сейсмических групп Акбулак, Боровое, Каратау, Маканчи, определены азимуты на эталонные землетрясения (экспериментальные азимуты). Разности между истинными и экспериментальными азимутами взяты как искомые поправки (таблица 1).

Как следует из таблицы 1, рассчитанные поправки существенно различаются для станций как по знаку, так и по абсолютной величине. Поправки использованы при детектировании низкочастотных когерентных колебаний, зарегистрированных четырьмя сейсмическими группами в течение одного месяца наблюдений. На рисунке 5 представлена двумерная гистограмма детектирований в полосе частот 0,07 – 0,5 Гц для всех четырех сейсмических групп и инфразвуковой станции за период с 01 по 31 января 2008 г. Для сравнения белыми линиями на гистограммы нанесены исправленные ожидаемые азимуты СВВ на области максимальной энергии.

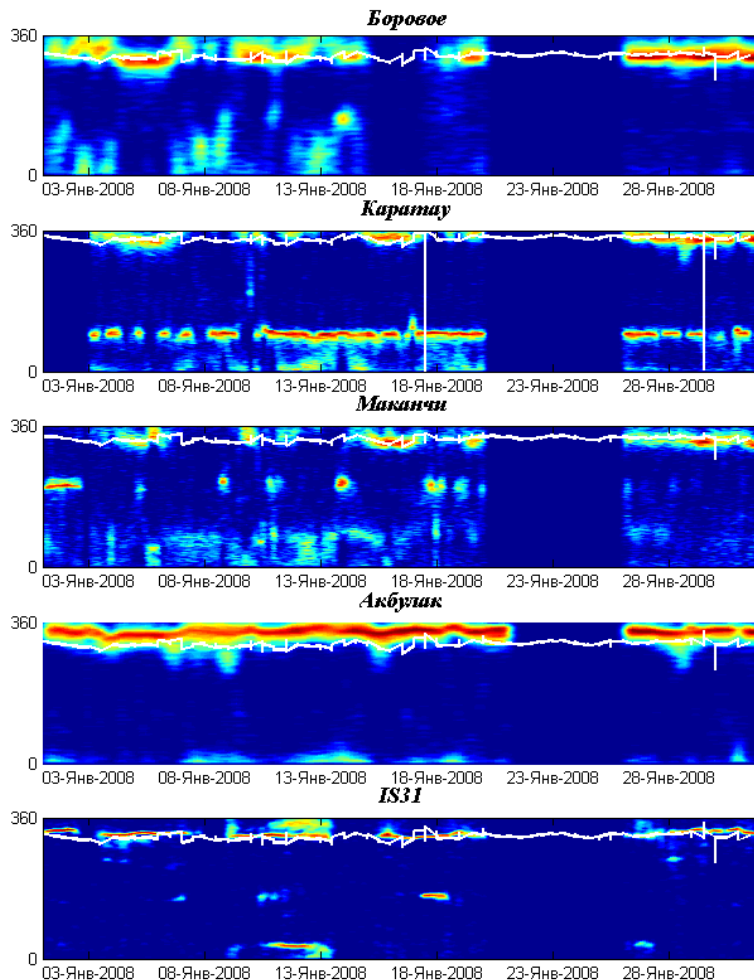
*Таблица 1. Параметры эталонных землетрясений и азимутальные поправки для сейсмических групп*

Дата и время события (ч., мин., сек.)	Широта, с.ш. Долгота, в.д.	Магнитуда	Акбулак		Боровое		Каратау		Маканчи	
			Расстояние, км.	Поправка, град.	Расстояние, км.	Поправка, град.	Расстояние, км.	Поправка, град.	Расстояние, км.	Поправка, град.
29.11.2006 15:38:43	53,82 -35,41	5,3	6099	-6,8	6309	-5,4	7152	15,9	7382	4,4
23.05.2007 4:41:47	52,37 -31,76	5,5	6001	-14,7	6254	-9,0	7059	27,5	7337	1,6
06.05.2008 8:47:11	53,47 -35,2	5,2	6112	-3,9	6328	-14,2	7166	19,3	7403	-5,9
29.05.2008 15:45:57	64,02 -21,11	6,2	4835	-5,8	4964	-9,3	5866	20,9	6021	10,8
21.02.2009 16:53:25	55,09 -41,63	4,9	6325	-10,7	6476	-12,8	7366	18,8	7530	-1,4
01.01.2010 9:37:10	42,39 -30,54	5,2	6622	-10,9	-	-	7680	29,4	8098	7,3
Среднее значение поправки, град.			-8,8		-9,3		20,1		3,0	

Для трех сейсмических групп: Боровое, Каратау и Маканчи, - а также для инфразвуковой группы IS31-Актюбинск имеет место достаточно хорошее совпадение наблюдаемых и ожидаемых азимутов. Для группы Акбулак ожидаемые значения азимутов на источник совпадают с краем полосы наблюдаемых значений. Полученный результат доказывает природу источника постоянно регистрируемых станциями мониторинговой сети низкочастотных сигналов. Это – микросейсм и микробаромы.

Таким образом, результаты комплексного анализа метеорологических, сейсмических и инфразвуковых данных позволили однозначно установить природу значительной части детектируемых когерентных низкочастотных сигналов - микросейсм и микробаром: большая часть микросейсм и микробаром, регистрируемых казахстанскими станциями, генерируется в северной Атлантике. Сейсмические группы Акбулак и Боровое, а также инфразвуковая группа IS31-Актюбинск установлены в северной части Казахстана. Согласно полученным результатам, северо-

атлантические микросейсм и микробаромы преобладают в составе низкочастотного шума этих станций. На станциях Маканчи и Каратау, расположенных южнее, низкочастотный шум включает в себя и другие компоненты с источниками в других районах. В [15] описан один из возможных источников сигналов, регистрируемых станциями Каратау и Маканчи в микросейсмической полосе частот. Это – ледники Тянь-Шаня, постоянно генерирующие слабые землетрясения. Район Центрального Тянь-Шаня расположен к востоку от станции Каратау и к югу от станции Маканчи, направление на который хорошо согласуется с выявленными источниками сигналов. Однако проверка этой гипотезы, а также изучение природы других, более слабых источников микросейсмического шума требует дополнительных исследований. Остается открытым также вопрос по станции Акбулак о причинах незначительного (до 15°) несовпадения ожидаемого и наблюдаемого направлений на области СВВ с наибольшей энергией в северной Атлантике.



Белая линия – исправленные ожидаемые азимуты на области СВВ максимальной энергии

Рисунок 5. Двумерная гистограмма количества детектированных в полосе частот 0,07 – 0,5 Гц за период с 01 по 31 января 2008 г. по сейсмическим группами и инфразвуковой станции IS31-Актюбинск

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Cansi, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method / Y.Cansi //
2. Smirnov, A. Preliminary Results of Localization and Characterization of Steady Infrasonic Source as Detected by I31KZ / A. Smirnov [et al] // Infrasonic Technology Workshop Tokyo, Japan, 13 – 16 November, 2007.
3. Benioff, H. and B. Gutenberg, 1939: Waves and currents recorded by electromagnetic barographs. Bull. Am. Met. Soc., 20, 421.
4. Longuet-Higgins, M. S. A theory of the origin of microseisms / M. S. Longuet-Higgins // Phil. Trans. R. Soc. A., 1950. - 243. - P. 1 – 35.
5. Kedar, S. The origin of deep ocean microseisms in the North Atlantic Ocean / S Kedar [et al] // Proc. R. Soc. A, 464. - P. 777 – 793.
6. Табулевич, В.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана // В.Н. Табулевич, Е.А. Пономарев, А. Г. Сорокин, Н.Н. Дреннова, 2001. № 2. С. 235 – 244.
7. Табулевич, В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний / В.Н. Табулевич. - Новосибирск, 1986.
8. Tabulevich, V. N. Microseismic and Infrasonic Waves / V.N. Tabulevich // Heidelberg, 1992.
9. Табулевич, В. Н. Влияние штормовых вибраций на землетрясения / В.Н. Табулевич [и др.] // Природа М.: Наука, 2002. №10. С. 12 – 16.
10. Willis, Mark C.; Garces, M.; Hetzer, C.; Businger, S. (2004). "P2. 5 Source Modeling Of Microbaroms In The Pacific". AMS 2004 Annual Meeting. Retrieved 2007-11-22.
11. Evers, L. G. Infrasonic. - 36, L23808, doi: 10.1029/2009GL041323.
12. [http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim\\_daily/](http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/)
13. Синева, З. И. Об оценках азимутов и медленности для региональных фаз по данным сейсмической группы PS 23-Маканчи / З.И. Синева // Вестник НЯЦ РК, 2005. Вып.2 (22) С. 46 - 52.
14. <http://www.isc.ac.uk/search/bulletin/rectang.html>
15. Михайлова, Н. Н. Ледниковые землетрясения Центрального Тянь-Шаня / Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Вестник НЯЦ РК, 2009. - Вып. 3. С. 120 - 126.

## **БАҒАМДАҒАНДА МИКРОБАРОМДАР БОЛЫП ТАБЫЛАТЫН СИГНАЛДАРДЫ ЗЕРДЕЛЕУ**

<sup>1)</sup>Смирнов А.А., <sup>1)</sup>Дубровин В.И., <sup>2)</sup>Эверс Л.

*ҚР ҰҰО Геофизикалық зерттеулер институты, Құрчатов, Қазақстан*

IS31-Ақтөбе инфрадыбысты станциясымен тіркелетін, ақпараттылығы бойынша екінші болып келетін сигналдарды зерттеу нәтижелері келтірілген. Бұл сигналдарды (0,5 Гц кәп емес) талдауы, азимуты станциядан сигнал кәзіне (солтстік Атлантика бағытына тәра келетін), станция, Баренц теңізіндегі дауылдан сигналдарын – бикробаромдар – тіркейтiнiң болжауына мнмкiндiк берген. Кешендi талдауына метеорологиялық және сейсмикалық деректерiн тартуы осы болжамды растаған.

## **EXPLANATION OF THE NATURE OF COHERENT LOW-FREQUENCY SIGNAL SOURCES RECORDED BY MONITORING STATION NETWORK OF THE NNC RK**

<sup>1)</sup>A.A. Smirnov, <sup>1)</sup>V.I. Dubrovin, <sup>2)</sup>L.G. Evers

<sup>1)</sup>*Institute of Geophysical Research, NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*  
<sup>2)</sup>*Koninklijk nederlandse meteorologisch Instituut (KNMI), de Bilt, Nederlands*

The results of secondary representative signals recorded by IS31-Aktyubinsk has been shown. Spectral analysis of these signals (not higher than 0.5 Hz), station-to-source azimuth (coinciding with the direction to the North Atlantic) let us suppose that the station may record storm signals from the Barents Sea – microbaroms. Meteorological and seismic data applied to the complex analysis proved this out.