

## Анализ данных приборных систем широкополосных градиентометров с помощью метода наложенных эпох \*

С. А. Шопин, С. А. Скобельцын

*Аннотация.* Представлены результаты анализа с помощью метода наложенных эпох временных рядов измерений специальных гравиметрических приборов – широкополосных градиентометров. Показано наличие суточного, годовичного, сезонного, а также ряда других ритмов в сигналах приборов.

*Ключевые слова:* широкополосный градиентометр, ритмы, периодограммы, метод наложенных эпох.

В качестве исходных данных для анализа выступают результаты гравиметрических измерений, выполняемых в Тульском государственном университете приборными системами широкополосных градиентометров (ШГМ). Приборные системы разработаны под руководством д-ра техн. наук, проф. О.В. Мартынова и используются при проведении комплексного сейсмопрогнозного мониторинга. С использованием их данных получен ряд интересных результатов в области прогноза землетрясений [1, 2]. С физической точки зрения регистрируемые сигналы представляют собой углы поворота крутильных систем специальной конструкции [1]. С математической точки зрения показания приборных систем представляют собой непрерывный ряд отсчетов нескольких датчиков (каналов), представленных в виде вещественных чисел в диапазоне от -255 до 255. Показания снимаются непрерывно с интервалом от 1 секунды до 0.5 минуты (для отдельных каналов этот шаг фиксирован, но может отличаться в разных каналах).

Для изучения частотной структуры данных измерений системы ШГМ до последнего времени исследовались спектры сигналов системы. Спектральная плотность сигнала определялась с помощью дискретного преобразования Фурье [3].

Альтернатива преобразованию Фурье, которая позволяет выявить периодические составляющие сигнала, предложена в работе [4]. Метод назван

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0109, проект RFMEFI57714X0109).

методом наложенных эпох (далее МНЭ), и основная его идея состоит в том, что периодичность составляющих сигнала ищется путем сравнения средних значений в предполагаемых полупериодах периодической составляющей сигнала. Необходимость разработки метода связана с тем, что периодичность в реальных природных процессах часто не возможно корректно отобразить суммой синусоид, используя преобразование Фурье.

В ряде работ, например [8-10], МНЭ использовался при поиске скрытых ритмов в рядах экспериментальных данных. Авторы [11] изучали с помощью этого метода периодическую модуляцию геоэлектромагнитных волн и землетрясений. В работах [5, 6] с помощью МНЭ выполнялся поиск космогеофизических ритмов в результатах измерений гравитационной постоянной, выполняемых на установке О.В. Карагиоза и В.П. Измайлова.

В работе [9] показано, что МНЭ позволяет выделять периодичности, которые не обнаруживаются Фурье-анализом. Прежде всего это относится к квазипериодическим вариациям с сильной изменчивостью амплитуды и формы ритмической составляющей, но (почти) постоянным периодом, а также очень слабым стабильным ритмам с несинусоидальной формой периодичности. Другое преимущество МНЭ состоит в его нечувствительности к наличию перерывов и пропусков в наблюдениях, присутствие которых приводит к различным артефактам при анализе на основе преобразования Фурье. При этом МНЭ вообще не требует периодичности в расположении реперов. Их можно «расставлять» в любые моменты времени, ход процесса относительно которых нас интересует. Таким путем можно исследовать связи явлений и событий, происходящих вообще в случайные моменты времени, например, изменение поведения животных перед землетрясениями.

Для достижения наилучших результатов при применении МНЭ может потребоваться применение специальных приемов и методов предварительной обработки данных (подавление высокочастотных шумов, переход к более редкому опросу данных, анализ формы ритмического компонента и пр.). Выделяемые с помощью МНЭ ритмы, как правило, требуется исследовать дополнительно для надежного доказательства значимости ритма и описания свойств периодической составляющей. К недостатку МНЭ следует отнести и довольно высокие вычислительные расходы, даже по сравнению с классическим Фурье-преобразованием. Но последнее обстоятельство в силу бурного развития вычислительной техники имеет все меньшее значение.

Для реализации экспериментальных наблюдений с помощью МНЭ создана программа обработки рядов, содержащих значения исследуемых параметров и моменты времени измерений, в которой МНЭ применяется к последовательности пробных периодов. Это позволяет строить спектрограммы (периодограммы), подобные получаемым при анализе методом Фурье, но не требующие равных интервалов между измерениями и каких-либо интерполяций. Программа построена на основе следующего алгоритма [6, 12, 13]:

- 1) задание первоначального пробного периода  $T = T_0$ ;

- 2) ограничение длительности ряда таким образом, чтобы в него укладывалось целое число  $M$  пробных периодов,  $k = 0$ ;
- 3) вычисление средних значений в каждой из половин периода:  $S_m^+$  и  $S_m^-$  ( $m = \overline{1, M}$ );
- 4) вычисление разницы между средними значениями:

$$d_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (S_m^+ - S_m^-);$$

сдвиг начальной фазы на  $1/16$  периода,  $k = k + 1$ , и если  $k < 4$  — переход к п. 3 (повторение п.п. 3, 4, 5 еще 3 раза);

- 6) выбор максимальной разницей между усреднениями и фиксирование этой разницы:  $D_T = \max_k \{|d_k|\}$ ;
- 7) увеличение периода на заданный шаг  $T = T + \Delta T$ ;
- 8) повторение п. 2, 3, ... 7 до тех пор, пока величина периода не достигнет заданного предельного значения.

Выходом алгоритма является набор значений  $D_T$  — отсчетов периодограммы для периодов  $T_0, T_0 + \Delta T, T_0 + 2\Delta T, \dots$

При совпадении пробного периода с периодом ритмической составляющей сигнала разница между «половинками» при некотором значении фазы становится значительной, что отражается на диаграмме  $(T, D_T)$  в виде пика.

Недостаток такой обработки в том, что она порождает ложные пики, соответствующие нечетным гармоникам. Например, при обработке синусоидального сигнала появляются не только пик, соответствующий основному периоду  $T_0$ , но пики с периодами  $3T_0, 5T_0$  и т.д. При обработке реальных сигналов этот недостаток компенсируется тем, что амплитуды ритмов обычно снижаются по мере укорочения периодов, в связи с чем при анализе реальных сигналов, содержащих взаимное наложение множества ритмов, проявление ложных субгармоник значительно ослабляется.

На рис. 1 показан пример обработки методом наложенных эпох модельного чисто синусоидального сигнала. По вертикальной оси на приводимых далее графиках отложена величина  $D_T$ . На рисунке отчетливо видны пики, соответствующие кратным нечетным гармоникам (третья, пятая).

На рис. 2 показан пример обработки методом наложенных модельного синусоидального сигнала в случае ненулевой начальной фазы колебаний.

При сравнении рис. 1 и 2 видно, что максимальное значение  $D_T$  для  $T_0$  на втором меньше. Этого эффекта можно избежать, если п. 3, 4, 5 алгоритма повторять не 4 раза, а 8, в соответствии с числом деления периода (16), но это в 2 раза увеличивает объем вычислений, а качественно несущественно улучшит периодограмму. При выполнении анализа была использована первоначальная версия алгоритма (без модификации).

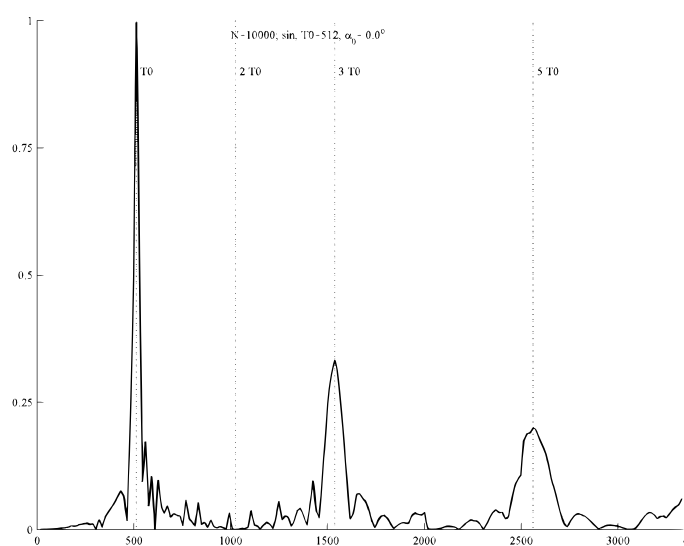


Рис. 1. Применение метода наложенных эпох при совпадении фаз

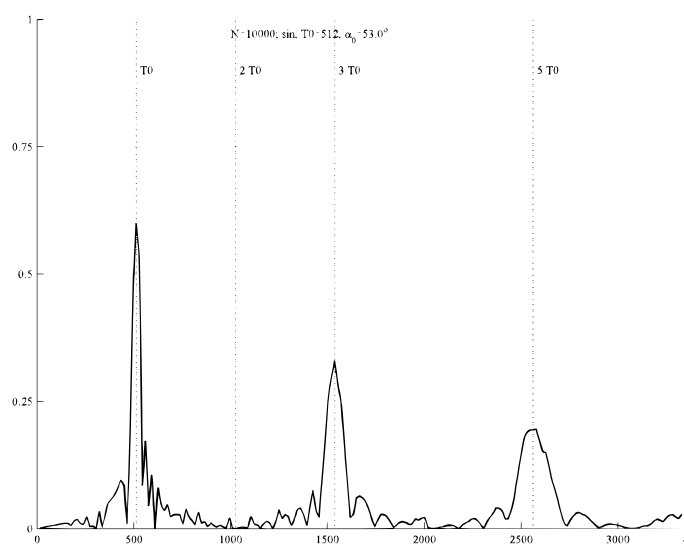


Рис. 2. Применение метода наложенных эпох при несовпадении фаз

На основе алгоритма, изложенного выше, методом наложенных эпох проведен анализ данных приборных систем. Для анализа использовался накопленный архив данных системы ШГМ-3 за период 01.11.2006-14.11.2014.

Общий характер поведения сигналов приборной системы можно увидеть на рис. 3, на котором представлены данные каналов системы ШГМ-3 с сентября 2006 г. по ноябрь 2014 г.

В верхней части рисунка изображены отсчеты 1-го канала, в средней — 2-го канала и в нижней — 3-го канала. Представленные графики показывают

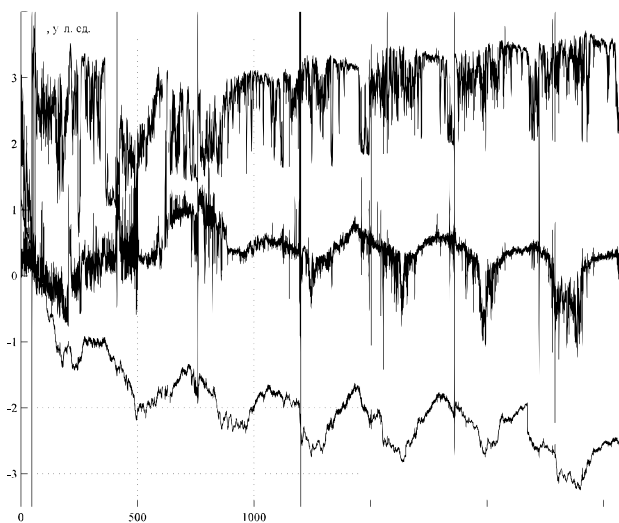


Рис. 3. Сигналы системы ШГМ-3 за 8 лет наблюдений

сложный характер регистрируемых сигналов. В сигналах 2-го и 3-го каналов отчетливо видны низкочастотные периодические составляющие. В сигналах всех каналов присутствуют кажущиеся случайными колебания относительно высокой частоты. Для выявления регулярных периодических составляющих сигналов использован МНЭ.

В результате применения МНЭ для накопленных данных систем ШГМ построен ряд периодограмм, показывающих зависимость расчетной амплитуды ритмов (в условных единицах) от длины периода. Для анализа построены периодограммы с максимальными периодами 500, 100, 60, 30 и 10 суток.

Результаты применения МНЭ для сигналов системы ШГМ-3 представлены на рис. 4–8 для максимальных периодов 10, 30, 60, 100 и 500 суток соответственно. На приводимых далее периодограммах данные для каналов приборной системы приводятся в порядке сверху вниз.

Масштаб графиков выбран из условия максимальной наглядности результатов.

При анализе периодограмм с максимальным периодом 10 суток на всех каналах четко выделяется суточный ритм. Ритм является доминирующим на рассматриваемом множестве периодов для всех каналов.

Анализ периодограмм для более длительных периодов показывает, что положения пиков на отдельных периодограммах не совпадают между собой, в том числе имеют место случаи, когда на одном графике пик, а на другом «провал». При анализе более длительных ритмов использовалась гипотеза, состоящая в том, что длительные ритмы, предположительно связанные с космогеофизическими факторами, должны быть проявлены в сигналах всех (или большей части) приборных систем.

Для удобства сопоставления периодограмма для одной длительности периода совмещены на одном графике и представлены на рис. 4–8 для периодов 10, 30, 60, 100 и 500 суток соответственно.

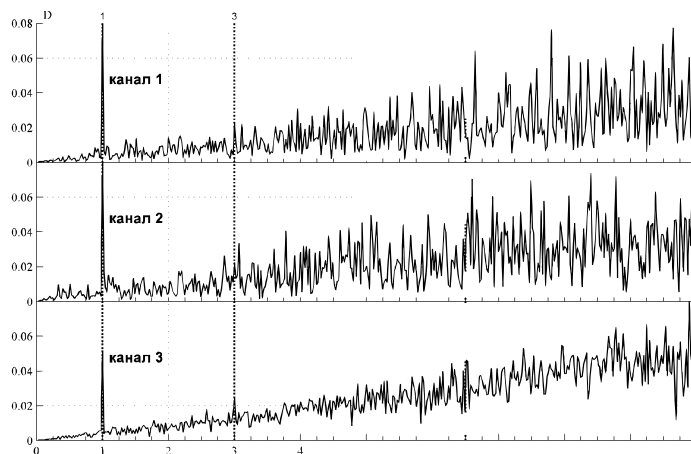


Рис. 4. Периодограмма до 10 суток

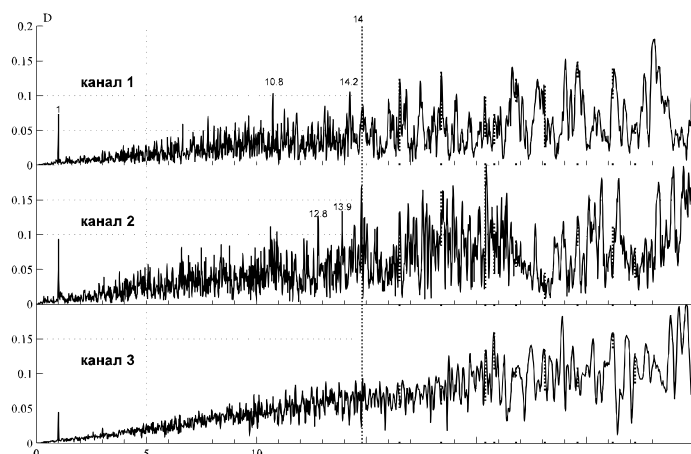


Рис. 5. Периодограмма до 30 суток

При анализе совмещенных периодограмм с максимальным периодом 10 суток на рис. 4 наиболее контрастным пиком является суточный ритм. Интересно отметить, что на каналах 1 и 3 присутствуют третья и на одном из них пятая гармоника суточного ритма. Подобные пики, как было отмечено выше наблюдаются при обработке чисто синусоидальных сигналов, т.е. указанные каналы имеют достаточно длительные участки с суточными ритмами стабильной формы. Другие пики на периодограмме, в частности 6.5, 7.8, 9.5 суток на канале 1, не воспроизводятся на других каналах сравнимо с су-

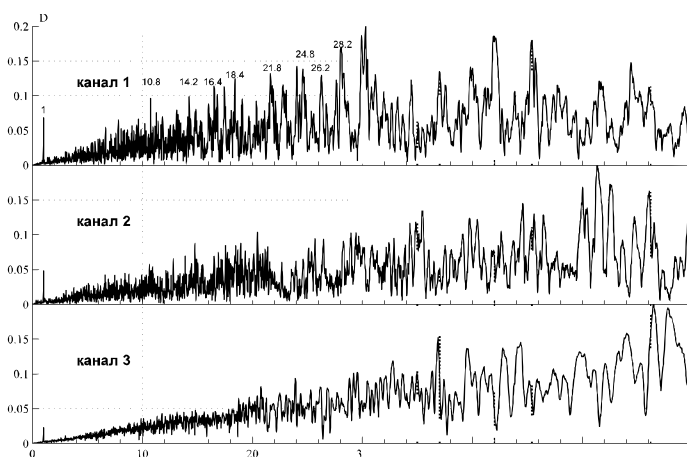


Рис. 6. Периодограмма до 60 суток

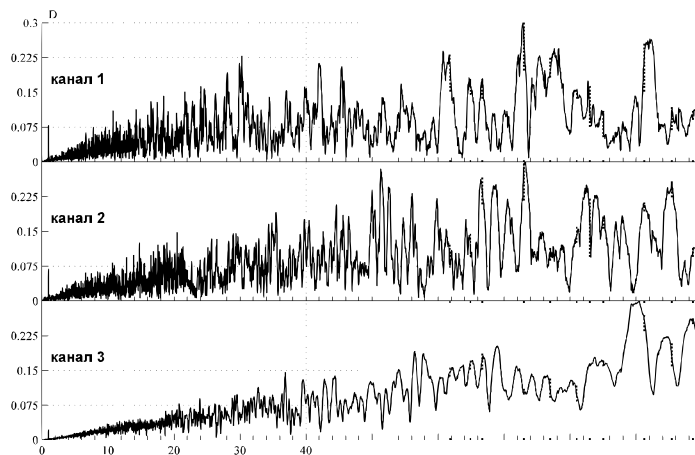


Рис. 7. Периодограмма до 100 суток

точным ритмом. Интересным на периодограмме является также отсутствие недельного ритма, наличие которого можно было бы ожидать как следствие техногенной деятельности.

При анализе совмещенных периодограмм с максимальным периодом 30 суток на рис. 5 можно выделить следующие ритмы: 14.9, 16.4, 18.4, 20.3, 20.8, 21.8, 23.2, 24.8, 26.2, 27.2 суток.

При анализе совмещенных периодограмм с максимальным периодом 60 суток на рис. 6 можно выделить следующие ритмы: около 34, 36, 45, 56 суток.

При анализе совмещенных периодограмм с максимальным периодом 100 суток на рис. 7 можно выделить ритмы с периодами около 62, 64, 67, 73, 77, 81, 83, 85, 91, 96, 98 суток.

При анализе совмещенных периодограмм с максимальным периодом 500 суток на рис. 8 можно выделить годовой ритм с периодом 365 суток. Наличие

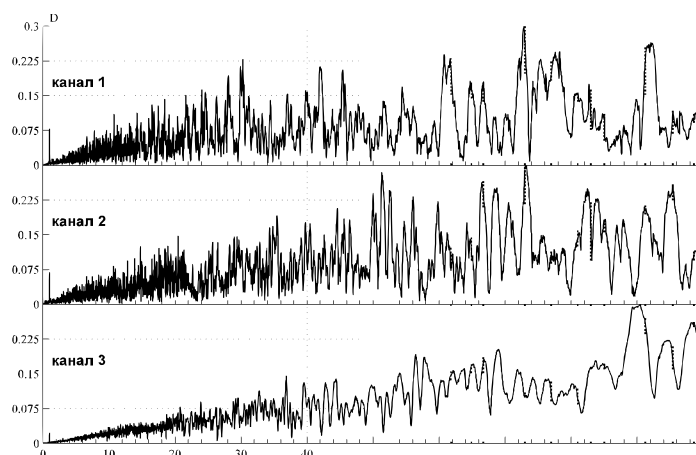


Рис. 8. Периодограмма до 500 суток

такого ритма можно было предположить из визуального анализа сигналов на рис. 3. На ряде каналов этот выглядит как комбинация ритмов 350 и 372 суток с характерным провалом на 365. Также можно обнаружить ритмы с периодами 102, 108, 120, 124, 132, 155, 182, 255, 290 суток.

Таким образом в результате анализа периодограмм были выявлены следующие ритмы: 1.0, 14.9, 16.4, 18.4, 20.3, 20.8, 21.8, 23.2, 24.8, 26.2, 27.2, 34, 36, 45, 56, 62, 64, 67, 73, 77, 81, 83, 85, 91, 96, 98, 102, 108, 120, 124, 132, 155, 182, 255, 290, 365 суток. Некоторые ритмы могут являться гармониками других, так, в частности, третья гармоника ритма 18.4 суток близка к 56 суткам.

Среди указанных ритмов фундаментальными являются суточный и годовой ритмы. Ритмы 120 и 124 суток соответствуют примерно 1/3 года, 182 суток соответствует 1/2 года, ритмы около 90 суток соответствуют одному сезону (зима, весна, лето, осень). Это говорит об определенной повторяемости графиков на полугодовых и крупных внутригодовых интервалах.

Ритм 27.2 близок к сидерическому лунному месяцу, точное значение которого 27.32. Период 85 суток близок к периоду обращения планеты Уран 83.526 [14].

Дальнейшее исследование ритмов, присутствующих в сигналах приборных систем, должно позволить разработать модель генезиса сигналов приборных систем и метод их интерпретации.

### Список литературы

1. Мартынов О.В. Концепция системы прогноза природных катастроф и практические результаты, полученные на основе аппарата нелинейной физики, математики и данных системы // *Нелинейный мир*. 2008. Т. 6. № 10. С. 579-615.
2. Шопин С.А. О работах О.В. Мартынова по прогнозу землетрясений // Система «Планета Земля»: 200 лет Священному союзу. М.: ЛЕНАНД, 2015. С. 102-120.



3. Шопин С.А. Влияние микросейсм и вариаций атмосферного давления на измерительные системы на основе горизонтальных крутильных весов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып. 1. Ч.1. С. 249-263.
4. Пархомов А.Г. Исследование неслучайных вариаций измерений радиоактивности // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К°, 2002. С. 607-612.
5. Измайлов В.П., Карагиоз О.В., Пархомов А.Г. Вариации результатов измерений гравитационной постоянной // Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Том 2. Циклическая динамика в природе и обществе. М.: Научный мир, 1998. С. 163-168.
6. Parkhomov A.G. A Search for Laws in the Results of Gravitational Constant Measurements // Gravitation and Cosmology, 2009. V. 15. №. 2, P. 174-177.
7. Пановский Г.А., Брайер Л. Статистические методы в метеорологии. М.: Гидрометеиздат, 1967. 241 с.
8. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Периодограммы наложенных эпох при поиске скрытых ритмов в экспериментальных рядах // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 2. С. 21-43.
9. Дещеревский А.В., Сидорин А.Я. Сравнение перидограмм наложенных эпох и спектров Фурье экспериментальных рядов // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 3. С. 44-70.
10. Deshcherevskii A.V., Sidorin A.Ya. Periodograms of Superimposed Epochs in Search for Hidden Rhythms in Experimental Data Time Series // Seismic Instruments. 2012. V. 48. №. 1. P. 57-74.
11. Гульельми А.В., Зотов О.Д. Спектры скрытых периодичностей геоэлектромагнитных и сейсмических событий // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 20. С. 72-75.
12. Пархомов А.Г. Космос. Земля, Человек. Новые грани науки. М.: Наука, 2009. 272 с.
13. Пархомов А.Г. Экспериментальные исследования инфранизкочастотных флуктуации в полупроводниках. Закономерности. Космические ритмы. М.: МНТЦ, 1991. 24 с.
14. Berry B.L. Heliogeophysical and Other Natural Processes, Periods of Their Oscillations, and Forecasts // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2011. V. 47. №. 7. P. 848-880.

Шопин Сергей Александрович (sshopin@mail.ru), главный специалист, отдел информационных технологий и геоинформационных систем, ООО «Тульская геологоразведочная партия».

Скобельцын Сергей Алексеевич (skbl@ Rambler.ru), к.ф.м.-н., доцент, кафедры прикладной математики и информатики, Тульский государственный университет.

## Analysis of wideband gradiometer data using superimposed epochs method

S. A. Shopin, S. A. Skobeltsyn

*Abstract.* Results of analysis of time series of special gravimetric instruments data (wideband gradiometers) using method of superimposed epochs are presented. It is shown the presence of several rhythms in the registered signals: diurnal, year long and seasonal rhythms along with several others.

*Keywords:* wideband gradiometer, rhythm, periodogram, superimposed epochs method.

*Shopin Sergey* (sshopin@mail.ru), chief specialist, department of informational technologies and geoinformation systems, Tul'skaya Geologorazvedochnaya Partiya Ltd.

*Skobeltsyn Sergey* (skbl@rambler.ru), candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, department of applied mathematics and computer science, Tula State University.

*Поступила 12.01.2015*