

## ПРИЛИВНАЯ МОДУЛЯЦИЯ СЛАБОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

### *Владимир Юрьевич Тимофеев*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### *Дмитрий Геннадьевич Ардюков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

### *Антон Владимирович Тимофеев*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

### *Сергей Федорович Панин*

Кемеровский филиал Межотраслевого научного центра горной механики и маркшейдерского дела, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Советский, 63а, зав. лабораторией

### *Елена Валерьевна Бойко*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

### *Екатерина Ивановна Грибанова*

Сибирский Филиал ФГБУН «Геофизическая служба» СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, научный сотрудник

Исследование эффекта приливной модуляции слабых сейсмических событий проводится с использованием банков данных землетрясений по Байкальскому и Алтае-Саянскому регионам. Получена модуляция глубиной 10–20 % сейсмического процесса для событий 5–8 класса на частотах приливных волн S1, Mm и Mf. Приводятся результаты анализа техногенной активизации в районе Бачатского разреза (Кузбасс).

**Ключевые слова:** банк сейсмичности Байкальского, Алтае-Саянского регионов, приливная модуляция, техногенные землетрясения, Бачатский разрез.

## TIDAL MODULATION OF WEAK SEISMISITY

### *Vladimir Yu. Timofeev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### *Dmitrii G. Ardyukov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptuyug Prospect 3, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

***Anton V. Timofeev***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Junior Researcher, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

***Sergei F. Panin***

VNIMI, 650000, Russia, Kemerovo, Sovetskii Prospect 63a, Head of the Laboratory

***Elena V. Boyko***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Koptyug Prospect 3, Ph. D., Researcher, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

***Ekaterina I. Gribanova***

SB GS SBRAS, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentieva Prospect 13/3, Reasearcher

Using information about seismicity of Altay-Sayan and Baikal region we study tidal modulation effect. Modulation at 10–20 % level (tidal waves S1, Mm and Mf) have been analyses for seismic events at 5–8 class. We present the analysis results for technical effect at Bochatsky mine (Kyzbass).

**Key words:** banks of seismic activity for Baikal and Altay-Sayan region, Tidal modulation, technical seismic effect, Bochatsky mine.

Связь приливных вариаций деформации Земли и периодичности сейсмического процесса исследуется уже в течение многих десятилетий. Изучение этой связи предпринималось с разными целями. Основной мотивацией, как правило, являлось желание ответить на вопрос: может ли приливная волна быть триггером крупного землетрясения? Имеются результаты, как показывающие корреляцию процессов, так и обратные [1-4]. Наиболее логичным нам кажется подход, когда для исследования процесса используются большие объемы информации о землетрясениях региона (желательно, все имеющиеся). Очевидно, что в этом случае мы практически исследуем процесс на слабых энергиях, так как в банке данных о сейсмических событиях максимальное количество землетрясений – это слабые события. Для анализа данных о землетрясениях применялась специальная программа приливного анализа NiCum. Рассмотрение модуляции общего количества сейсмических событий для Байкальской рифтовой зоны и Алтае-Саянского региона и ее количественная оценка являются целью данной работы. Рассматриваются также особенности процесса в Кузбассе для техногенных событий.

Сигналы от систематических движений, такие как земной прилив, крайне малы (деформации до  $5 \cdot 10^{-8}$ ), и любой эффект сложно обнаружить. В более ранних исследованиях спектральный анализ был излюбленным инструментом для обнаружения таких сигналов. В нашем случае мы знаем периоды разных компонент сигнала с астрономической точностью. К тому же очень длинные серии записей дают нам возможность обнаружить очень слабые сигналы со значительным отношением сигнал-шум. Метод накопления гистограмм [5, 6] был первоначально разработан в Королевской обсерватории в Бельгии. Его целью являлась графическое отображение поведения нелинейностей, записанных с различных датчиков.

Сигнал, который, на первый взгляд, проявляется как зашумленный, имеет временную базу, разделенную на серии временных периодов постоянной длины. Выбранный временной период рассматривается как имеющий влияние на параметры исследуемого вопроса. Этот временной период по определению равен интервалу шириной  $2\pi$ , или 360 градусов. Для каждого периода создается гистограмма размером до 360 секторов размером в 1 градус (максимум разбиение обычно от 72 до 120 шагов), и когда результаты с каждого временного периода синхронизированы и сложены, результирующий по среднему эффект синтезирует картину вариаций в зависимости от выбранной волны (рис. 1).

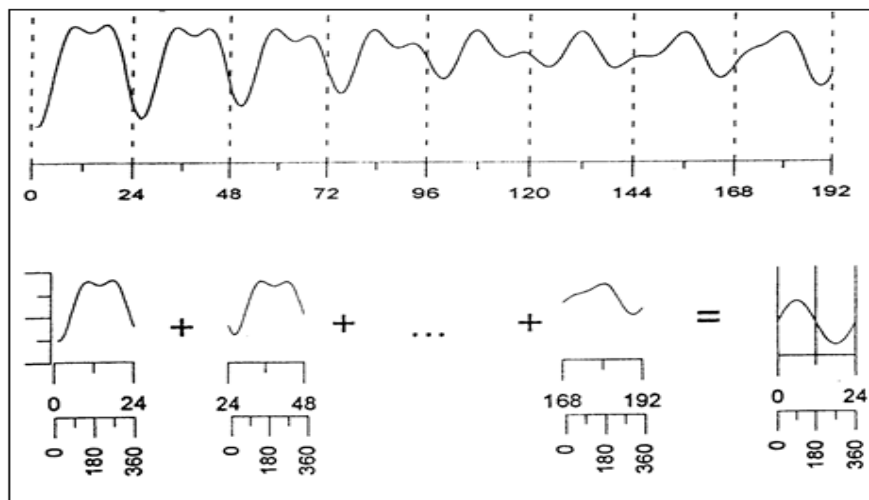


Рис. 1. Принцип метода HiCum, приложенного к восьмидневной записи приливного сигнала (часовая шкала). Серия разрезается на временные интервалы постоянного размера, связанного с периодом выбранной волны по Аргументу Дудсона (например,  $360^\circ$  для 24 часового периода волны S1). Полученные гистограммы просто добавляются к среднему по выбранной компоненте

Метод имеет несколько преимуществ перед спектральным анализом в извлечении информации там, где имеется в наличии комплексное взаимодействие многих параметров окружающей среды. Точность метода была проверена на данных, сгенерированных компьютером. Метод был разработан для анализа данных, подобных приливным эффектам, где временной период точно известен. Используя метод HiCum, определяются параметры основных синусоидальных волн, их гармоники и любые нелинейности из слабого исходного сигнала и при высоком уровне шума. При планировании этих исследований мы исходили из целесообразности гладкой аппроксимации полученных сейсмограмм функцией

$$f(t) = A_0(1 + m \sin(\omega t + \varphi)). \quad (1)$$

Эту функцию можно рассматривать как результат амплитудной модуляции низкочастотного периодического сигнала  $A_0 \cos \Omega t$  высокочастотным сигналом  $1 + m \sin(\omega t + \varphi)$  при  $\Omega \rightarrow 0$ :  $f(t) = \lim_{\Omega \rightarrow 0} A_0(1 + m \sin(\omega t + \varphi)) \cos(\Omega t)$ . Поэтому отклик тако-

го типа будем называть модуляцией сейсмичности, а параметр  $m$  – глубиной модуляции (рис. 2). Эту величину будем давать в процентах. Если  $A_{\max}$  и  $A_{\min}$  – максимальная и минимальная амплитуда сигнала  $f(t)$ , то

$$m = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} \quad (2)$$

Приливный анализ банка данных по сейсмическим событиям для Алтае-Саянского и Байкальского регионов (1970-1993 гг.) позволил выделить параметр модуляции сейсмического процесса (рис. 2 и 3) приливной силой (от 5 до 20 %). Эффект проявляется на слабых энергиях (класса 5 ÷ 8) в областях сейсмической активности и в зонах будущего сильного землетрясения с форшоковой активностью за несколько лет до события.

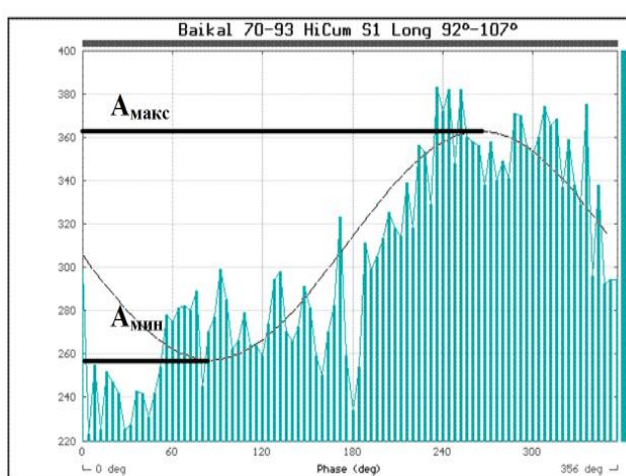


Рис. 2. Гистограмма волны на частоте S1 для блока земной коры с размерами по долготе с 92° по 107° по банку данных Байкальской рифтовой системы. Глубина модуляции процесса – 18 %

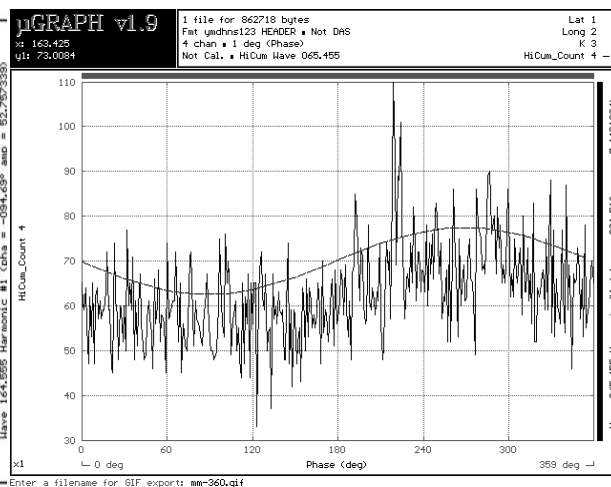


Рис. 3. Гистограмма для периода Mm (лунный месяц) по данным 1970-1991 гг., Алтае-Саянский регион. Параметр разбиения – 360. Глубина модуляции процесса – 11.5 %

Физическая модель явления [7] основана на теории трещинообразования с использованием параметров: напряжение и скорость деформации. Например, анализ данных в зоне Бусингольского землетрясения (27.12.1991, координаты 51.0° N, 98.0° E, магнитуда  $M = 6.5 \div 7.0$ ) показал, что здесь за несколько лет до землетрясения установился высокий уровень модуляции (до 30 %), который после события спадает в течение года.

Использование эффекта для вероятностной оценки грядущего события возможно при наличии регулярно пополняемого регионального банка землетрясений, начиная с 5-6 класса.

Другим важным полем применения описанного выше подхода является использование метода HiCum для анализа техногенных событий и горных ударов на рудниках и шахтах. Исследование процесса афтершоковой активности в районе Бачатского разреза (рис. 4) показало наличие модуляции процесса для

волны Mf (период – 13.661 суток). В этом случае глубина модуляции составила 8.9 % (рис. 5).

В свете вышесказанного отметим, что наиболее перспективным применением метода приливной модуляции должно быть его использование для анализа и предсказания периодов сейсмической активности, горных ударов в шахтах и исследования зон сильных землетрясений.

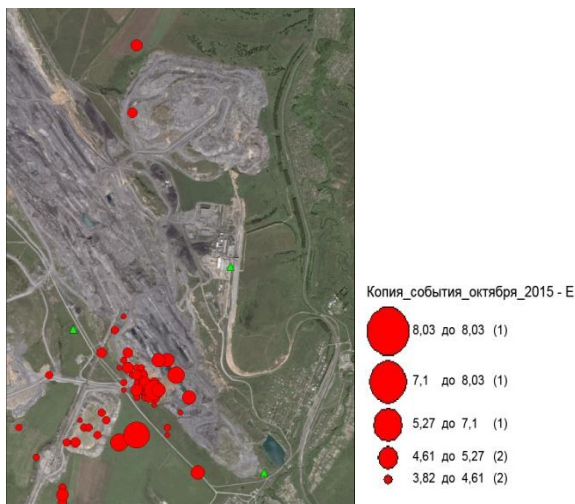


Рис. 4. Схема Бачатского разреза и эпицентров землетрясений октября 2015 г. Протяженный объект в центре – разрез с поперечными размерами 2 км, вокруг – терриконы (координаты объекта – 54.26°N и 86.16°E)

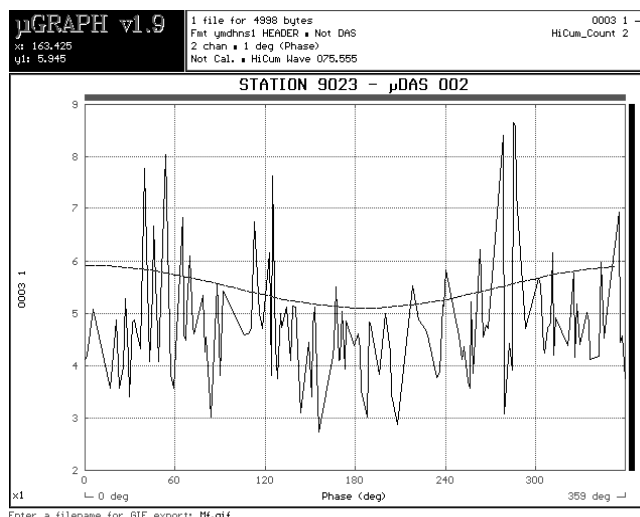


Рис. 5. Приливная волна Mf (период – 13.661 суток), глубина модуляции – 8.9 %, Бачатский разрез (700 событий с июля 2013 по декабрь 2015 г., после землетрясения 2013/07/ 24 14-49-04; 54.263°N, 86.161°E, класс: 8.65)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bartels J. Random Fluctuations, Persistence and Quasi-persistence in Geophysical and Cosmical periodicities // Terr.Magn.Atmos.Electricity. - 1938. - Vol. 40(1). - P. 1-60.
2. Стейси Ф. Физика Земли. - М.: Мир, 1972. - 342 с.
3. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. - М.: Наука, 1983. - 415 с.
4. Emter D., Zurn W., Schick R., Lombardo G. Search for Tidal Effects on Volcanic Activities at Mt. Etna and Stromboli // Proceedings of the Tenth International Symposium on Earth Tides. - 1985. - P. 765-774.
5. Zurn W., Rydelek P.A. Revisiting the phasor-walkout method for detailed investigation of Harmonic Signals in Time Series // Surveys in Geophysics. - 1994. - Vol. 15. – P. 409-431.
6. Ruymbeke M. Van, Beauducel Fr., Somerhausen A. The Enviromental Data Acquisition System (EDAS) developed at the Royal Observatory of Belgium // Journal of the Geodetic Society of Japan. - 2001. - Vol. 47 (1). - P.100-120.
7. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., ван Раумбеке М., Ардюков Д.Г., Лаврентьев М.Е., Седусов Р.Г., Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири // Физическая мезомеханика. - 2008. - Т.11. - № 4. - С. 81-93.

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, С. Ф. Панин, Е. В. Бойко, Е. И. Грибанова, 2016