

УДК 550.348, 681.787.7

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ
ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ
В ШТОЛЬНЯХ И ВЫРАБОТКАХ**

С. В. Панов¹, М. Д. Парушкин^{1,2}, В. М. Семибаламут³, Ю. Н. Фомин^{1,3}

¹*Институт лазерной физики СО РАН, E-mail: lss@laser.nsc.ru,
просп. Академика Лаврентьева, 13/3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

²*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

³*Сибирский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба”,
просп. Академика Лаврентьева, 13/3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Представлено описание метода эмпирической модовой декомпозиции и результаты его применения к анализу данных, полученных с помощью лазерного деформографа. Рассмотрены вопросы адаптации метода к реальным данным. Применение указанного метода позволяет добиться выделения монотонного тренда и медленной составляющей деформационного процесса значительно эффективней по сравнению с традиционными методами. Также метод хорошо зарекомендовал себя с точки зрения очистки обрабатываемых сигналов от шумов и высокочастотных компонент.

Деформация, лазерный деформограф, эмпирическая модовая декомпозиция, обработка сигналов

DOI: 10.15372/FTPRPI20170521

Согласно обширному экспериментальному материалу, земная кора является активной средой, в которой генерируются механические деформационные волны в широком диапазоне периодов колебаний. Сложную пространственно-временную структуру нестационарного деформационного поля создают различные физические процессы, происходящие как на поверхности, так и в недрах планеты, проявляемые в виде сейсмических, собственных, приливных, сезонных и техногенных колебаний Земли. В прикладном плане исследование деформационных колебаний тесным образом связано с проблемами прогноза катастрофических явлений (землетрясения, горные удары, вулканическая активность и т. д.). Особое место в этих процессах занимают литосферные приливы, поскольку они могут служить триггером как для горных ударов, так и землетрясений (в том числе и техногенного происхождения). Приливы дают существенный вклад в направленный перенос масс Земли [1], что влияет на эволюцию напряженно-деформированного состояния земной коры [2]. В отличие от морского прилива энергия твердоприливной деформации не рассеивается в литосфере, а это вызывает накопление напряжений в среде [3]. Понимание важности и необходимости использования в исследованиях деформационных процессов высокоточной аппаратуры способствовало созданию в ИЛФ СО РАН ори-

Пункт “Применение метода EMD при работе с данными деформографа” выполнен за счет средств гранта РНФ (проект № 16-17-10121).

гинального двухкоординатного лазерного деформографа. Он позволяет в широком частотном диапазоне в присутствии атмосферы на базах до 100 м проводить в условиях штольни долговременные непрерывные измерения малых деформационных смещений горных пород с относительной чувствительностью $10^{-9} - 10^{-10}$ [4].

На протяжении последних двух десятков лет на сейсмостанции “Талая” Байкальской рифтовой зоны ведутся непрерывные наблюдения за деформационными процессами в двух ортогональных направлениях. Для этой цели применяется лазерный деформографический комплекс в совокупности с методикой непрерывной регистрации деформационных процессов в условиях штольневых измерений. Основная задача — регистрация и изучение динамических особенностей и явлений в земной коре для отработки методологии обнаружения среднесрочных и краткосрочных предвестников землетрясений [5, 6].

В 2016 г. проведена модернизация отдельных узлов лазерного деформографического комплекса с целью повышения чувствительности и точности деформографических измерений и увеличения ресурса непрерывной работы; оптическая схема и методика измерения остались неизменными [7]. В состав комплекса входит гетеродинный интерферометр, который состоит из четырех независимых оптических каналов — трех измерительных и одного опорного. Они выполнены по схеме несимметричного интерферометра Майкельсона, где в качестве опорного оптического излучения используется излучение гетеродинного лазера, смещенного по частоте на 1 МГц относительно зондирующего, посылаемого на перемещающийся объект (рис. 1). Принцип работы измерительного канала основан на непрерывной регистрации изменения фазы волны во времени, обусловленного эффектом Доплера при отражении излучения от движущегося объекта. Длина обоих измерительных плеч 25 м.

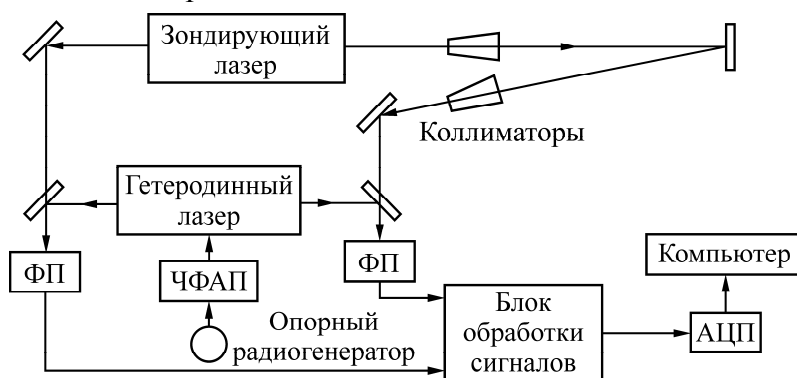


Рис. 1. Схема лазерного измерителя малых перемещений на больших расстояниях: ФП — фотоприемник; ЧФАП — блок частотно-фазовой автоподстройки; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

Отличительная особенность деформографа — отсутствие в схеме интерферометра экранировки зондирующих лучей от влияния атмосферных возмущений, приводящих к вариациям показателя преломления воздуха. Для этого в конструкцию деформографа, помимо двух регистрационных каналов, входит оптический узел, предназначенный для компенсации влияния атмосферы и частотной нестабильности лазеров. В его основе лежит штанга длиной 1.2 м, изготовленная из сплава 36Н (инвар), с коэффициентом температурного расширения $dL/dT = 8 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$. Сигнал, полученный при помощи компенсационного плеча, пропорционален вариациям длины волны лазерного источника и показателя преломления воздуха в штольне и не зависит от деформаций горных пород. Такой подход обеспечивает решение основной проблемы, ограничивающей широкое применение лазерных деформографов в геофизических исследованиях, — использование ресурсоемких при длительной эксплуатации вакуумированных лучеводов длиной в десятки метров.

Запись сигналов осуществляется компьютером с частотой дискретизации 0.5 Гц. Комплекс обеспечивает надежную регистрацию малых перемещений в широком диапазоне периодов колебаний $10^0 - 10^7$ с и позволяет фиксировать собственные и приливные колебания Земли, детерминированные суточные вариации микродеформационного шума, а также особенности деформационных процессов в земной коре, сопровождающих сейсмичность.

При обработке накопленного материала используются наиболее распространенные методы анализа геофизических и деформографических данных. Основная проблема заключается в том, что они главным образом применимы к анализу линейных и стационарных систем. Тем не менее в мировой практике достигнут определенный прогресс в области анализа нелинейных, но стационарных и детерминированных систем или же линейных, но при этом нестационарных (например, распределение Вигнера–Вилла, вейвлет-анализ и др.) Однако большинство реальных физических процессов являются и нелинейными и нестационарными. По этой причине при анализе регистрируемых деформографических данных приходится прибегать к определенным упрощениям, в особенности по отношению к априорно устанавливаемому базису анализируемого сигнала.

Одно из главных условий корректного представления нелинейных и нестационарных данных — необходимость формирования адаптивного базиса, зависящего от содержимого самих данных. Такой подход реализован в методике преобразования Гильберта–Хуанга, которое представляет собой разложение сигнала на эмпирические моды, с последующим применением к полученным компонентам разложения преобразования Гильберта. Впервые метод эмпирической модовой декомпозиции (EMD) предложен Н. Хуангом в 1995 г. и адаптирован для изучения поверхностных волн тайфунов. Спустя три года он был доработан и обобщен для анализа произвольных временных рядов [8, 9].

Основан метод декомпозиции на предположении, что исследуемые данные — суперпозиция различных колебательных процессов (не обязательно гармонических). Каждый процесс, линейный или нелинейный, стационарный или нестационарный, представляет простое колебание, которое в определенной степени “симметрично” относительно локального среднего значения, а следовательно, имеет экстремумы и нулевые пересечения. Такие колебательные процессы могут быть выражены функциями внутренних мод (Intrinsic Mode Function — IMF) со следующим определением:

— число экстремумов и число нулевых пересечений функции не должно отличаться более чем на 1;

— среднее значение между огибающими модовой функции, определенными локальными максимумами и локальными минимумами должно быть нулевым для всех точек.

Выделяемые моды представляют собой колебательный процесс, но в отличие от гармоник, получаемых при представлении дискретного сигнала рядом Фурье, каждая IMF может иметь переменную амплитуду и частоту как функции времени. Таким образом, любой произвольный сигнал можно разделить на семейство взаимно ортогональных функций внутренних мод, которые не заданы аналитически и определяются исключительно самой анализируемой последовательностью.

АЛГОРИТМ EMD

Алгоритм EMD состоит из последовательных операций по выделению модовых функций из сигнала, начиная с высокочастотных. На этапе выделения каждой новой IMF выполняются следующие действия.

1. Выделение всех локальных экстремумов сигнала $y(k)$ и формирование амплитудно-координатных векторов для максимумов и минимумов.

2. При помощи выделенных локальных максимумов и минимумов естественным кубическим сплайном вычисляются верхняя и нижняя огибающие сигнала. Определяется функция средних значений $m_1(k)$ между огибающими максимумов и минимумов.

3. Находится функция IMF в первом приближении по формуле $h_1(k) = y(k) - m_1(k)$.

4. Повторив операции 1–3 и заменив исходный сигнал $y(k)$ на $h_1(k)$, получается второе приближение для функция IMF: $h_2(k) = h_1(k) - m_2(k)$.

5. Аналогичным образом находятся третье и последующие приближения к модовой функции IMF. При этом при увеличении количества итераций функции $h_n(k)$ и $m_n(k)$ стремятся к своим неизменяемым формам. В качестве критерия для останковки выбирают либо предел по нормализованной квадратичной разности между двумя последовательными итерациями, либо задают максимальное число итераций (обычно выполняют 7–10 итераций, что соответствует порогу $10^{-4} - 10^{-5}$).

6. Значение $h_i(k)$, полученное в ходе последней итерации, принимается за первую, самую высокочастотную модовую функцию (IMF₁) — $c_1(k) = h_i(k)$, содержащуюся в исходном сигнале $y(k)$.

После вычитания полученной моды из сигнала, в нем остаются низкочастотные компоненты: $r_1(k) = y(k) - c_1(k)$.

При обработке полученной функции по аналогичной методике находится вторая модовая функция (IMF₂) — $c_2(k)$, и процесс продолжается дальше: $r_2(k) = r_1(k) - c_2(k)$.

В результате имеем декомпозицию сигнала в n -мерном модовом эмпирическом приближении с результирующим остатком $r_n(k)$: $y(k) = \sum_{i=1}^n c_i(k) + r_n(k)$.

Процесс декомпозиции можно продолжать вплоть до максимального “выпрямления” остатка, при котором остается только тренд сигнала с суммарным числом экстремумов, не превышающим 3, из которого невозможно извлечь очередную IMF.

В итоге исходный сигнал раскладывается по адаптивному базису из анализируемых данных. Хотя он и не определен аналитически, тем не менее удовлетворяет всем требованиям базиса, т. е. является законченным, сходящимся, ортогональным и единственным. Утверждение Хуанга о единственности разложения можно считать спорным, поскольку эмпирический процесс разложения сигнала в силу своей адаптивности в общем случае неуправляем. Даже монотонная локальная составляющая сигнала при влиянии дестабилизирующих факторов (шумов, импульсных помех и т. п.) может при декомпозиции разделиться на две или три функции IMF. Конечно, при суммировании этих функций такая локальная составляющая может быть выделена, но это потребует от пользователя определенных априорных знаний о составе сигналов.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА EMD ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕФОРМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Внедрение методики EMD в процесс обработки деформографических данных показал широкий потенциал его применения, включающий выделение медленных деформационных изменений (монотонный тренд), выявление нестационарных возмущений в сигнале, регуляризацию данных, а также очистку сигнала от высокочастотного шума вне зависимости от его характера.

Основная трудность при реализации метода EMD применительно к реальным деформографическим данным заключается в наличии пропусков в регистрируемом сигнале с длительностью от нескольких минут до нескольких суток. В чистой форме метод весьма чувствителен даже к незначительным пропускам данных, что связано с особенностью получения огибающих посредством поиска локальных экстремумов и построения кубических сплайнов. При нахождении первых (высокочастотных) модовых функций локальные экстремумы в области пропусков удалены друг от друга на значительное расстояние по сравнению с соседними экстремумами, поэтому при интерполяции сплайном огибающих могут получаться значительные ложные всплески в модовой функции, которые переносятся в остаток, используемый для дальнейшей декомпозиции. На последующих шагах эффект только накапливается, что полностью нивелирует получаемый результат. Для выхода из сложившейся ситуации решено добавлять в сигнал аддитивный гауссовский шум с уровнем, не превышающим 0.01–0.05 стандартного разброса исходного сигнала.

Добавление шума в исходный сигнал, помимо решения проблемы с пропусками в исходном сигнале, позволяет также справиться с другой часто встречаемой проблемой — разбиение одной или несколько близко лежащих гармоник на различные соседние модовые функции. Такое поведение метода часто встречается при работе с реальными данными и не может контролироваться ввиду адаптивности базиса разложения. Для решения этой проблемы обычно либо работают не с отдельными модами, а с парами соседних, либо применяют метод EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) [10], суть которого заключается в многократной вариации исходного сигнала путем добавления гауссовского шума, нахождении в каждом случае своих модовых функций, и их результирующем усреднении по ансамблю. В зависимости от числа реализаций варьируется уровень используемого шума; при увеличении ансамбля реализаций можно смело увеличивать и уровень шума, поскольку при усреднении итоговая шумовая составляющая обратно пропорциональна корню размера ансамбля. Таким образом, при усреднении ансамбля из 100 реализаций можно добавлять в сигнал гауссовский шум с уровнем порядка 25 % от стандартного разброса исходного сигнала. Варьируя уровень добавляемого шума и размер ансамбля, удается добиться решения проблемы перемешивания модовых функций. Платой за это служит значительное увеличение машинного времени, необходимого для обработки сигналов.

Результат выделения медленной составляющей деформационного процесса при помощи метода EMD, модифицированного для работы с реальными деформографическими данными, представлен на рис. 2а. Верхней кривой соответствует нефилтрованный деформационный сигнал длительностью 85 сут, зарегистрированный в одном из измерительных плеч деформографа, расположенного в штольне сейсмостанции “Талая”. Нижняя кривая, помеченная цифрой 3, является результатом работы низкочастотного фурье-фильтра с частотой среза ~ 0.6 1/сут. По ней можно судить о том, что такой подход обеспечивает достаточно хорошее выделение медленной составляющей деформационного процесса, но только в центральной области рис. 2. По краям присутствуют так называемые “краевые” эффекты длительностью порядка 10–12 сут, искажающие выделяемый сигнал. Применение метода эмпирической модовой декомпозиции позволяет снять тренд и медленную составляющую на всей длине сигнала. Для получения этой кривой проведено суммирование трех последних модовых функций и результирующего остатка декомпозиции. Эти четыре функции показаны в нижней части рис. 2б.

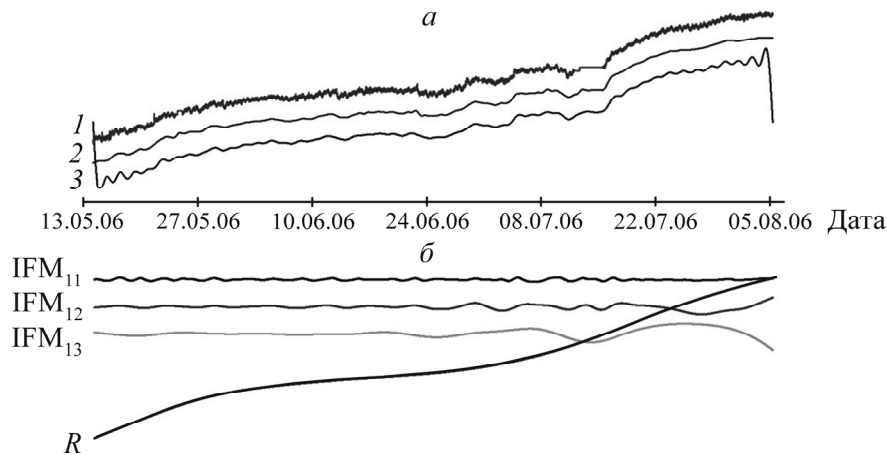


Рис. 2. Сравнение результатов выделения медленной составляющей деформационного процесса методом эмпирической модовой декомпозиции и цифровой фильтрацией (а): 1 — исходный деформационный сигнал; 2 — EMD; 3 — Фурье фильтрация. Монотонный дрейф и низкочастотные моды, выделенные в деформационном сигнале с помощью методики EMD (б)

Проанализировав моды IMF_{11} – IMF_{13} и результирующий остаток R , можно сделать вывод, что помимо монотонного сезонного дрейфа (деформационного сжатия плеча) наблюдается постепенная раскочка низкочастотных компонентов сигнала. Причина такого поведения требует дополнительного анализа, что не входит в рамки данной статьи, но обращает внимание на факт возможности выявления подобного поведения деформации.

Результат очистки исходного сигнала от монотонной части деформации демонстрирует рис. 3. Помимо “выпрямленного” результирующего графика, на котором отчетливо проявились приливные колебания, на рисунке представлен исходный сигнал с наложенной на него монотонной частью. Отмечается отсутствие “краевого” эффекта при выделении монотонной части сигнала методом EMD.

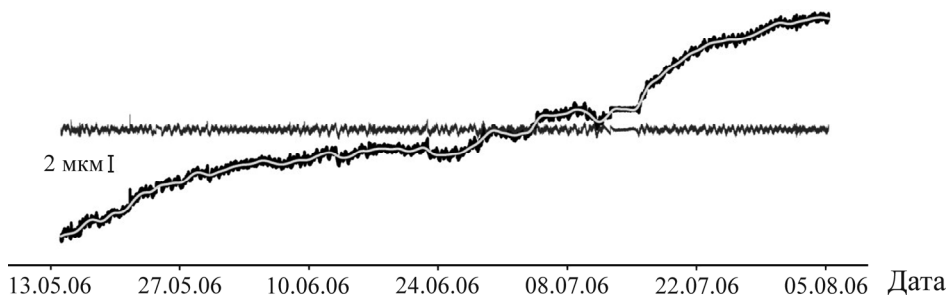


Рис. 3. Результат снятия дрейфа и медленной составляющей деформационного процесса посредством метода эмпирической модовой декомпозиции

Для большей убедительности в эффективности метода EMD и отсутствии у него “краевых” особенностей на рис. 4 приведен деформационный сигнал и выделенная медленно меняющаяся часть, а также схожим образом посчитанная медленно меняющаяся часть сигнала от расширенных данных на 7 дней в каждую сторону — наблюдается полное совпадение выделяемых сигналов.

Основной потенциал EMD при работе с деформографическими данными заключается в возможностях применения метода для изучения нестационарных процессов в диапазоне сверхдлиннопериодных колебаний Земли. Внутри этого диапазона в ходе непрерывной регист-

рации деформационных процессов в земной коре с целью поисков предвестников землетрясений обращено внимание на закономерно повторяющийся эффект. Суть его состоит в том, что на графиках деформаций, соответствующих каждому из регистрирующих интерферометрических плеч, отчетливо проявляется необычное возмущение на фоне приливных колебаний за 1.5–2 сут перед землетрясениями. Более подробно эффект описан в [11–13]. Литосферные возмущения регистрируются в виде цугов деформационного шума в полосе периодов колебаний 0.5–2 ч, однако в связи с непродолжительностью возмущений детально изучать их структуру классическими методами анализа весьма затруднительно.



Рис. 4. Отсутствие краевых эффектов в методе EMD

Пример применения метода EMD к участку деформограммы длиной 5 сут, содержащему описанный эффект, представлен на рис. 5. На верхней части показана нефильтрованная деформограмма, где на фоне полусуточного прилива отмечаются деформационные возмущения, сопоставимые по амплитуде с самими приливами. Вторая кривая в верхней части рис. 5 является суперпозицией четырех мод, в которых в процессе декомпозиции наиболее явно выделялись соответствующие возмущения (эти моды по отдельности показаны в нижней части). По полученным кривым можно судить о времени вступления “раскачки” и ее продолжительности (участки, отмеченные серыми прямоугольниками).

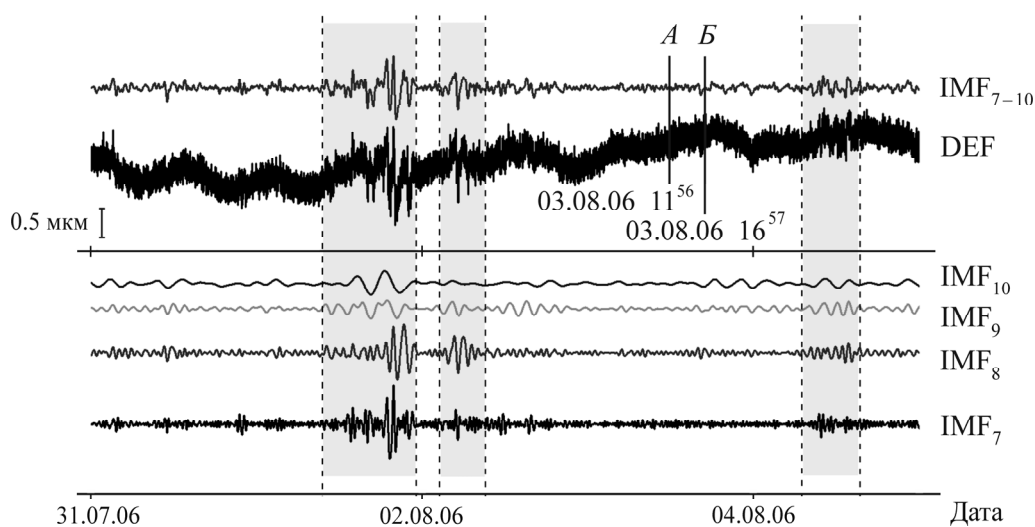


Рис. 5. Возбуждение сверхдлиннопериодных колебаний накануне региональных землетрясений: А — землетрясение 03.08.2006 г. 11⁵⁶ ($\varphi = 55.4$, $\lambda = 110.41$, $K = 12$); Б — землетрясение 03.08.2006 г. 16⁵⁷ ($\varphi = 55.41$, $\lambda = 110.4$, $K = 12.2$)

Так же можно судить об амплитудно-частотной динамике явления и выделить наиболее представительный диапазон. Видно несинхронное проявление эффекта в различных модах, однако наибольшую амплитуду сигнал имеет в моде 8, что соответствует диапазону периодов 1–2 ч. Внутри моды можно выделить отдельные гармоники с периодами порядка 62, 73 и 85 мин, характерные для описываемого возбуждения. Присутствие эффекта обнаруживается и в более высокочастотных модах (например, 5 и 6), но там оно менее выражено и значительно уступает по амплитуде сигнала. Применение метода EMD к исследуемому участку позволяет не только выделить исследуемый сигнал для дальнейшей обработки, но и детально проанализировать его поведение в отдельных частотных диапазонах (модах), что в дальнейшем может дать дополнительную информацию, необходимую для интерпретации явления и определения его прогностического потенциала.

Перспективным направлением для применения рассматриваемого метода можно считать обработку с целью выделения медленной деформационной волны маятникового типа, сопровождающей сильные близкие землетрясения в качестве последствия. Ранее при проведении работ по обнаружению подобных волн был разработан ряд критериев, на основании которых происходил отсев зарегистрированных деформографом возмущений [14]. Применение новой методики обработки позволит более точно идентифицировать пришедшие на станцию кратковременные возмущения и тем самым расширить возможности поиска, отделяя маятниковые волны от землетрясений с меньшим энергетическим классом.

Обратимся к примеру применения EMD для очистки сигнала от высокочастотной компоненты, включая шумы различной природы (рис. 6). Для этого из исходного сигнала вычтем первые три моды ($IMF_1 - IMF_3$). Метод хорошо выполняет поставленную задачу и не уступает в производительности своим более распространенным конкурентам, при этом у него отсутствуют особенности на краях и он более эффективно справляется с единичными выбросами. Благодаря применению метода EMD, подтверждено предположение [15] о не шумовой природе суточной вариации амплитуды высокочастотной компоненты в деформационном сигнале, поскольку эффект полностью отсутствует в первой выделяемой моде.

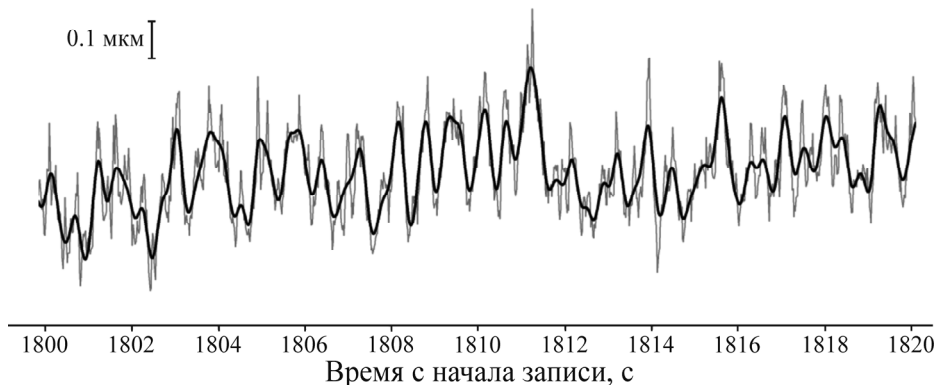


Рис. 6. Применение EMD для фильтрации шумовой составляющей сигнала

ВЫВОДЫ

Несмотря на относительную новизну метода эмпирической модовой декомпозиции, он уже имеет различные модификации и широко используется в различных областях исследований, где требуется работа с нелинейными и нестационарными данными. Адаптация этого метода к реальным деформографическим данным позволяет раскрыть его высокий потенциал для работы с геофизической информацией и деформограммами, эффективно выявлять локальные особенности сигналов, их внутреннюю структуру, очищать их от шумов, проводить регуляризацию и выделять медленную часть сигнала, включая монотонный тренд.

Метод как нельзя лучше подходит для изучения эффекта возбуждения сверхдлиннопериодных колебаний в преддверии землетрясений, поскольку эффект носит кратковременный характер и не линеен как по амплитуде, так и по частоте. Применение его в дальнейшем может дать дополнительную информацию, необходимую как для интерпретации явления, так и определения его прогностического потенциала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревуженко А. Ф. Приливные волны и направленный перенос масс Земли. — Новосибирск: Наука, 2013. — 204 с.
2. Адушкин В. В., Спивак А. А. Физические поля в приповерхностной геофизике. — М.: ГЕОС, 2014. — 360 с.
3. Адушкин В. В., Спивак А. А. Приливная сила как триггер геофизических процессов в окружающей среде // Триггерные эффекты в геосистемах: сб. тр. — М.: ГЕОС, 2010. — С. 8–17.
4. Панов С. В., Парушкин М. Д., Семибаламут В. М., Фомин Ю. Н. Гетеродинный лазерный деформограф для геофизических исследований // Актуальные проблемы современной сейсмологии. — Ташкент, 2016. — С. 293–299.
5. Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Семибаламут В. М., Фомин Ю. Н. Возможности высокочувствительных лазерных измерений в изучении сейсмогеодинамических явлений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. трудов конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2013. — С. 25–31.
6. Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н. Особенности деформаций земной коры накануне близкого сильного землетрясения по данным высокочувствительных лазерных измерений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. трудов конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН. — 2010. — С. 30–37.
7. Багаев С. Н., Орлов В. А., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н. Гл. 9.2: Землетрясения в районе Байкальской рифтовой зоны и сопряженные с ними деформационно-волновые процессы в земной коре // Методы и системы сейсмодиформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. — Новосибирск, 2010. — С. 131–151.
8. Huang N. E., Shen S. S. P. The Hilbert-Huang transform and its applications, World Scientific Publishing Co, Pte, Ltd. 5 Toh Tuck. Link, Singapore, — 386 p.
9. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 1998, Vol. 454. — P. 903–995.
10. Wu Z., Huang N. E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method, Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, Vol. 1, No. 1. — P. 1–41.
11. Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н. О связи сейсмичности Земли с солнечной активностью по результатам прецизионных деформографических наблюдений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сб. трудов конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН. — 2008. — С. 31–40.
12. Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н. Солнечная активность, колебания внутреннего ядра земли, общепланетарная сейсмичность // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: сб. материалов IV Междунар. симп. — М., 2009. — С. 321–326.
13. Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д., Фомин Ю. Н., Токмолдин С. Ж., Невмержитский И. С., Узбеков Н. Б., Терешкин Д. О. Пространственно разнесенные высокочувствительные лазерные деформографические наблюдения в изучении сверхдлиннопериодных колебаний земли // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011. — С. 145–150.
14. Багаев С. Н., Опарин В. Н., Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д. О волнах маятникового типа и методе их выделения от крупных землетрясений по записям лазерного деформографа // ФТПРПИ. — 2010. — № 3. — С. 3–11.
15. Орлов В. А., Парушкин М. Д. Явление суточной повторяемости возбуждения шума в сигналах лазерного деформографа // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2012. — Т. 2. — № 3. — С. 124–130.

Поступила в редакцию 21/VIII 2017