

## Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs

### Спектральный направленный атрибутный анализ: стратиграфический анализ каротажных данных

S. Djin Nio<sup>1</sup>, Jan Brouwer<sup>3</sup>, David Smith<sup>2</sup>, Mat de Jong<sup>1</sup>, и Alain Buchm<sup>1</sup> представляют свой новый метод стратиграфической интерпретации данных каротажа.

**В** статье описывается новый аналитический метод – Спектральный трендовый атрибутный анализ и его применение в интерпретации данных каротажа.

Традиционный каротаж содержит набор значений различных свойств, которые обычно записаны через одинаковые интервалы по глубине. Таким образом, он может быть использован в виде (глубинной) временной последовательности для целей математического анализа. Используя всю запись или выбранные интервалы фациально-чувствительного каротажа, такого как ГК, мы рассчитываем предсказывающий фильтр ошибок. Этот фильтр предназначен для поиска новых значений отсчетов на основании предыдущих. Фильтр используется для расчета новых массивов данных, каждая точка которых является численным выражением ошибки между предсказанным и реальным значением на заданной глубине. Кривая анализа результирующей предсказанной ошибки (PEFA) может быть геологически проинтерпретирована как индикатор непрерывности или, иначе, стратиграфической последовательности; большие ошибки приводят к более значимым разрывам в последовательности. После численного интегрирования из кривой PEFA получается еще более информативная кривая INPEFA (Integrated PEFA), которая показывает направления фациальных изменений и другие особенности, которые не замечают традиционные методы каротажа. Кривая INPEFA является прямым методом для объективного выделения стратиграфических последовательностей на основании ключевых поверхностей. Это представляет собой некий аналог стратиграфического анализа сейсмических профилей. Далее пойдет речь о базовых принципах спектрального трендового атрибутного анализа и универсальности его применения при проведении стратиграфического анализа на основе скважинной информации.

#### Введение

Данные каротажа представляют огромное хранилище количественной информации о поверхностной геологии. Несмотря на то, что их использование в петрофизике и привязке сейсмических данных больше основано на количественном анализе, в геологии традиционно проводится их качественный анализ (Rider, 1996). Масштабы подходов, использующих качественное описание при геологической интерпретации скважинных данных, огромны; здесь мы расскажем о таких подходах, в основе которых лежит стратиграфическая интерпретация данных каротажа. Подавляющее большинство каротажей содержат (после дополнительной передискретизации)

записанные через равные интервалы некоторые физические величины, к примеру, сопротивление. Несмотря на то, что на ранних этапах каротаж записывался в аналоговой форме, что означало непрерывность трассы, запись современного каротажа ведется в цифровом формате, когда результат относится к дискретным интервалам. Каротаж, представляет собой набор значений, записанных через равные интервалы, что дает возможность применять к нему все известные методы анализа временных рядов, включая спектральный (частотный), что и будет являться темой данной статьи.

Исходя из фундаментального принципа суперпозиции, как правило (но не всегда) чем глубже бурится скважина, тем более древние слои вскрываются. Однако геологический возраст не увеличивается повсеместно с глубиной, на что есть две причины: (1) глубины отложений сильно различаются; и (2) отложение не является непрерывным процессом в любой точке (Sadler, 1999). Ряд значений, записанных через равные интервалы вниз по скважине, являются регулярными лишь по глубине. (Они могут быть регулярны в терминах времени дискретизации, если каротаж проводится при неизменной скорости погружения зонда, но это не представляет интерес для геологического изучения). Однако, оно регулярно в терминах геологического времени. В действительности геологи уже привыкли работать внутри этих ограничений на исходные данные, которые накладываются как на обнажения, так и на глубинные объекты. Более важным является вопрос о возможности применения классических методов анализа временных рядов для проведения геологической интерпретации данных каротажа. Мы изучили этот вопрос и приглашаем читателя быть судьей нашему методу и полученных с его помощью результатов.

Идея использования спектральных методов была взята нами из области определения ритмов Миланковича в стратиграфических данных. Изменения климата, вызванные изменением орбиты можно изучать, используя информацию, содержащуюся в осадочных слоях. Это можно делать благодаря влиянию интенсивности солнечного излучения на механизмы эрозии, выветривания и осадконакопления. Составление этих прогнозов на несколько десятилетий (Schwarzacher, 1993; Weedon, 2003) откровенно

<sup>1</sup>ENRES International, Ruysdaellaan 3, 3712 AP Huis ter Heide, The Netherlands; <sup>2</sup> ENRES International, 15 Stratton Terrace, Truro, Cornwall, TR1 3EW, UK; <sup>3</sup> NITG-TNO, P.O. Box 80015, 3508 TA Utrecht, The Netherlands

возможность определения индивидуальных климатических циклов и их применения при высокоразрешенной корреляции. Так как предсказанные периоды Миланковича лежат в диапазоне от десятков до сотен тысяч лет, теоретически вполне возможны значительные улучшения в разрешающей способности по сравнению с традиционными методами биостратиграфии и сейсмической стратиграфии. Возможность определения циклов Миланковича с помощью скважинных данных делает необходимым разработку специализированного программного обеспечения для спектрального анализа каротажных данных. Очевидной является проблема применения спектральных методов, таких как Фурье анализ, к геологическим временным рядам, которые обладают сильной (но не изученной) дискретностью и другими изменениями в свойствах данных, о которых было рассказано выше. Спектральные свойства каротажа, по-видимому, будут изменяться, возможно, весьма значительно, что определяется для каждой скважины индивидуально. Даже внутри единого геологического тела такого, как формация, возможно ожидать дискретность. Таким образом спектральный анализ во всей скважине или даже в единой формации может сильно различаться и даже становиться бессмысленным. Использование небольших окон для анализа не является приемлемой альтернативой, так как результаты такого подхода слабо зависят от спектра при использовании традиционных методов (Фурье). Спектральная оценка, основанная, к примеру, на максимальной энтропии (Childers, 1978) или вейвлет преобразовании, является более приемлемым подходом для анализа скважинных данных.

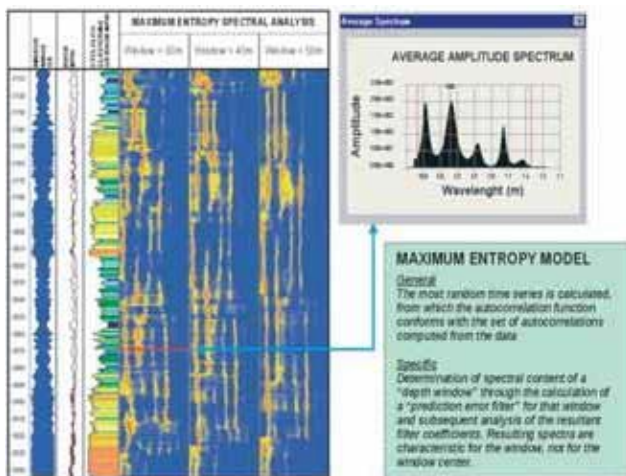


Рисунок 1. Пример спектрального анализа максимальная Энтропии (MESA) данных ГК с тремя окнами различного размера. Интервал Ротлигенд, шельф Нидерландов (благодарность за материал NITG-TNO)..

## Линейное предсказание временных (глубинных) рядов

Предположим, что запись описывается циклическими изменениями, вызванными изменениями климата. Можем ли мы использовать свойства этих циклов для изучения изменения непрерывности данных в зависимости от их дискретности? Математически это требует количественного анализа

спектральных изменений. Линейное предсказание последовательности данных включает в себя построение «наилучшее приближение» значения для неизвестной точки записи с помощью линейной комбинации известных, но зашумленных значений. Предсказание могло быть проведено как во времени (предполагая тот же тип причинности или повторяемости событий), так и в пространстве. В действительности предсказание данных каротажа имеет место в глубинной области и поэтому должно рассматриваться как пространственное предсказание. В теории связь между глубиной и геологическим временем определяется скоростью осадконакопления, однако очень сильно зависит от масштаба (Sadler 1999) и не может быть найдена с требуемой степенью

доступно. Хотя это могло бы быть представлено через сравнение спектральных характеристик последовательных окон анализа (т.е. события первого и второго порядка рассчитываются из соответствующего спектра), мы разработали другой метод. В связи с тем, что спектр, определяемый с помощью MESA, основан на расчете предсказывающего фильтра ошибок (Childers, 1978), количественный анализ спектральных изменений может быть выполнен с помощью применения тоже предсказывающего фильтра ошибок на данных каротажа. Процесс предсказания может быть описан математическим выражением (1).

$$y_n^* = \sum_{j=1}^M d_j y_{n-j}$$

Где  $y_n^*$  - записанное значение, предсказанное линейной комбинацией известных значений  $y_n$ , взятых с весами  $d_j$ . Оптимальное предсказание включает в себя выбор индивидуальных весов (коэффициентов предсказания) таким образом, чтобы невязка между известными значениями  $y_n$  и предсказанными  $y_n^*$  оказалась минимальной (минимально возможная) для набора значений, который должен быть предсказан.

В нашем случае, прогнозируемая часть массива данных не представляет особого интереса, но вместе с тем непрогнозируемая часть обладает большой информативностью. При проведении стратиграфической интерпретации скважинного каротажа непрогнозируемую часть массива данных можно соотносить с литологическими перерывами.

## Спектральная оценка на основе коэффициентов предсказания

Эти коэффициенты, найденные для оптимального предсказания набора данных, очень тесно связаны со спектральным составом исходных данных. В действительности, коэффициенты предсказания могут быть легко преобразованы в спектральное представление данных, обладающих максимальной энтропией спектра. Изменения в коэффициентах предсказания, следовательно, приводят к изменению в спектральном составе и интервале глубин. Это проявляется в возникновении сильной неопределенности, которая вероятнее всего будет аномальной в спектральных характеристиках. Анализ ошибки предсказания может, следовательно, дать сигнал об изменении спектра без необходимости проводить полный спектральный анализ. Это делает эту

процедуру очень быстрой в практическом применении, позволяя добиваться высокой степени интерактивности при анализе данных. Теперь мы обратимся к геологической интерпретации результатов анализа ошибок предсказывающего фильтра (РЕФА). Пример воздействия РЕФА на обычный ГК приведен на рисунке 2. Скользящее окно заданной ширины (обычно порядка 10м) сравнивает реальные значения с полученными в результате предыдущей фильтрации и подсчитывает ошибку (положительную или отрицательную) для каждой глубины. Результатом является нерегулярная пилообразная кривая, испытывающая флуктуации вокруг центральной вертикальной линии. При возможности рассчитывается модельный предсказывающий фильтр (к примеру, если каротаж представлен идеально правильной кривой, такой как синусоида). В этом случае РЕФА должен быть строго вертикальной линией. Хотя мы не решаемся устанавливать размер доверительных интервалов для амплитуды ошибок, целесообразно проводить интерпретацию интервалов, обладающих достаточно небольшими ошибками, таким как «шум», допускающий, что существует небольшая дискретность в спектральных свойствах данных от одного окна к другому. В том случае, когда предсказывающий фильтр

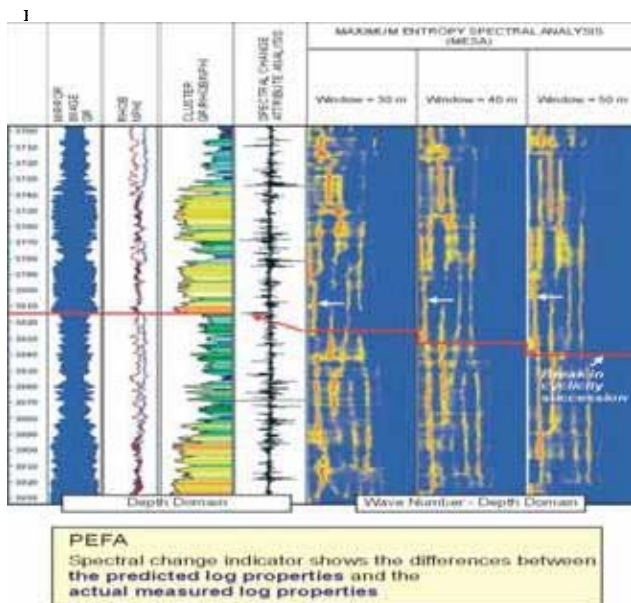


Рисунок 2 Анализ спектральных изменений атрибутов (РЕФА) ГК, показывающий дискретность в спектральной полосе, выраженной отрицательными пиками (слева) и положительными пиками (справа). Эти пики представлены разрывами в последовательности циклов и могут быть интерпретированы как основные или второстепенный стратиграфические перерывы. мы можем сделать предположение о более или менее значимой дискретности в спектральных свойствах данных. Это в свою очередь может означать дискретность в геологическом смысле. К примеру, на Рисунке 2 на 3980 м присутствует основной отрицательный выброс, что означает, что значение ГК на этой глубине было существенно переоценено предсказывающим фильтром.

Это предполагает резкий переход на более высокий уровень от глин к пескам, величина непрерывности говорит о том, что данная глубина, возможно, является границей между фациями. На отметке 3965 м находится основной положительный выброс, что означает, что значение ГК на этой глубине было переоценено предсказывающим фильтром. Этот факт свидетельствует о том, что данная глубина может являться поверхностью

затопления, представленной относительно резким переходом к более высокому значению характерному для глинистости. Вышеизложенная интерпретация выбросов РЕФА достаточно субъективна, что является обычным при проведении сравнения геологических последовательностей, выраженных резкими переходами между песками и глинами. Мы пытаемся провести разделение между ними на локальную и более региональную значимость, как следует ниже. Если данные каротажа сглаживаются перед тем, как применяется РЕФА, то некоторые менее важные предсказанные ошибки, вероятно, исчезнут.

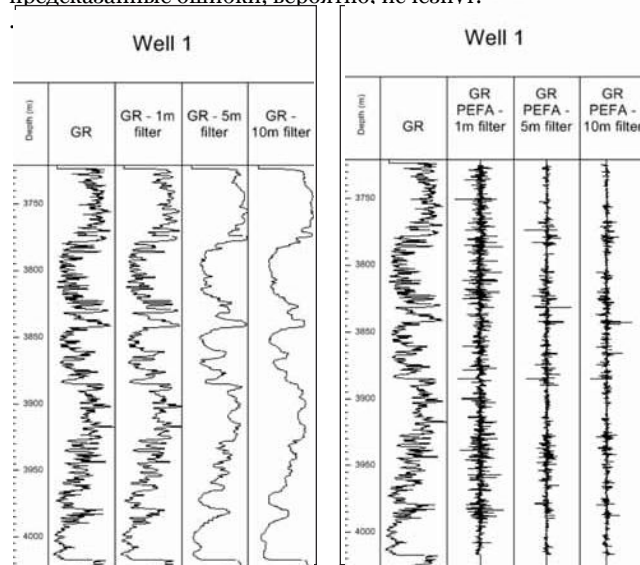


Рисунок 3 Как на Рисунке 2, но с исходной и сглаженной кривой РЕФА, полученной с помощью медианных фильтров различной ширины (1, 5, 10 м).

На рисунке 3 показан тот же каротаж, что и на рисунке 2 с тремя копиями исходного ГК, каждый из которых прошел медианную фильтрацию с увеличивающейся длиной медианы.

Результирующая кривая РЕФА показана на Рисунке 4. Обратите внимание, как сильно на рисунке 2 были уменьшены некоторые из выбросов до уровня «шума» с помощью этой процедуры, в то время как остальные значения спокойно перенесли операцию сглаживания.

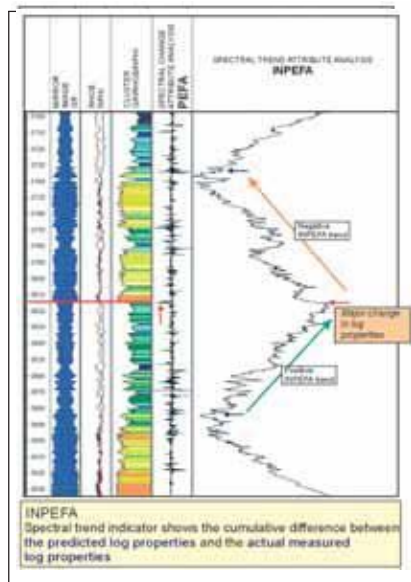
Наша интерпретация основывалась на том, что более устойчивые выбросы, вероятно, имеют большую региональную значимость по сравнению с теми, которые исчезают.

## Спектральный направленный атрибутный анализ – кривая INPEFA и ее интерпретация

Кривая РЕФА преобразуется в кривую INPEFA за один шаг: простым математическим интегрированием. Пример данного преобразования представлен на Рисунке 5. Обратите внимание, что мы, как положено, отображали кривую INPEFA на более широкой трассе, чем остальные каротажы, потому что ее значения лежат на тренде, который образуется в зависимости от изменения исходного каротажа.

Тренды, открытые INPEFA, появляются в результате эффекта накопления при интегрировании кривой РЕФА. Часть данных, в которых ошибки предсказания больше отрицательные, будут иметь общий отрицательный тренд. Часть данных, в которых ошибки предсказания больше положительные, будут иметь общий положительный тренд. Так как стратиграфические данные очень разнообразны, то может так оказаться, что большой тренд будет содержать в себе малый тренд того же или противоположного направления (к примеру, общий положительный тренд будет иметь отрицательные интервалы внутри себя).





**Рисунок 5**  
Пример  
Спектрального  
трендового  
анализа (INPEFA)  
ГК (та же  
скважина, что и  
на Рисунке 1 и 2).  
Обратите  
внимание на  
текст  
объяснения  
(благодарность  
за  
предоставленный  
материал NITG-  
TNO).

Главной особенностью кривой INPEFA, которую мы сейчас рассматриваем, является то, что она сама представлена трендами различного направления и точками разворотов между ними. Этими специфическими чертами обладает кривая INPEFA, которая используется в спектральном подходе к изучению исходных данных: в чем же геологический смысл?

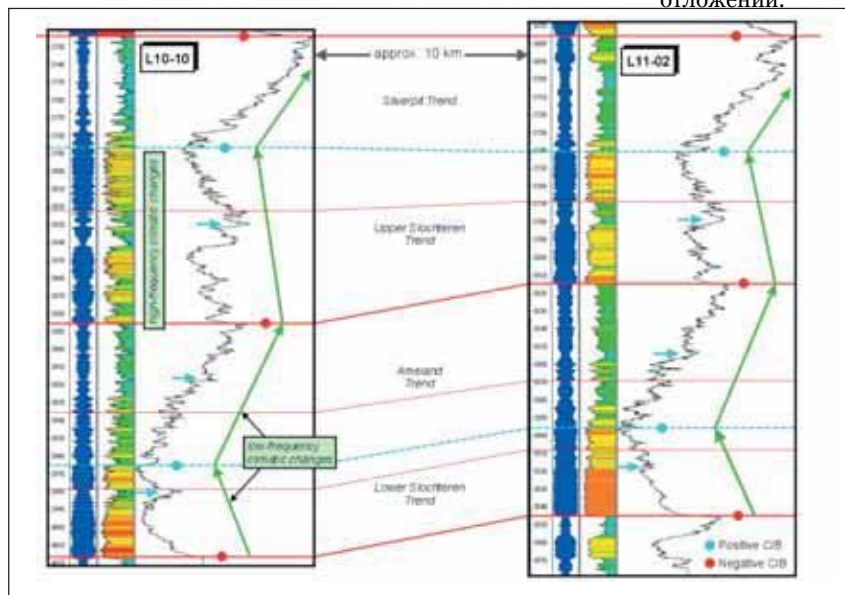
Главной особенностью кривой INPEFA, которую мы сейчас рассматриваем, является то, что она сама представлена трендами различного направления и точками разворотов между ними. Этими специфическими чертами обладает кривая INPEFA, которая используется в спектральном подходе к изучению исходных данных: в чем же геологический смысл?

Отрицательный тренд INPEFA является результатом накопления отрицательных значений ошибок предсказания. Отрицательные значения ошибки предсказания образуются при переоценке значений ГК фильтром. Следовательно, общий отрицательный тренд в

кривой INPEFA представлен данными с преобладанием реальных значений по сравнению с предсказанными. В случае ГК реальные значения означают большую степень «песчаности» по сравнению с предсказанными. В общем случае мы, следовательно, можем предполагать, что отрицательный тренд INPEFA отвечает за «регрессию», хотя его точный смысл будет зависеть от геологического контекста. Песчаный тренд мог бы означать, к примеру, (а) увеличение содержания крупнозернистых осадков, (б) обмеление или (в) уменьшение расстояния до береговой линии. Нам необходимо быть осторожными при разделении математического смысла тренда INPEFA, который точен и объективен, и геологической интерпретации, которая может быть больше субъективной. С другой стороны общий положительный тренд INPEFA представляет часть данных, в которой реальные значения каротажа больше предсказанных. Для ГК это означает, что реальные значения в большей степени, чем предсказывалось, характеризуют «глинистые» фации, имея смысл (в общих терминах) «трансгрессии». Это может быть представлено (а) уменьшением мощности осадков, (б) увеличением глубины моря и площади аккумуляции или (в) увеличением расстояния до береговой линии, в зависимости от контекста.

При присвоении INPEFA тренду геологического смысла, особое внимание необходимо обращать на точки, в которых происходит изменение тренда, особенно на те места, где он меняет знак. Такие точки являются очень важными. Присутствие этих точек разворота на кривой INPEFA подтверждает, возможно, наиболее важную информацию, полученную с помощью нового метода обработки данных каротажа.

В разворотных точках, где, скажем, общий отрицательный тренд (увеличение «песчаности») переходит в общий положительный тренд (увеличение «глинистости»), можно говорить о существенных изменениях, которые испытала осадочная толща. Содержание песка сходит на нет, возможно, в связи с изменением уровня моря, который в свою очередь может быть вызван изменениями в климате. В противоположных разворотных точках, где положительный тренд переходит в отрицательный, имеет место обратный эффект, которые выражается в резком повышении «песчаности» отложений.



**Рисунок 6** Пример корреляции между двумя скважинами, иллюстрирующий иерархический подход в анализе кривой INPEFA. Сплошными красными линиями представлены границы циклов, отбитые по точкам разворотов положительное-к-отрицательному; пунктирной синей линией показаны «поверхности завершения циклов», отбитые по точкам перехода отрицательное-к-положительному. Жирные красные линии отвечают границам главных циклов; более тонкие красные линии – границам подчиненных (наложенных) циклов

**Выводы**

На протяжении исследования спектральных свойств каротажных данных мы открыли и развили абсолютно новую методологию для стратиграфической интерпретации каротажных данных. Кривые PEFA и INPEFA содержат информацию, которая является глубоко скрытой в необработанном исходном каротаже. Кривая PEFA отбрасывает разрывы сплошности спектральных свойств каротажа и дает полезную информацию о относительной амплитуде таких разрывов. Кривая INPEFA отображает тренды в данных, разделенных точками разворота, которые могут быть интерпретированы как значимые региональные события в истории осадконакопления бассейна. Основой этих открытий послужило допущение, что фациальные каротаж может обеспечить тесную корреляцию с результатами изменения климата. Рассматривая каротажные данные как временной ряд (в аналитическом, а не в геологическом смысле), мы можем использовать общеизвестные спектральные методы изучения, которые позволят построить кривые PEFA и INPEFA. Все примеры, приведенные в этой статье, основывались на данных ГК, который всегда представлен в стандартном наборе каротажей, относительно инвариантен к скважинным условиям и (самое важное) очень чувствителен к изменению условий осадконакопления (по крайней мере, для обломочных пород). Интерпретация других каротажей или ГК в карбонатах может отличаться от результатов, приведенных в данной статье в качестве примеров.

Подход INPEFA анализа имеет аналогии с секвенсной стратиграфией; мы определяем основные границы временных поверхностей, которые разделяют интервалы с различным характером осадконакопления. Всем известны трудности, с которыми сталкивается сейсмика при определении границ секвенций, и каротаж, при выделении поверхностей максимального затопления. В связи с этим мы не проводим полную аналогию между поверхностями, выделенными этими методами и методами точек разворота INPEFA. Наш метод позволяет более объективно дробить каротаж на временные и коррелируемые единицы, позволяя добиваться большей разрешенности, чем это делается при работе с сейсмическими данными. Дальнейшая работа будет направлена на более детальное изучение соответствия между ключевыми поверхностями, выделенными с помощью сейсмической стратиграфии, и поверхностями, полученными методом INPEFA.

**Ссылки**

- Childers, D.G. (Ed.) [1978] *Modern Spectrum Analysis*. IEEE Press, New York.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., and Vetterling, W.T. [1988] *Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press.
- Rider, M.H. [1996] *The Geological Interpretation of Wireline Logs*, 2nd Edition. Whittles Publishing, Scotland.
- Robinson and Treitel [1980] *Geophysical Signal Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Sadler, P. M. [1999] The influence of hiatuses on sediment accumulation rates. In Bruns, P. and Hass, H. C. (eds.): On the Determination of Sediment Accumulation Rates. *GeoResearch Forum*, 5, 15-40, Trans Tech Publications, Switzerland.
- Schwarzacher, W. [1993] Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory. *Developments in Sedimentology* 52. Elsevier.
- Silva and Robinson, [1979] *Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas*, Elsevier, Amsterdam.
- Weedon, G.P. [2003] *Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy*. Cambridge University Press.

**Благодарности**

Благодарим NITG-TNO за разрешение на публикацию каротажных данных, которые использовались для иллюстраций.