

## Описание карбонатной системы: технический прогресс в сеймостратиграфии. Unravelling a carbonate system: technical advances in seismic sequence stratigraphy

Geert de Bruin,<sup>1\*</sup> Kirstin McBeath,<sup>2</sup> и Nanne Hemstra<sup>1</sup> показывают как недавно внедренное программное обеспечение может стать ключевой в сеймостратиграфии.

### Введение

По сути, сеймостратиграфия используется для построения хроностратиграфических рамок для проведения корреляции и построения карт, а также для стратиграфических предсказаний (Emery and Myers, 1996). Несмотря на то, что сеймостратиграфия доказала, что является мощным инструментом, и несмотря на крупный прорыв в концепциях с ввода этого понятия в 1970х, сеймостратиграфия еще не выработала весь свой потенциал из-за нехватки поддерживающих программных средств. Недавно на рынок вышла новая система ПО, OpendTest SSIS, целью которой является восполнение этого пробела.

### Концепция

Основной концепцией OpendTest SSIS является то, что все стратиграфические оси синфазности (горизонты) автоматически обнаруживаются системой и располагаются в стратиграфическом порядке (Ligtenberg et al., 2006; de Bruin et al., 2006; and de Groot et al., 2006a, 2006b). Эти хроностратиграфические поверхности генерируются при суб-сейсмическом разрешении и прослеживаются на всем сейсмическом кубе в пределах традиционно картируемых ограничивающих поверхностей. Им приписываются относительные индексы геологического времени или 'геовремена'. Так многочисленные горизонты располагаются в стратиграфическом порядке, который имеет ряд явных преимуществ:

- Он облегчает визуализацию истории осадконакопления по инлайнам и кросслайнам путем отображения хроностратиграфических событий (далее называемых

хроностратиграфией) в виде пересекающихся цветных линий, или в виде непрерывных цветных наложений.

- Он позволяет делать слайсы истинных горизонтов по сейсмическим кубам 3D

без искажений, вызванных структурной интерференцией (как это имеет место для построения временных слайсов и слайсов горизонтов в непараллельно-слоистой модели недр).

Программа выполняет автоматическое построение хроностратиграфических диаграмм иначе называемых диаграммами Уилера. До этого, диаграммы Уилера строились вручную, что делало этот процесс длительным, и поэтому эта процедура часто опускалась при работе. И это жаль, поскольку диаграммы Уилера или преобразования Уилера transform, как называют их коллеги-сейсмологи, очень ценный инструмент для получения знаний и для извлечения дополнительной информации.

Например, эрозионные перерывы или перерывы, вызванные отсутствием осадконакопления видны, можно определить латеральную протяженность стратиграфических единиц с первого взгляда, и можно получить понимание латерального смещения осадконакопления со временем. Трансформация Уилера конструируется путем простого выравнивания каждого хроностратиграфического маркера, что дает пользователю возможность изучить сейсмические данные и их производные (атрибуты или результаты расчета нейронных сетей) в области Уилера по трем измерениям. Это позволяет интерпретировать тракт систем. Подобные интерпретации могут отображаться в виде наложений сейсмических данных как в области литологии (структурной) так и в области трансформации Уилера (хроностратиграфической). Комбинация хроностратиграфии, преобразования Уилера,

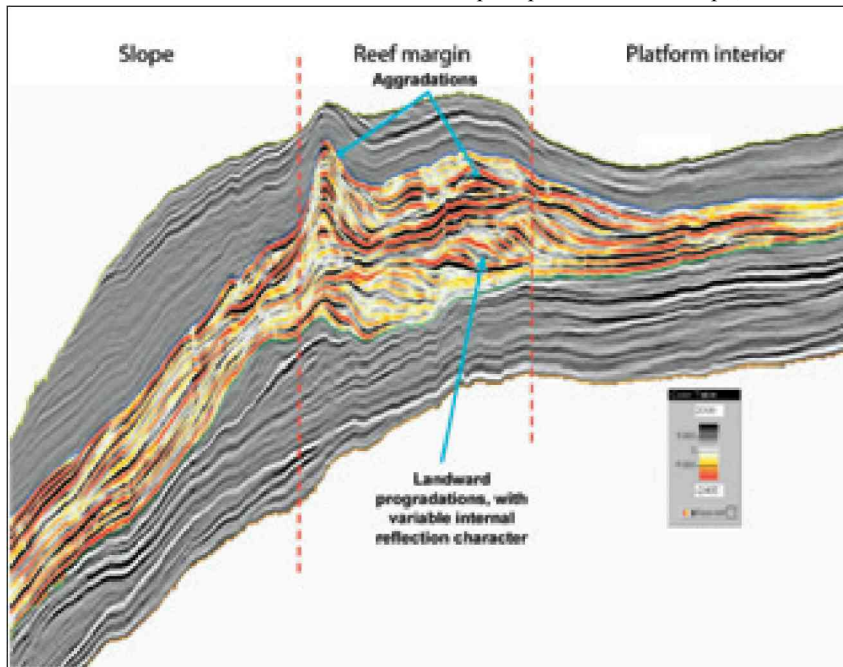


Рисунок 1 Сейсмические данные с поясами фаций.

<sup>1</sup> dGB Earth Sciences.

<sup>2</sup> School of Earth and Environment, University of Leeds (currently BP Exploration).

\* Corresponding author, E-mail: geert.debruin@dgb-group.com

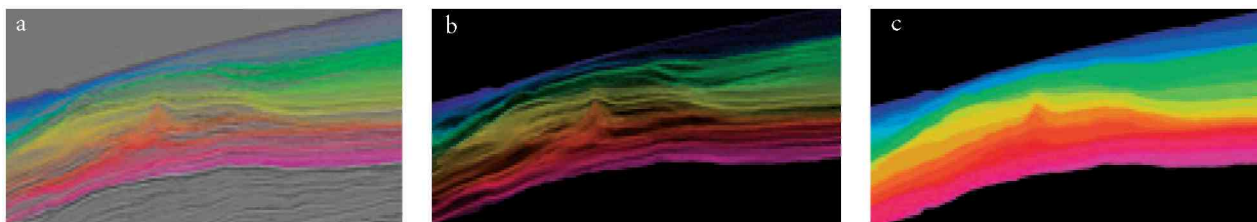


Рисунок 2 Различные отображения хроностратиграфии по инлайнам /кросслайнам.

и интерпретации тракта систем увеличивает понимание истории осадконакопления, и улучшает предсказание сейсмofаций и литофаций, что помогает в идентификации потенциальных стратиграфических ловушек.

### Цели исследований

Все предыдущие публикации, включающие эту методику, относились к обломочным системам. Эта первая работа, в которой описывается применение методики на объекте карбонатного месторождения, где работы ведутся с нуля. Целью исследования была оценка и понимание пространственной и временной значимости потенциальных коллекторских фаций в пределах сложной карбонатной системы как в области литологии, так и области «сглаженных сейсмических данных» преобразованием Уилера. Интерпретация трактов систем позволила предсказать распределение потенциальных коллекторских фаций до бурения глубоководной скважины на акватории Западной Африки. Анализ был выполнен по трехмерным кубам мигрированных до суммирования сейсмических данных хорошего качества. На момент проведения сейсмических исследований на области сейсмических работ не было ни одной скважины.

### Набор данных

Сейсмический разрез через куб данных (рисунок 1) раскрывает наличие огромного намываемого/размываемого карбонатного комплекса, в котором

виден общий трансгрессивный тренд. Он характеризуется отчетливой проградацией в сторону суши, подчеркивая обратноступенчатую природу системы. По информации с ближайшей скважины он интерпретируется как ранне-палеоэоценовая намываемая/размываемая карбонатная платформа (Williams, 2002). Карбонатная платформа характерна для T-factory (например, тропические карбонатные платформы - Schlager, 2005). Можно идентифицировать три основные фации, т.е. склон, окраина рифа, и внутренняя платформа. В пределах пояса фаций склона, геометрии типа лопастей интерпретируются как оползни (или гравитационно-перемещенные осадки) переотложенных осадков рифовых окраин, вызванных их обрушением. Такие карбонатные отложения являются результатом избыточной крутизны платформенных окраин. Геометрия строения фаций пояса рифовых окраин представляет собой развитие возвышенных структур, которые могут сопротивляться действию волн путем постройки органического каркаса или путем цементации песков на дне моря, или в процессе кратковременных воздействий (Schlager, 2005). Рифовые окраины в процессе эволюции преобразуются в обрамленную платформу, которая защищает выветрившуюся, низкоэнергетичную, потенциально лагунную среду внутренней части платформы. Эти 'защищенные' окраины платформ - возможно наиболее важные черты секвентной анатомии тропических

внешнего шельфа, преимущественно кластические (алевролиты, глины). Вероятно, процесс отложения был скорым, он ознаменовывался затоплением карбонатной платформы. Отражения выпуклой формы над агтрадационной геометрией карбонатного интервала предполагают сохранение топографии при отложении этого позднее-эоценового интервала, демонстрируют последующее дифференциальное уплотнение, которое привело к сжатию отражений и утонению в местах топографических возвышений.

### Результаты

#### Хроностратиграфия

Первым этапом анализа является расчет хроностратиграфии. В своей основе, хроностратиграфия - то набор горизонтов, которые автопикируются одновременно, располагаются в стратиграфическом порядке, и приписываются относительно геологическому времени. Хроностратиграфия может быть отображена в виде наложения инлайнов и кросслайнов, но также можно отображать отдельные горизонты. Каждая линия, показанная на Рисунке 2а и b, является хроностратиграфической осью синфазности. Цвет указывает на относительно геологическое время, пурпурный цвет представляет самые древние отложения, а голубой - самые молодые. На рисунке 2с, между стратиграфическими осями синфазности дана постоянная заливка.

Более того, отдельные хроностратиграфические оси синфазности можно просматривать и использовать как горизонты (рисунок 3а), например, для атрибутного анализа (рисунок 3б) или разбиения импульсов в нейронной сети.

#### Трансформация Уилера

Трансформация Уилера строится путем сглаживания каждой хроностратиграфической оси синфазности. Имеется несколько четких различий между (геологической) диаграммой Уилера и (сейсмическим) преобразованием Уилера:

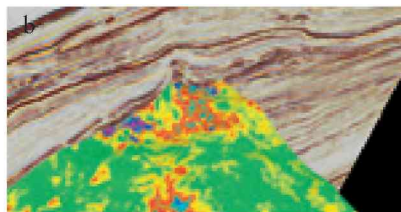


Рисунок 3 Отдельный хроностратиграфический горизонт. b) Атрибутный анализ хроностратиграфического горизонта.

карбонатных отложений (Schlager, 1999 и 2005).

На всей карбонатной структуре залегают поздне-эоценовые осадки

- Преобразование Уилера строится автоматически, тогда как диаграмма Уилера обычно строится вручную.
- Преобразование Уилера трехмерное или, при его применении к одной линии, двумерное, тогда как диаграмма Уилера всегда двумерна.
- Хроностратиграфию, сейсмические данные, и их производные (атрибуты, выходные данные нейронных сетей) можно подвергать преобразованию Уилера, тогда как диаграммы Уилера отображают только саму хроностратиграфию.
- В текущей версии программы еще одним отличием является то, что вертикальная ось данных после преобразования Уилера - *относительное геологическое время*, тогда как вертикальная ось диаграммы Уилера представляет *абсолютное геологическое время*.

Данные лучше изучать одновременно в области Уилера и нормальной области или осадочной области. В осадочной области видны структурные особенности, но другие особенности остаются скрытыми. Некоторые из этих особенностей отображаются в области Уилера, но этой области не хватает структурного аспекта. Одной из самых очевидных особенностей преобразования Уилера является то, что перерывы становятся заметными. Можно различать как оси синфазности, не связанные с отложениями осадков так и эрозионные врезы (Рисунок 4с). Также на преобразовании Уилера можно идентифицировать разрезы со стратиграфическим утонением или сжатием. Во время осадконакопления в разрезах, подвергаемых сжатию, скорость осадконакопления очень малы, что приводит к слиянию осей синфазности в масштабах с разрешением, менее сейсмического, поэтому их нельзя проследить автоматически. Итак, хотя стратиграфическое утонение или разрезы, соответствующие условиям сжатия, не могут считаться истинными перерывами, они проявляются в преобразовании Уилера (и диаграмме Уилера) (рисунок 4с).

Более того, латеральная протяженность стратиграфических комплексов или отдельных хроностратиграфических осей можно с легкостью определить путем преобразования Уилера. Это может быть трудной задачей в осадочной области, особенно когда не имеется данных хроностратиграфии (рисунок 2). Таким образом, область Уилера идеальна для изучения развития осадконакопления с течением времени, т.е. как смещается

осадконакопление (латерально) со временем? и каково латеральное и временное распределение отдельного комплекса?

### Тракт систем

В сеймостратиграфическом сообществе в настоящее время используют несколько моделей, каждая из которых имеет свой набор терминологии для тракта систем и стратиграфических поверхностей и со своей собственной позицией границы комплекса (Catuneanu, 2002). Программа не ограничивается ни одной из этих моделей, поскольку терминология тракта систем и позиция границы комплексов – переменные, задаваемые пользователем.

Интерпретация тракта систем выполняется на основе интервалов геологического времени, задаваемых пользователем. Таким образом, тракт систем ограничивается двумя хроностратиграфическими осями, выбранными пользователем. Всем промежуточным

выполнять наложения инлайнов и кросслайнов (рисунки 4b, d, и f).

Эта гибкость также позволяет подразделять комплексы на осадочные единицы, приписывать отдельные цвета и имена каждой единице, в случае, если интерпретация тракта систем невозможно или трудно выполнить.

В настоящей работе мы подразделяем весь комплекс на четыре тракта систем: тракты систем падения уровня моря (FSST), тракты систем периода низкого уровня моря (LST), Трансгрессивные тракты систем (TST), и тракты систем высокого уровня моря (HST). Интерпретация основана на следующих базовых принципах:

- Трансгрессия - характеризуется смещением фаций и береговой линии в сторону суши, тогда как регрессия – смещение в сторону моря фаций или береговой линии. (Catuneanu 2002).
- Трансгрессия или трансгрессивные тракты систем характеризуются ретроградацией и агградацией. Это

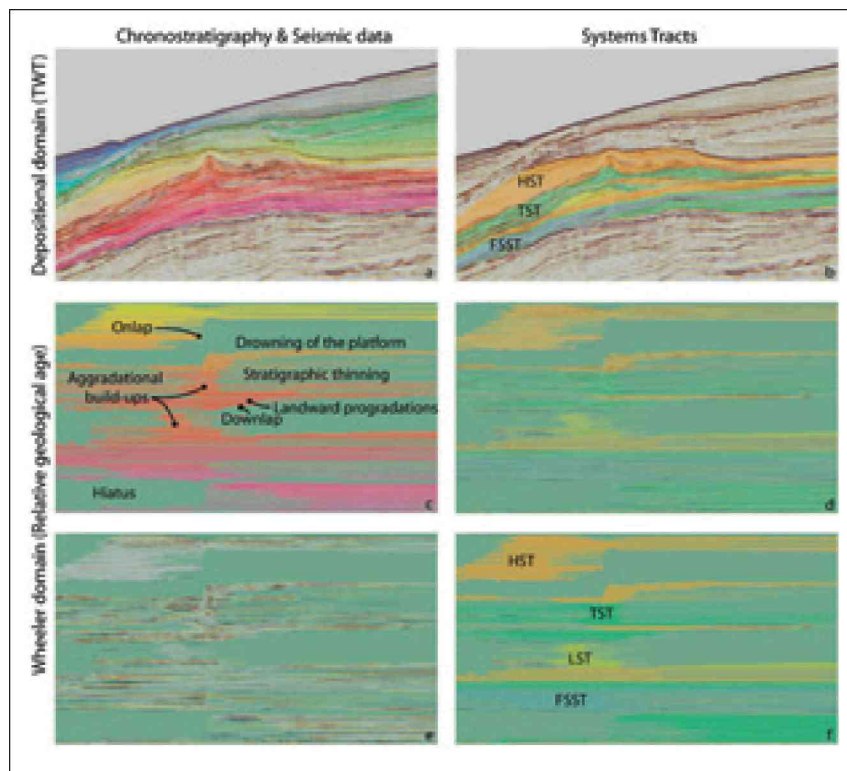


Рисунок 4 Область осадконакопления а) Хроностратиграфия, б) Интерпретация трактов систем. Преобразования Уилера, в) Хроностратиграфия, д) Изображение полупрозрачных трактов систем, перекрытые сейсмическими данными, е) Сейсмические данные, и ф) Интерпретация трактов систем.

хроностратиграфическим осям приписывается определенный тракт систем. Как и для хроностратиграфии, можно

происходит когда базис поднимается и создается больше пространства для отложения, чем требуется для имеющихся осадков.



- Регрессии можно подразделить на нормальную и вынужденную регрессию:

- a. При вынужденной регрессии базис падает, что заставляет систему наступать. Вынужденная регрессия характеризуется проградацией и врезами (эрозия).
- b. При нормальной регрессии базис поднимается, но потребление пространства осадками превышает образующее при поднятии базисного уровня пространства. Нормальная регрессия происходит в первую и последнюю стадии подъема базисного уровня и характеризуется проградацией

и агградацией. Тракты систем низкого и высокого стояния моря оба являются отложениями характерными для нормальной регрессии.

На рисунке 5 представлена мультиплицированная история осадконакопления, каждая картинка отображает определенный тракт систем. На первом изображении отложения (Временной этап 1) показывают четкую модель регрессивного накопления и таким образом, интерпретируются как трансгрессивные тракты систем, которые отлагались в Campanian (верхний Мел). Осадки, показанные на втором изображении (Временной этап 2) отображают чистую проградацию, что указывает на падение базиса, таким образом, они интерпретируются как тракт системы падения уровня моря.

Тракты систем трансгрессивные и высокого стояния моря (Временной этап 3 и 4) отлагались в маастрихте, при подъеме базиса. Четкая смена модели осадконакопления заметна после Временного этапа 4. Осадконакопление более локализованное и характеризуется холмистой структурой (Временной этап с 4 по 5). Эта первая холмистая структура характеризуется агградацией и проградацией, таким образом, их можно интерпретировать как осадки нормальной регрессии (LST). Сверху этих изначально холмистых отложений, заметна первая проградация в сторону суши (Временной этап 6). На проградацию в сторону суши указывает сдвиг фаций в сторону суши, который типичен для трансгрессии (TST), и это является признаком того, что карбонатная платформа испытывала трудности при подъеме базиса

Далее, карбонатная платформа является чисто намывными (Временной этап 6), и идет в ногу с подъемом уровня моря. Это указывает на то, что потребление пространства осадками почти равно пространству, создаваемому подъемом базиса. Далее происходит вторая фаза проградации в сторону суши (Временной этап 8). Отступление происходит когда карбонатные платформы сталкиваются с подъемом уровня базиса, который слегка превышает их потенциал роста (Schlager 2005). Имеется несколько причин, почему отступление может быть благоприятно для карбонатной платформы: энергия волн меньше; карбонаты достигают более высокого уровня, когда происходит дифференциальное погружение (увеличение погружения по направлению к бассейну); отступление смещает осадконакопление к областям с более низкими скоростями погружения (Schlager 2005). Поскольку очень четкая холмистая агградация происходит в то же время, что и проградация по направлению к суше, дифференциальное погружение и энергия волн кажутся менее вероятными. В Thanetian (Временной этап 9) холмистые структуры продолжают намываться (HST) и, по мере увеличения крутизны склонов, происходит их обрушение. По направлению к суше, две более мелкие структуры намывных холмов колонизировали плоскую вершину подстилающего разреза.

Во времена раннего эоцена (Ypresian) быстрый подъем уровня моря (представленный на этапе времени 10) затопил всю карбонатную структуру.

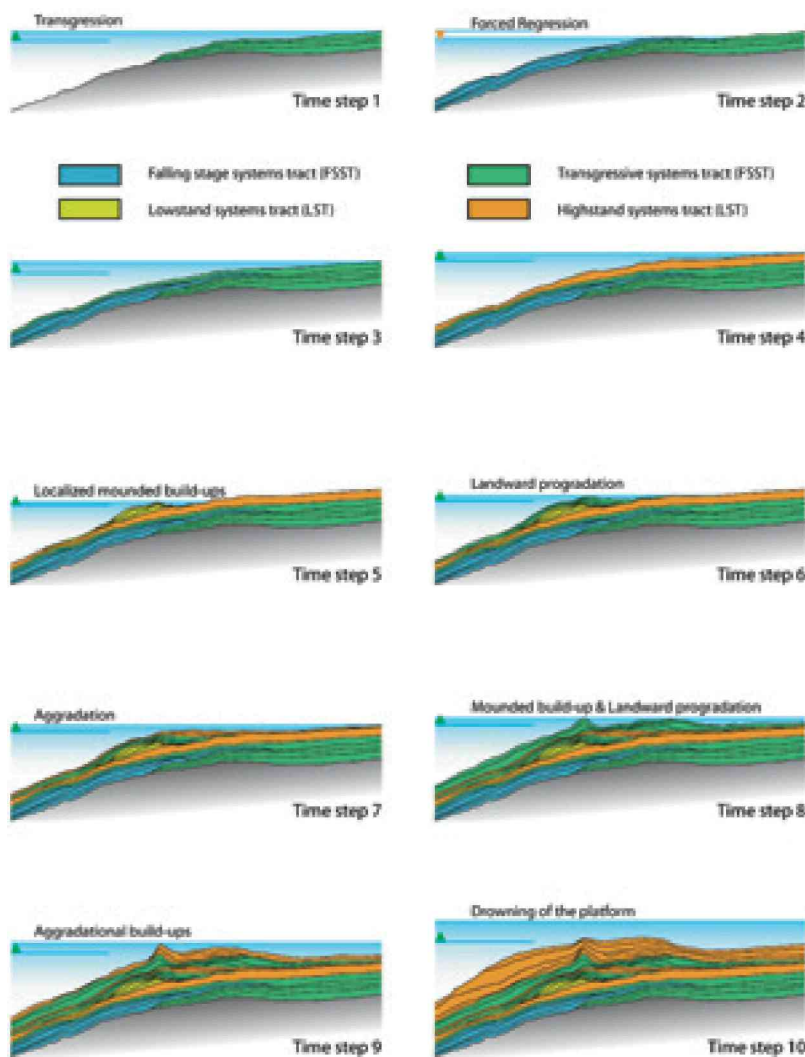


Рисунок 5 Мультипликация истории осадконакопления.

Это представляет собой разрушение карбонатной платформы, что в результате привело к погружению всей структуры а обстановку глубоководья. Tremblay (2005) предположил, что разрушение карбонатной платформы совпадает с палеоцен-эоценовым температурным климатическим максимумом (ПЕТМ); резкое глобальное изменение климата, которое представляет собой одно из наиболее быстрых и экстремальных событий глобального потепления, которое нашло отображение в геологической истории. ПЕТМ характеризуется массивной инъекцией, по крайней мере 1000 Гт легких изотопов углерода в океан или атмосферу (Dickens, 2000).

### Обсуждение

Автоматическое пикирование хроностратиграфических осей имеет много явных преимуществ: хроностратиграфические отображения, преобразования Уилера, интерпретация трактов систем, и т.д. Польза этого метода зависит от качества хроностратиграфических горизонтов (de Groot et al., 2006a). В данной системе все сейсмические оси синфазности прослеживаются в автоматическом режиме. Кратные волны, некогерентный шум, артефакты миграции, и т.д., должны подавляться перед выполнением автопикирования (de Groot et al., 2006a).

Качество данных в данном случае, очень хорошее, но в этой съемке также присутствуют некоторые значительные сейсмические искажения, которые вызвали артефакты в хроностратиграфии.

Таким образом, Хроностратиграфия также рассчитывалась в виде двумерных разрезов по сетке инлайнов и кросслайнов. Качество сетки двумерной хроностратиграфии считается превышающим рассчитанную трехмерную хроностратиграфию, и таким образом, сетка использовалась для интерпретации трактов систем. В настоящее время эти проблемы изучаются в проекте SSIS II, который финансируется промышленностью. Другими запланированными улучшениями и доработками SSIS являются калибровка хроностратиграфии до абсолютного геологического времени, и возможности сейсмостратиграфической интерпретации в ручном режиме.

### Благодарности

Благодарим Wintershall и партнеров за поддержку данной работы и получение разрешения на публикацию. Мы также благодарим спонсоров и соратников проектов разработки SSIS: Statoil, Shell, BG Group, ENI, Wintershall, TNO, и Dr Brad Macurda.

### Литература

de Bruin, G., Ligtenberg, H., Hemstra, N., and Tingdahl, K. [2006] Synchronised sequence stratigraphic interpretation in the structural and chronostratigraphic (Wheeler transformed) domain. *EAGE Research Workshop, Grenoble, France*. Catuneanu, O. [2002] Sequence stratig-

raphy of clastic systems: concepts, merits and pitfalls. *Journal of African Earth Sciences*, 35, 1-43.

Dickens, G.R. [2000] Methane oxidation during the Late Palaeocene Thermal Maximum. *Bulletin de la Societe Geologique*, 171, 37 - 49. Emery, D. and Myers, K.J. [1996] *Sequence stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford, UK, 297. de Groot, P. and Bril, B. [2005] The open source model in geosciences and OpendTect in particular. *SEG 75th Annual Meeting, Houston*, Expanded Abstracts, 24, 802-805. de Groot, P., de Bruin, G., and Hemstra, N. [2006a] How to create and use 3D Wheeler transformed seismic volumes. *76th SEG Annual Meeting, New Orleans*.

de Groot, P., de Bruin, G., and McBeath, K. [2006b] OpendTect SSIS: Sequence Stratigraphic Interpretation System. *Drilling & Exploration World*. Ligtenberg, H., de Bruin, G., Hemstra, N., and Geel, C. [2006] Sequence stratigraphic interpretation in the Wheeler transformed (flattened) seismic domain. *68th EAGE Conference & Exhibition, Vienna*.

Schlager, W. [2005] Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy: SEPM Concepts in Sedimentology and Palaeontology: Tulsa. *Society for Sedimentary Geology*, 8, 200.

