

3D геологическое моделирование карбонатного мелководного комплекса: изучение моделей коллекторов, используя данные обнажений. 3D geological modelling of a carbonate shoal complex: reservoir analogue study using outcrop data

Thomas Aigner,¹ Sascha Braun,^{1,3} Denis Palermo,¹ и Wolfgang Blendinger²

Введение

Достоинства аналогов обнажений широко признаются для моделирования геометрии силикокластических коллекторов (напр., Flint и Bryant, 1993, Miall и Tyler, 1991). Напротив, количественные данные по карбонатным телам моделей резервуаров довольно скучны. Также существует относительное малое число исследований, применяющих трехмерное моделирование для карбонатных тел (напр., Kerans и Tinker, 1997, Grutsch и Mercadier, 1999). Qi и др. (2007) представляют подробное исследование по стохастическому моделированию оолитовых континентальных комплексов, сходное с моделированием в данной работе. Изучение аналогов обнажений в настоящее время широко осуществляется, особенно для бассейнов Ближнего Востока (напр., Immenhauser и др., 2004).

Эта работа основана на изучении строения, седиментологии и петрофизики карбонатных песчаников в аналогах обнажений в триасовом ракушечнике (Muschelkalk). Ракушечный известняк осаждался в течение среднего триаса в кратонном, медленно понижающемся бассейне (рис. 1). Верхний ракушечник представляет собой плавно наклоненную карбонатную структуру, заполняя эпиконтинентальный бассейн, и, следовательно, представляет аналог для важного типа «нерифовых» скелетных и оолитовых карбонатных песчаных коллекторов, особенно на Ближнем Востоке. Согласно Rutte (1957) и Hatzold (1981) прибрежные карбонатные песчаники, являющиеся предметом данного изучения, рассматриваются в качестве подводных барьеров и подвижных прибрежных морских зон на локальных палеоподнятиях (напр., 'Gammesfeld-high', рис. 1 В). Ракушечники представляют продуктивные газовые коллекторы на северо-востоке Нидерландов (Borkhatar-ia и др., 2005, 2006).

Региональная стратиграфия известна из многочисленных изучений верхнего ракушечника в южно-немецком бассейне (напр., Kozur 1977, Hagdorn и Simon, 1988, Geyer и Gwinner, 1991). Однако исследования, ориентированные непосредственно на проведение высоко разрешающей стратиграфической секвенции с акцентом на изучение продуктивности коллектора, были выполнены только в недавнее время (напр., Schauer и Aigner, 1997, Braun, 2003, Ruf и Aigner, 2004, Kostic и Aigner, 2004).

Выходы пластов во многих карьерах и естественные обнажения Южной Германии сохраняют геометрию в мелководных высокогенергетических отложениях вдоль границы бассейна верхнего ракушечника. Исследование

Braun'a (2003) дает подробную оценку состава, стратиграфии и петрофизических характеристик моделей резервуаров карбонатных песчаников. Эти данные используются в данной статье для моделирования трехмерного осадочного и петрофизического строений с применением программного обеспечения Petrel.

Фациальный анализ

Braun'ом (2003) был выделен двадцать один вертикальный участок (местоположение см. на рис. 1 В) в карьерах (и отдельных скважинах, см. рис. 2), а также построены литологические кривые с использованием программы WellCAD. Образцы были вырезаны и отполированы для определения параметров макрофаций и дальнейшего детального анализа литологических структур, классификации и состава.

Для описания микрофациальной характеристики компонент, то есть состава матрицы, а также цемента и диагенеза, были изучены тонкие срезы с помощью трансмиссионной световой и катодолюминесцентной (CL) микроскопии. В пределах изучаемой области были определены 15 литофациальных типов в верхнем ракушечнике (подробнее см. Braun, 2003). Литофациальные типы были группированы по трем фациальным ассоциациям, состоящим из генетически связанных фациальных типов:

- мелководные фациальные отложения;
- переходные фациальные отложения;
- морские (которые можно разделить на прибрежные и глубокие).

Эти фациальные ассоциации отражают последовательности латеральных фаций, различные гидродинамические условия и связанную с ними различную продуктивность коллекторов в направлении от континента к морю. Эти фациальные последовательности от прибрежных к отложениям бассейнового типа следуют из предыдущих работ Wagner (1913), Vollrath (1955) и Aigner (1985). Общепризнанный образец латеральной фации – это то, что прибрежные скелетные и оолитовые карбонатные пески формируют тела, подобные «отмелей», часто на известных палеотектонических поднятиях. Эти тела вытянуты по форме и расположены концентрически. Центры «отмелей» обычно состоят из хорошо сортированных оолитовых зерен, сменяющиеся в направлениях к морю и суже скелетно-оолитовыми зернами, и замещаются в конце хорошо

¹Institute of Geosciences, Univ. of Tuebingen, Sigwartstr. 10, 72076 Tuebingen, Germany, Tel. 0049-(0)7071-2975923, E-mail: t.aigner@uni-tuebingen.de.

²Institute of Petroleum Geology, Technical Univ. of Clausthal, Leibnizstrasse 10, 38678 Clausthal-Zellerfeld , Germany.³
Current address: RWE Dea AG, Wietze Laboratory, Industriestr. 2, 29323 Wietze, Germany.

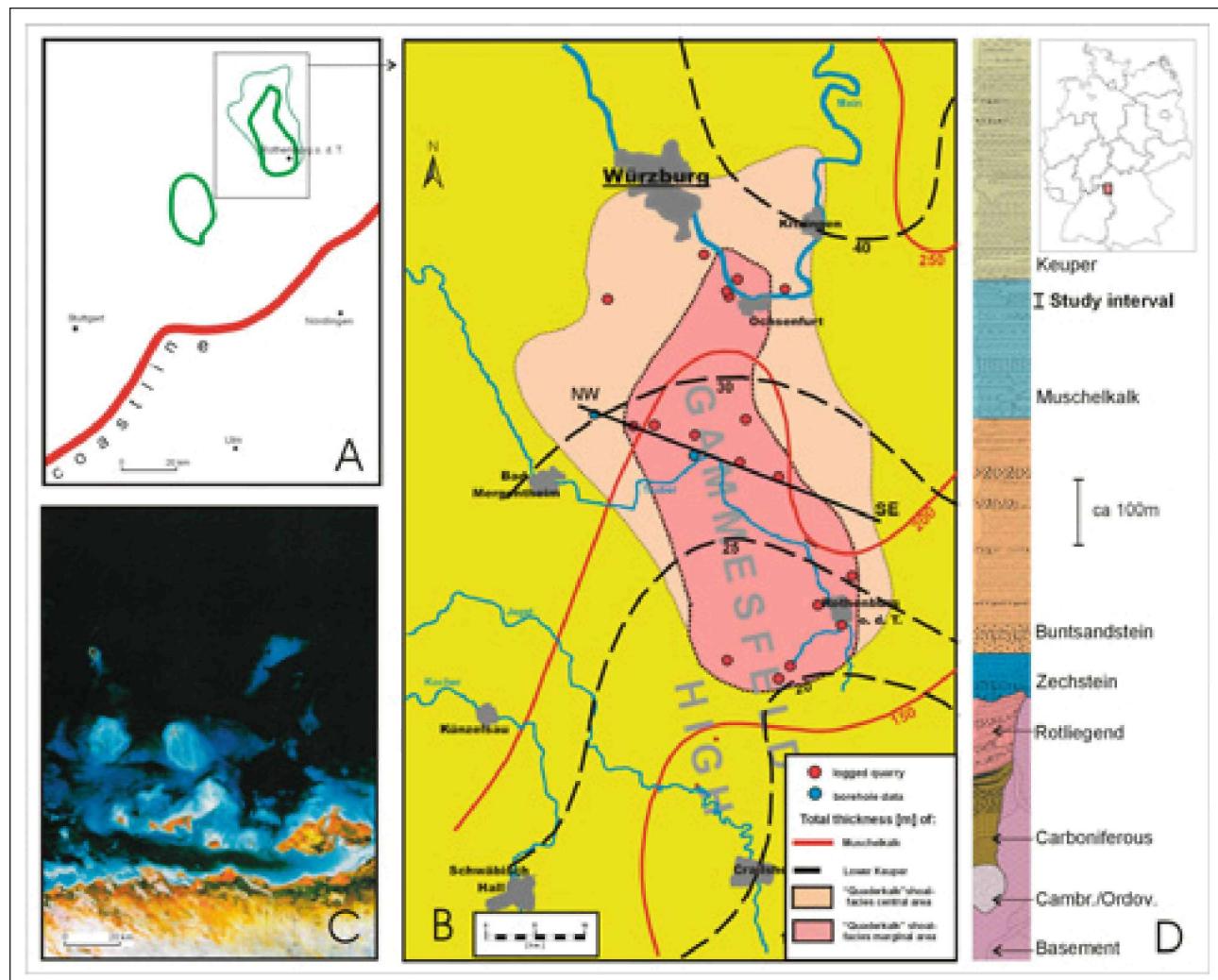


Рис. 1. А) Палеогеография формаций триасового ракушечника в изучаемом районе юго-западной Германии. Показана граница палеобереговой линии и крупные мелководные тела: западное тело было подробно изучено Ruf'ом и Aigner'ом (2004), восточное (в квадрате) – предмет изучения данной статьи. В) Континентальный комплекс крупным планом (квадрат на рис. А), отображенный в ранних исследованиях (Wagner, 1913, Rutte, 1957, Drexler, 1964, Aust, 1969, Hatzold, 1981) и карта изопахит для ракушечника и кейпера (стратиграфический ярус верхнего триаса), обозначающая структурные палеоподнятия ('Gammesfeld High'). С3-ЮВ линия: см. стратиграфический разрез на рис. 3. Красные и синие точки обозначают местоположения скважин, выполненные Braun'ом (2003). С) Космический снимок юго-восточной береговой линии Персидского залива (Harris и Kowalik, 1994), показанный в том же самом масштабе, что и карта А): отмечается схожесть «отмелей» по размеру, геометрии и расстоянию от береговой линии. Д) Стратиграфия южно-немецкого бассейна и изучаемый интервал верхнего ракушечника в районе юго-западной Германии.

сортированными фрагментами раковин.

По направлению к бассейну количество скелетных частиц, а также их размер зерен падает, в то время как содержание глины возрастает. По направлению к бассейну пласти биокластического песчанистого известняка переходят в плохо сортированные биокластические алевритистые известняки и песчанистые известняки, иловые известняки в алевритистые известняки и почковидные иловые известняки в глинистые известняки.

Высокоэнергетическая ракушечно-оолитовая фациальная зона интерпретируется как мелководно-морской комплекс, подобно карбонатно-песчаным телам в современном Персидском заливе (рис. 1 С), в то время как мелководная зона интерпретируется как лагунная фация.

Слоистые песчанистые известняки, окружающие мелководные тела, рассматриваются как переходные. Слоистые плохо сортированные песчанистые известняки и алевритистые известняки принадлежат к зоне перехода между мелководным и глубоководным склонами, а иловые и глинистые известняки являются частями глубоководных фаций склонов.

Стратиграфическое строение

Циклы метрового масштаба являются повсеместными и могут быть сразу же узнанными в обнажениях и литофациальном разрезе в верхнем ракушечнике (рис. 2). Они относятся к циклам малого масштаба.

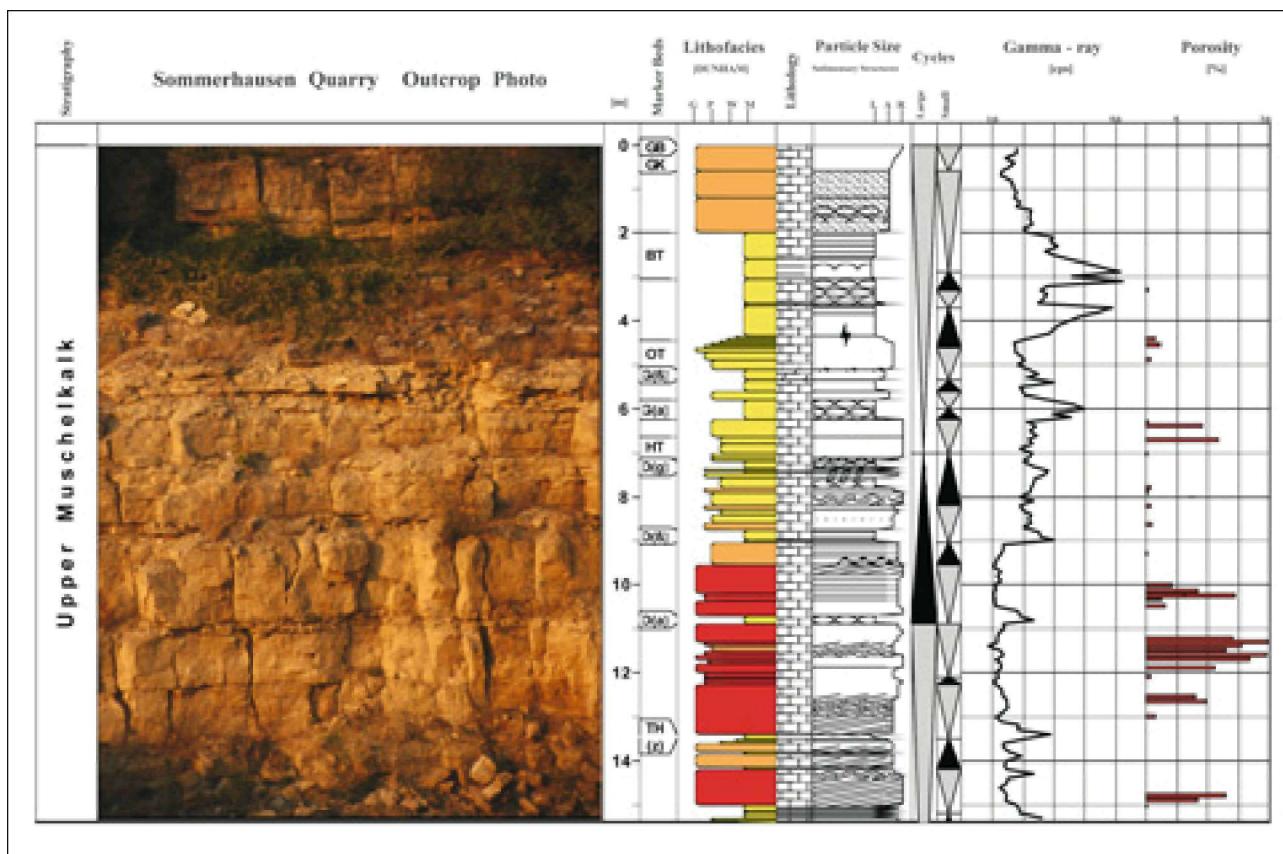


Рис. 2. Пример участка обнажения с литологическим разрезом, гамма-каротажной кривой, информацией о пористости и интерпретации циклов (карьер Sommerhausen; изменен у Braun'a, 2003). Цветом обозначены отложения: красный – континентальные, оранжевый – переходные, желтый – морские.

Интерпретация циклов основана на последовательности литофаций. Каждый метровый цикл состоит из полуцикла регрессии и трансгрессии, разделенных точками возврата, которые представляют максимумы трансгрессии и регрессии. Мощность полного цикла изменяется от 0.7 до 3.5 м. Средняя мощность порядка 2 м. Точки возврата используют как маркеры для стратиграфической корреляции.

В изученной части верхнего ракушечника мелкомасштабные циклы трансгрессии и регрессии приведены в крупномасштабном тренде. Двадцать одна стратиграфическая колонка была прокоррелирована и собрана в стратиграфические разрезы (подробно см. Braun, 2003). Как пример, на рис. 3 показан разрез приблизительно ориентированный по падению через карбонатную структуру, который используется как начальная модель для геологического моделирования. В течение первых шести метровых циклов изучаемой последовательности континентальные тела идут в направлении моря, и, таким образом, интерпретируются как крупномасштабная регрессия. Циклы 7 и 8 имеют меньшие континентальные тела, которые идут в направлении суши, и, следовательно, интерпретируются, чтобы отразить крупномасштабную трансгрессию. Циклы с 9 по 13 снова показывают общую тенденцию тел к морю, что интерпретируется как возобновившаяся общая регрессия.

Другой разрез, созданный Braun'ом (2003), через изучаемую площадь имел достаточно похожее стратиграфическое строение и также региональную изменчивость. Из-за этой кажущейся сложности было положено начало изучению с помощью 3D моделирования.

Геологическое моделирование

Последовательность работ

3D геологическое моделирование включает следующие этапы:

- Ввод данных: гамма-излучение, литологические фациальные разрезы и петрофизические данные были импортированы как файлы ASCII.
- Корреляция и воспроизведение поверхности: точки возврата стратиграфических циклов были пикрованы как скважинные отбивки и использовались для корреляции, подобно ранее установленным стратиграфическим разрезам. Поверхности были построены из этих точек корреляции.
- Выбор сетки и размера слоев: латеральные размеры сетки были 400 на 400 м, а горизонтальные границы интервала были установлены, чтобы можно было проследить поверхности. Каждая из 25 зон представляет один полуцикл трансгрессии и регрессии (в среднем 1-2 м толщиной), и была разделена на 4 слоя, чтобы гарантировать вертикальное разрешение в несколько дециметров. Это очень высокое разрешение по вертикали было необходимо, чтобы обеспечить быстрые вертикальные изменения фаций дециметрового масштаба.
- Моделирование фаций: после того, как основа стратиграфии была установлена, фациальные разрезы в местоположениях данных были изменены. Распределение фаций было смоделировано с использованием различных стохастических и детерминистических методов, о чем идет речь ниже. Различные сценарии моделирования (рис. 4)

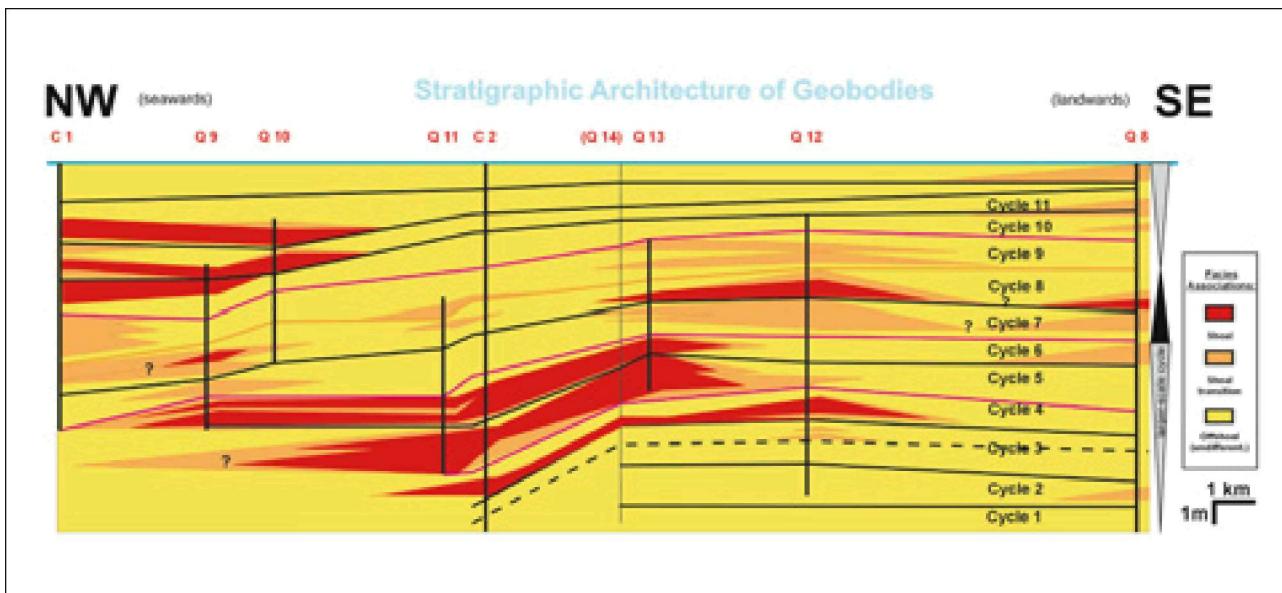


Рис. 3. Пример регионального ориентированного приблизительно с ЮВ на СЗ окна корреляции, основанного на данных обнажений (изменен у Braun'a, 2003). Отмечается, что мелководные тела имеют общую тенденцию продвижения в сторону моря-сушки-моря.

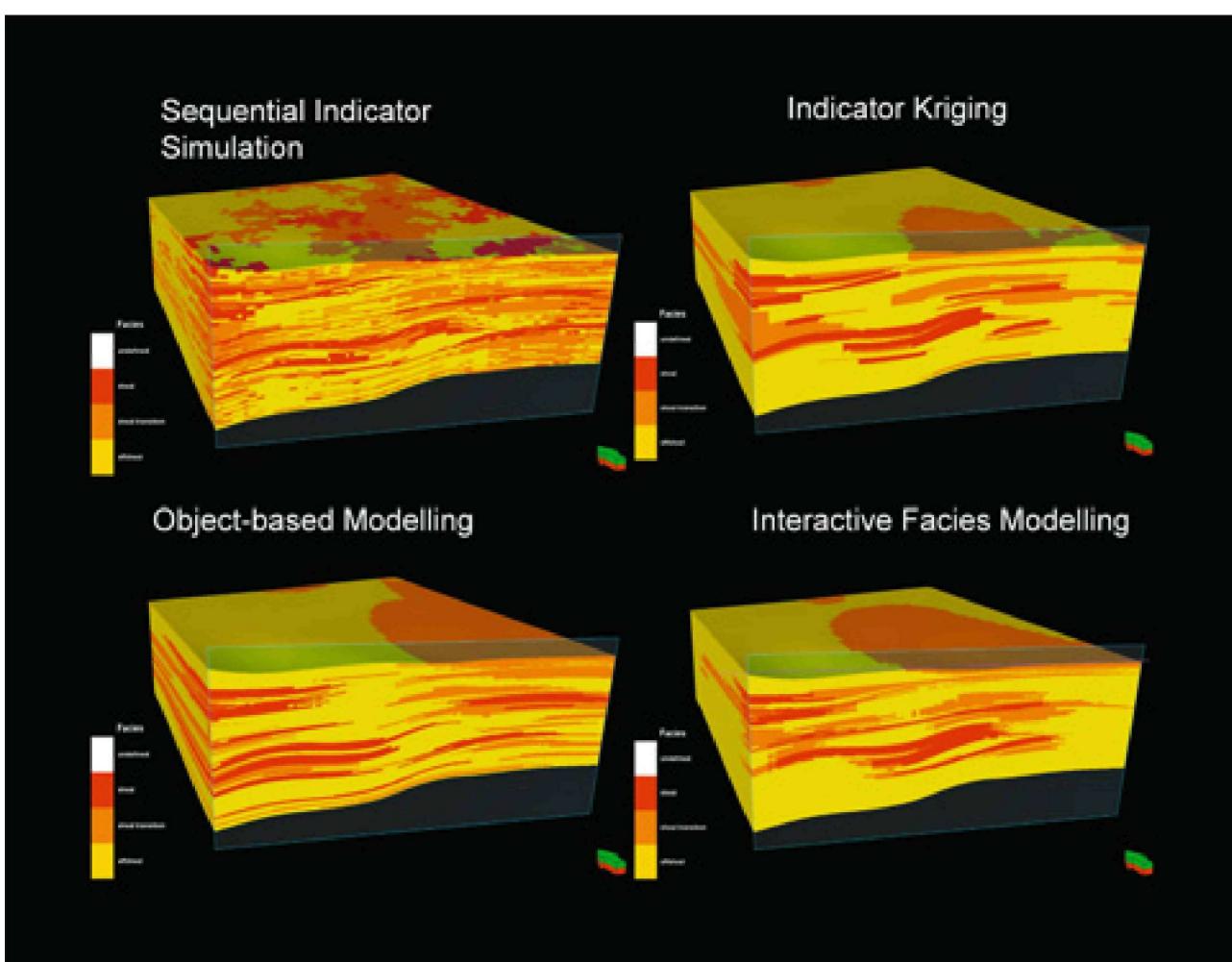


Рис. 4. Трехмерные фашиальные модели, полученные в результате различных стохастических (последовательное воспроизведение признака, объектно-ориентированное моделирование) и детерминистических (индикатор кригинг, интерактивное фашиальное моделирование) подходов.

сравнивались со стратиграфическим разрезом на рис. 3, разделяя 3D модель в тех местах, где стратиграфический разрез был построен вручную.

Стохастическое фациальное моделирование

- а) Последовательное индикаторное моделирование основано на вариограммах, представляющих размер и пространственное распределение фаций. Полевая съемка показала, что мелководные тела ракушечника простираются на 10-20 км с довольно плавными изменениями; соответственно, горизонтальный диапазон избран между 10-20 км. Был выбран гауссовский тип вариограмм из-за постепенных фациальных переходов. Провели несколько реализаций с повторяющейся стохастической процедурой. Получившиеся латеральные распределения (рис. 4) были все довольно схожи в модели, но имели рассеянный «неясный» вид, типичный для последовательного индикаторного моделирования. Основные стратиграфические и фациальные направления первоначального продвижения мелководных тел в сторону моря, потом в сторону суши и опять в сторону моря очень схожи со стратиграфическим разрезом, представленным на рис. 3.
- б) Объектно-ориентированное моделирование осуществляет реализацию геологических объектов с доступными геометрическими данными. Мелководные и переходные комплексы рассматривались как овальные объекты на фоне морских фаций. Данные геометрии мелководных отложений были получены преимущественно от картирования мелководных тел ракушечника (напр., Ruf and Aigner 2004) с шириной 5-15 км и длиной 10-25 км. Мелководные тела современный карбонатный структур в Персидском заливе имеют удивительно схожую ширину 11-13 км и длину 14-18 км (см. рис. 1 С). В отличие от последовательного индикаторного моделирования результирующие 3D модели имеют отдельные фациальные тела с резкими границами. Очевидна общая картина первоначального продвижения береговой линии в сторону моря, сменяющаяся продвижением в сторону суши и снова в сторону моря (рис. 4).

Детерминистическое фациальное моделирование

- а) Показатель кrigинга определяет подход для отдельных свойств, зависящих от изменения ячеек, определяя вариограммы и фракции для каждой отдельной фации. Были выбраны те же вариограммы, что и для процедуры последовательного индикаторного моделирования. Полученные 3D модели показывают такую же общую картину, как полученную в случае последовательного индикаторного моделирования, но отличаются более резкими, нежели «рассеянными» границами фаций (рис. 4).
- б) Интерактивное моделирование фаций: отдельные трехмерные тела были созданы, рисуя распределение фаций в каждой сотне слоев 3D сетки с помощью ручной интерполяции между измененными данными скважины, и ориентируясь на общее направление региональных фаций. Трехмерная модель, произведенная этой ручной, занимающей относительно мало времени, процедурой также показывает общую картину регрессии-трансгрессии-регрессии моря.

В изучаемом разрезе, это более похоже на результат работы, произведенный с помощью процесса автоматического индикатора кrigинга (рис. 4).

В общем, тестирование доступных методов показало, что последовательное индикаторное моделирование (стохастическое) и интерактивное фациальное моделирование (детерминистическое) дало самые реалистичные и сопоставимые результаты, основываясь на визуальном сравнении.

Петрофизический анализ

Измерение естественной гамма-радиации стен обнажений относилось к образцам в скважинах и осадочным фациям (рис. 2). Гамма-каротаж обнажений (Aigner и др., 1995) был осуществлен с применением портативных сцинтиляционных счетчиков (англ.-венгр. Electronics and Geofyzika). Расстояние между измерениями обычно равнялось 10 см, а период дискретизации 10 с каждый. Результаты представлены в единицах отсчета в секунду [cps].

Типы пористости согласно Choquette и Pray (1970) Lucia (1995, 1999) - их диагенетическое развитие, а также процессы цементации - были проанализированы в шлифах. Шестьсот пятьдесят отверстий были просверлены из образцов и керна, чтобы измерить пористость и проницаемость.

Петрофизические данные демонстрируют, что качество коллекторов не только зависит от типа фаций, а также от типа пористости, т.е. диагенеза (подробнее см. Braun, 2003). Поскольку ракушечник просто залегал на глубине 1 км, а затем постепенно выходил на поверхность, его диагенетическое развитие относительно простое; вероятно, оно более сложное в реальных, глубоко залегающих коллекторах гидрокарбоната. Следующие превалирующие образцы рассматривались:

- Образцы с несвязанной пористостью: $\phi = 2-12\%$ и $k \cdot h < 10$ мД. Этот петрофизический класс встречается главным образом в мелководных и переходных фациальных ассоциациях.
- Образцы с несвязанной и межзерновой пористостью: $\phi = 7-24\%$ и $k \cdot h$ между 8 и 400 мД. Этот петрофизический класс ограничен мелководной фациальной ассоциацией.
- Образцы с несвязанной и связанный пористостью: $\phi = 3-7\%$ и $k \cdot h = 1-20$ мД. Этот петрофизический класс не распространен в изучаемой области.

В общем, лучшие свойства коллектора обнаруживаются у мелководных фациальных ассоциаций (до 24% пористость, в среднем – 12%; до 400 мД проницаемость, в среднем – 60 мД) и в меньшей степени у переходных фациальных ассоциаций (до 20% пористость, в среднем – 8%; до 100 мД проницаемость, в среднем – 11 мД). Морские фациальные ассоциации имеют в целом плохие или очень плохие свойства коллекторов и обычно плотные.

Петрофизическое моделирование

Было протестировано множество вероятностей, чтобы смоделировать трехмерное распределение петрофизических свойств. Для всех моделей петрофизические данные, полученные из измерений на образцах, были изменены: для пористости использовалось среднее арифметическое, для проницаемости – среднее геометрическое.

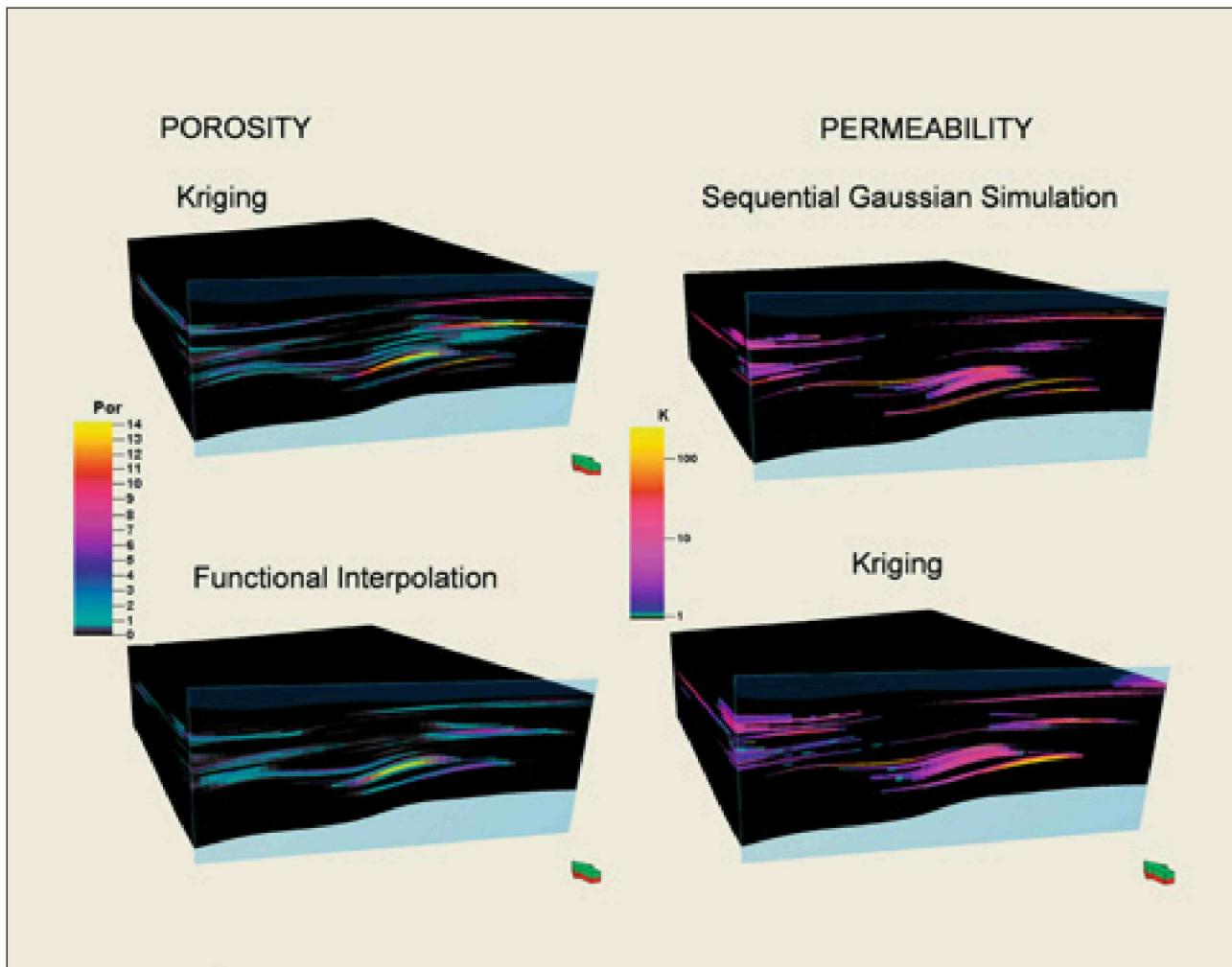


Рис. 5. Пetroфизические модели, показывающие распределение пористости и проницаемости, используя различные подходы моделирования.

Пetroфизическое моделирование определялось для фаций, потому что только мелководные и переходные фации имеют возможную продуктивность коллектора (см. выше). Поскольку морские фации показали в большей степени очень плохие качества коллектора, его значения пористости и проницаемости были установлены на ноль (мы сознаем, что это легкое упрощение). Ruf и Aigner (2004) и Kostic и Aigner (2004) демонстрировали, что петрофизические величины в отдельных мелководных телах имеют те же самые порядки значений свыше многих километров только с небольшими горизонтальными изменениями; таким образом, был выбран горизонтальный интервал 10 км. Для моделей проницаемости использовался ко-кригинг.

На рис. 5 показаны результаты некоторых моделей. Для моделирования пористости использование кригинга и алгоритма функциональной интерполяции привело к очень схожим и согласующимся результатам. Моделирование проницаемости показало самые непротиворечивые результаты при использовании последовательного моделирования Гаусса и кригинга.

Сравнение фаций, распределенных в пространстве, и петрофизических моделей (рис. 6) показывает, что качество коллекторов мелководных и переходных фаций различно. В первую очередь, это происходит из-за того,

что пористость в части мелководных фаций может быть увеличена выщелачиванием, давая вторичную пористость. Во-вторых, поровое пространство может быть уменьшено из-за частичной или полной цементации.

Выводы

- Изученное карбонатное тело, которое в предыдущих полевых исследованиях, было расценено как достаточно однородное тело, оказалось довольно сложного фациального строения. Различные фациальные типы могут быть разделены на 3 ассоциации: мелководные, переходные и морские. Самые подходящие условия для коллектора показывают мелководные фациальные ассоциации.
- Циклы метрового масштаба формируют самые маленькие стратиграфически коррелируемые единицы. Мелководные фации встречаются в верхних частях этих циклов. Суммарная картина этих мелкомасштабных циклов формирует крупномасштабные циклы регрессии-трансгрессии-регрессии моря.
- В пределах крупномасштабной регрессии наблюдалось систематическое увеличение количества, размера и толщины мелководных тел. Во время крупномасштабной

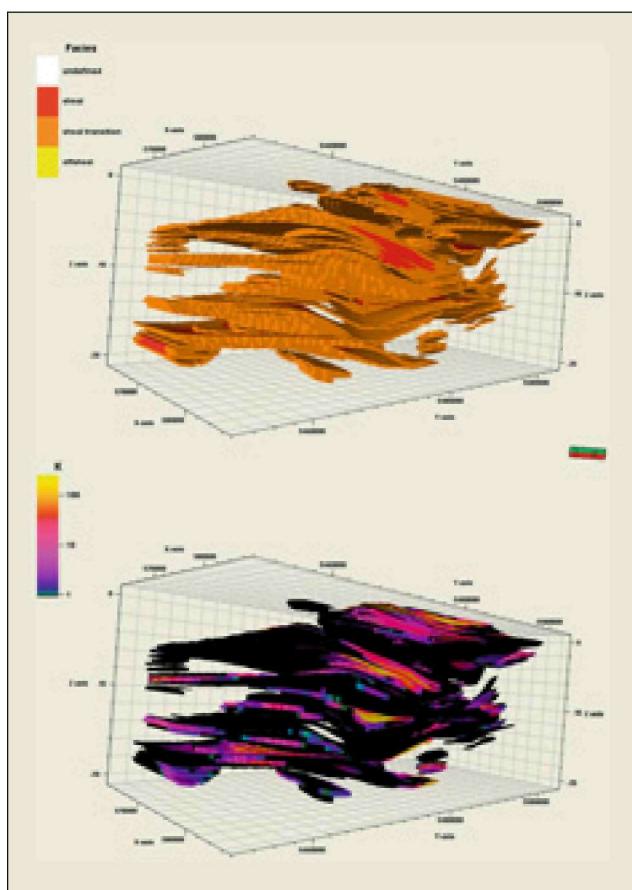


Рис. 6. Трехмерные модели мелководного комплекса, выбранные для мелководных и переходных фаций (использовали интерактивный алгоритм фациального моделирования, верхний рисунок) и для проницаемого интервала скважины Гаусса, нижний рисунок (использовали последовательное моделирование Гаусса, нижний рисунок). Отметим, что мелководные и переходные фации имеют различный потенциал коллекторов (из-за диагенетического уменьшения или увеличения порового пространства).

- трансгрессии мелководные тела уменьшаются в размерах. Эти тела имеют приблизительно овальную геометрию с шириной 5-15 км и длиной 10-25 км.
4. Данные обнажений использовались для 3D геологического моделирования, чтобы реконструировать трехмерное распределение фаций и петрофизических свойств мелководных коллекторов. Использовались различные стохастические и детерминистические подходы; вероятно, что последовательное индикаторное моделирование и интерактивное фациальное моделирование обеспечивают самые разумные результаты.
 5. Сравнение петрофизического и фациального моделей показывает различное качество коллектора мелководных и переходных фаций. Это происходит из-за фациальной изменчивости и диагенетических эффектов (увеличение пористости ранним диагенетическим выщелачиванием и уменьшающей пористость цементацией).

Вообще изучение аналогов обнажений, показанное здесь, предполагает, что потенциал коллектора, представленный мелководными телами, подчиняется систематическим правилам. Вероятно, они будут полезны для предсказания строения резервуара в преобладающих карбонатных структурах гидрокарбонатных провинций. Более того, количественные данные, предоставленные аналогами обнажений, могут быть полезны для построения

статических моделей коллекторов. В настоящий момент ведется более глубокое изучение моделирования (стратиграфически и палеогеографически) (Palermo и др., разрабатывается).

Благодарности

Части статьи, имеющие отношение к обнажениям, основаны на PhD диссертации S. Braun (2003), выполненной в ходе EMR проекта, спонсируемого Shell Research (2000-2002). Мы благодарим W. Blendinger, V. Hitchings и P. Wagner, а также Shell Exploration and Production за поддержку и разрешение на публикацию.

3D моделирование было сделано впоследствии T. Aigner под руководством W. Blendinger и D. Palermo. Мы выражаем благодарность A. Glocke и Schlumberger за доступ к программному обеспечению Petrel (TM Schlumberger) для 3D геологического моделирования. R. Gras пригласил нас представить на рассмотрение эту публикацию. Выражаем глубокую признательность комментариям рецензента A. Kayser, анонимному обозревателю и редактору журнала First Break M. Bacon.

Литература

- Aigner, T. [1985] *Storm depositional systems: Dynamic stratigraphy in modern and ancient shallow marine sequences*. Lecture Notes in Earth Sciences No. 3, Springer, Berlin.
- Aigner, T., Schauer, M., Junghans, W.-D., and Reinhardt, L. [1995] Outcrop gamma-ray logging and its applications: examples from the German Triassic. *Sediment. Geol.*, 100, 47-61.
- Aust, H. [1969] Lithologie, Geochemie und Palaontologie des Grenzbereiches Muschelkalk-Keuper in Franken. *Abh. Naturwiss. Ver. Wurzburg*, 10, 3-155.
- Borkhataria, R., Aigner, T., Poppelreiter, M.C., and Pipping, J.C.P. [2005] Characterisation of epeiric 'layer-cake' carbonate reservoirs, Upper Muschelkalk (Middle Triassic), The Netherlands, *J. Petrol. Geol.*, 28, 119-146. Borkhataria, R., Aigner, T. and Pipping, K. [2006] An unusual, muddy, epeiric carbonate reservoir: The Lower Muschelkalk (Middle Triassic) of the Netherlands. *AAPG Bull.*, 90, 61-89.
- Braun, S. [2003] *Quantitative analysis of carbonate sand-bodies: outcrop analog study from an epicontinental basin (Triassic, Germany)*, Diss., Univ. Tübingen, 93 pp.
- Choquette, P.W. and Pray, L.C. [1970] Geologic nomenclature and classification of porosity in carbonates. *Bull. AAPG*, 54, 2, 107-250.
- Drexler, P. [1964] *Der Quaderkalk im Hauptmuschelkalk Frankens (Eine geowissenschaftliche Studie)*, Diss., Univ. Wurzburg, 140 pp.
- Flint, St. and Bryant, I.D. (Eds.) [1993] *The geological modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogs*. IAS Special Publication No. 15, Blackwell Scientific Publications, London.
- Geyer, O.F. and Gwinner, M.P. [1991] *Geologie von Baden-Württemberg*, Schweizerbart, Stuttgart. Grötsch, J. and Mercadier, C. [1999] Integrated 3-D reservoir modeling based on 3-D seismic: The Tertiary Malampaya and Camago Buildups, offshore Palawan, Philippines. *AAPG Bull.*, 83, 1703-1728. Hagdorn, H. and Simon, T. [1988] *Geologie und Landschaft*

- des Hohenloher Landes. Jan Thorbecke Verlag, Sigmaringen, 88-94.
- Harris, P.M. and Kowalik, W.S. [1994] *Satellite images of carbonate depositional settings*. AAPG Methods in Exploration Series, No. 11, 147 pp.
- Hatzold, W. [1981] Zum Quaderkalk (Trias, mo) Frankens. *Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N.F.*, 63, Stuttgart, 211-217.
- Immenhauser, A., Hillgartner, H., Sattler, U., Bertotti, P., Schoepfer, P., Homewood, P., Vahrenkamp, V., Steuber, T., Masse, J.-P., Drost, H., Taal van Koppen, J., van der Kooij, B., van Bentum, E., Verwer, K., Hoogerdijk Strating, E., Swinkels, W., Peters, J., Immenhauser-Potthast, I., and Al Maskery, S. [2004] Barremian-lower Aptian Qishn Formation, Haushi-Huqf area, Oman: a new outcrop analogue for the Kharaib/Shu'aiba reservoirs. *Geoarabia*, 9, 153-194.
- Kerans, C. and Tinker, S. [1997] *Sequence Stratigraphy and Characterisation of Carbonate Reservoirs*. SEPM Short Course No. 40, Tulsa, 130 pp.
- Kostic, B. and Aigner, T. [2004] Sedimentary and poroperm anatomy of shoal-water carbonates (Muschelkalk, South German Basin). *Facies*, 50, 113-131.
- Kozur, H. [1974] *Biostratigraphie der germanischen Mitteltrias*. Freib. Forschungsh, C 280, 7-56.
- Lucia, F.J. [1995] Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterisation, *Bull. AAPG*, 79, 9, 1275-1300.
- Lucia, F.J. [1999] *Carbonate reservoir characterisation*. Springer, Berlin, 226 pp.
- Miall, A.D. and Tyler, N. [1991] *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implication for hydrocarbon discovery and recovery*. SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology, v. 3, 309 pp.
- Qi, L., Carr, T.R., and Goldstein, R.H. [2007] Geostatistical three-dimensional modeling of oolite shoals, St. Louis Limestone, southwest Kansas. *AAPG Bull.*, 91, 69-96.
- Ruf, M. and Aigner, T. [2004] Facies and poroperm characteristics of a carbonate shoal (Muschelkalk, South German Basin): a reservoir analogue investigation, *J. Petrol. Geol.*, 27, 215-239.
- Rutte, E. [1957] *Einführung in die Geologie von Unterfranken*. Laborarztverlag, Wurzburg, 168 pp.
- Schauer, M. and Aigner, T. [1997] Cycle stacking patterns, diagenesis and reservoir geology of peritidal dolostones, Trigonodus-Dolomit, Upper Muschelkalk (Middle Triassic, SW-Germany). *Facies*, 37, 99-114.
- Vollrath, A. [1955] Zur Stratigraphie des Hauptmuschelkalks in Baden-Württemberg. *Jh. Geol. L.-A. Baden-Württemberg*, 1, 79-168.
- Wagner, G. [1913] Beiträge zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte des Oberen Hauptmuschelkalks und der unteren Lettenkohle in Franken. *Geol. Paläont. Abh., N.F.*, b, 1-180.