

Численные модели обнажений аналогов нефтяных коллекторов: современные задачи

Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art

Дж. К. Прингл (J.K. Pringle),^{1*} Дж. А. Хоуэлл (J.A. Howell),² Д. Ходжетс (D. Hodgetts),³ А. Р. Вестерман (A.R Westerman)⁴ и Д. М. Ходжсон (D.M Hodgson)¹

Введение

Моделью коллектора в разрезе называется компьютерное представление его петрофизических параметров, таких как пористость, проницаемость, флюидонасыщенность и др. Поскольку результаты прямых измерений этих параметров имеются лишь для немногочисленных мест, в которых расположены скважины, необходимо уметь получать распределение этих параметров путем экстраполяции. Значения петрофизических параметров определяются в первую очередь геологией, поэтому при оценке качества и структуры коллектора центральным моментом является понимание фациального состава и распределения фаций. В основе большинства систем моделирования коллекторов, используемых при изучении разреза, лежит выделение зон коллекторов путем корреляции сейсмических границ. Далее, для выделения меньших, субсейсмических горизонтов и для определения параметров зоны на некоторой сетке ячеек привлекаются данные по скважинам. Одновременное определение положения субсейсмических границ и возможных геологических неоднородностей остается важной задачей. Более того, при типичных размерах ячеек 50–200 м в модель сложно включить мелкие неоднородности. Таким образом, необходимо использовать реальные значения как для опорных стратиграфических горизонтов, так и для распределения фаций внутри последних.

Изучение осадочных фаций – основа петрофизики. При этом современная сейсморазведка не позволяет выделять неоднородности масштаба фаций, а данные бурения не содержат (почти) сведений о пространственной геометрии за пределами ствола скважины. Результаты исследования современного осадконакопления указывают на возможную связь этих процессов с распределением фаций (напр., Kenyon et al., 1995); вместе с тем сохранность структуры отложений сильно зависит от изменений, происходящих в этих процессах с течением времени (Jervey, 1988). Лабораторные эксперименты (напр., Kneller & Buckee, 2000) и численное моделирование (напр., Aigner et al., 1989; Peakall et al., 2000) также показывают наличие связи между механизмом осадконакопления и фациальным составом. Масштаб таких моделей, однако, грубее, чем нужно для типичного месторождения, и больше подходит для обобщающих исследований (Nordhal et al., 2005; Ringrose et al., 2005).

Изучение обнажений уже давно используется при изучении аналогов коллекторов при выяснении строения нефтяных месторождений. (Collinson, 1970; Glennie, 1970;

Breed & Grow, 1979). Определив тип и историю осадконакопления в разрезе месторождения углеводородов, можно выявить в обнажениях подходящие аналоги (напр., Alexander, 1993). Подходящими аналогами являются те, которые геологически сходны с изучаемой системой, а также выходят на поверхность в виде объемной структуры на площади, достаточно большой, чтобы выявить неоднородности требуемого в данном исследовании масштаба (Clark & Pickering, 1996).

Изучение аналогов в обнажениях проводилось как на качественном, так, в последнее время, и на количественном уровне. Обычно количественные исследования (напр., Dreyer et al., 1993; Chapin et al., 1994; Bryant & Flint, 1993; Clark & Pickering, 1996; Reynolds, 1999) проводились для определения статистическими методами параметров модели между скважинами (Floris & Peersmann, 2002). Однако получить пригодные к использованию данные из результатов обычного изучения обнажений может быть затруднительно, особенно если эти данные нужно интегрировать в системы 3D визуализации для инженеров-нефтяников. Кроме того, обнажения, представленные эрозионными врезами в твердые породы, дают двумерную картину, а в тех редких случаях, когда есть несколько разрезов по различным направлениям, для понимания объемной картины и выделения трехмерных объектов все равно требуется геолог-эксперт. Для такой работы при компенсации факторов направления и размера могут понадобиться средства геостатистики (Geehan & Underwood, 1993; Vissa & Chessa, 2000), но в идеале данные должны быть получены в 3D виде. Точное восстановление 3D картины – единственный способ определения таких свойств как извилистость каналов, связность и непрерывность песчаных тел в трехмерном пространстве. Эти параметры являются ключевыми для добычи углеводородов, в том числе и для извлекаемости (Pringle et al., 2004a; Larue & Friedmann, 2005). Программы для 3D представления геологии обычно используются при моделировании залежей в разрезе. В этой работе будет

¹STRAT Group, Department of Earth & Ocean Sciences, University of Liverpool, 4 Brownlow Street, Liverpool, L69 3GP, UK.

²Centre for Integrated Petroleum Research, Bergen University, Bergen, N-5007, Norway.

³Basin and Stratigraphic Studies Group, School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, University of Manchester Manchester, M13 9PL, UK.

⁴Petroleum Engineering Institute, Heriot-Watt University, Edinburgh, EH14 4AS. UK. j.k.pringle@liv.ac.uk.

показано, как новые цифровые технологии получения данных помогают при интерпретации путем создания точных количественных наборов данных по аналогам коллекторов в обнажениях, и, возможно, при уточнении модели месторождения.

Способы сбора данных

Методики изучения аналогов осадочных коллекторов в обнажениях развивались от обычной геологической съемки и послойного описания обнажений (Varnes & Lisle, 2004) к измерениям на фотоснимках в масштабе (Argot et al., 1997) и к 3D реконструкции обнажения. При привязке профилей и мест отбора образцов произошел повсеместный переход от обычной триангуляции к ручным приемникам GPS (Bryant et al., 2000) и к современным интегрированным подходам, использующим все более широкий круг цифровых средств сбора данных. Современная техника позволяет быстро получать данные на обнажении с небывалой точностью по густой сети (см. Pringle et al., 2004b; McCaffrey et al., 2005). Далее приводится обзор современных средств цифрового сбора данных (табл. 1) и некоторые полевые примеры.

Способы создания цифровых поверхностей малого и среднего разрешения. Цифровая аэрофотограмметрия (Pringle et al., 2004b for detail) дает для сравнительно большой территории цифровую сетку местности, в которую можно включить данные других полевых методов (напр. описания разрезов, данные о палеоруслах, положения других объектов, важных для стратиграфии и тектоники). Методами фотограмметрии в полуавтоматическом режиме создается 3D цифровая модель местности (ЦММ; Digital Terrain Model – DTM), для чего используются стереопары из перекрывающихся аэрофотоснимков (АФС) и наземные контрольные точки. Например, на участке размером 8 x 12 км в районе Шампзор (Champsaur) во Французских Альпах на поверхность выходит серия шампзорских песчаников (Gres du Champsaur) – отложений мутьевых потоков олигоценового возраста. Для создания ЦММ с разрешением 4 м, с верной передачей углов и с цветовыми заливками (рис.1) потребовалось 14 АФС масштаба 1:17,000 и несколько наземных контрольных точек. По этой модели, на создание которой ушло несколько дней, можно быстро и без выезда на место проследить основные элементы стратиграфии и тектоники. Положение выделенных границ поздне подтверждилось при детальных полевых работах. В ЦММ были интегрированы данные о строении и составе разреза (Brunt, 2003). ЦММ создавалась с помощью стандартных программ моделирования месторождений, поэтому ее можно непосредственно сравнить с моделями разреза. В дальнейшем модель можно дополнить другими цифровыми данными и/или использовать в ходе «виртуальных выходов в поле». Главным недостатком цифровой аэрофотограмметрии является разрешение, обычно недостаточно высокое для детального изучения обнажений (табл. 1). Кроме того, этим методом плохо выделяются детали на крутых склонах.

В ходе полевых работ запись данных в единых координатах хуз можно осуществлять с использованием приемников GPS. До недавнего времени ручные приемники давали относительно невысокую точность, особенно по высоте. Новые разработки – системы поправок WAAS (США), EGNOS (Европа) и MSAS (Япония) –

позволили улучшить спутниковый сигнал, что значительно (до 1-5 м) улучшило точность привязки в плане (см. <http://www.esa.int/esaNA/egnos.html>; www.tracklogs.co.uk) и повысило эффективность простых недорогих ручных приемников. Следует отметить, что точность по высоте все еще низка (обычно хуже 10 м). Это, однако, не является большой проблемой при создании ЦММ (например, такой, как ЦММ района Шампзор с разрешением 4 м – рис. 1) или если при построении модели используются данные по стратиграфии, а не высоты (см. ниже). Большой точности можно добиться, используя дифференциальные GPS (dGPS), в которых базовый приемник остается на одной опорной точке на протяжении всей съемки. Дрейф базовой станции вычитается из данных полевого приемника. Поправки dGPS могут вводиться в ходе работы по радиоканалу (real-time kinematic – RTK) или при камеральной обработке. Эти методы позволяют очень точно (0.05-0.1 м в зависимости от условий в районе работ и положения спутников) определять положение на местности.

Новое поколение двухчастотных (L1 и L2) систем dGPS с RTK позволяет выполнять измерения с миллиметровой (после обработки) точностью и получать отсчеты непрерывно в реальном времени, через заданные интервалы времени или расстояния и/или в заданных точках. Так, на участке размером 20x40 км в районе Танквя (Tanqua Depocenter) в юго-западной части бассейна Кару (Karoo), ЮАР, в составе формации Скорстенберга (Skoorsteenberg Formation) пермского возраста мощностью 400 м на поверхность выходят пять богатых песками погребенных речных дельт (Hodgetts et al., 2004). Основные стратиграфические (кровля и подошва дельтовых отложений) и тектонические (разломы) элементы были привязаны с помощью dGPS с RTK в ходе пешеходной съемки с большими (более 10 км в день переходами). Координаты точек после обработки, наряду с описанием пород и данными бурения, были включены в детальные цифровые геологические (стратиграфическую и тектоническую) модели (Hodgetts et al., 2004),

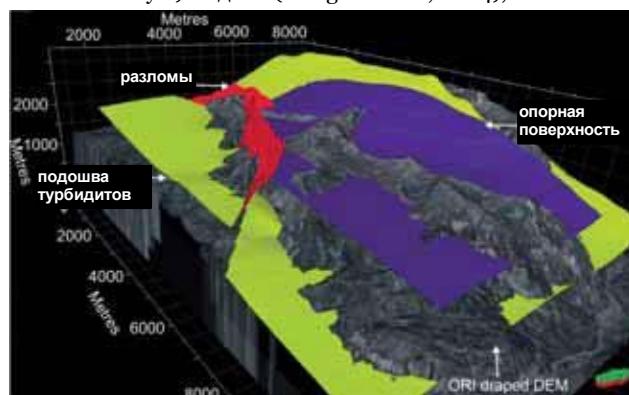


Рис. 1. Цифровая модель обнажения песчаников Шампзорского турбидитового суббассейна (олигоцен) на юго-западе Франции по данным цифровой аэрофотограмметрии. По стереопарам АФС и наземным контрольным точкам построена точная ЦММ с детальной текстурной заливкой. При проверке ЦММ по ней выделен ряд опорных горизонтов, подтвержденных дальнейшими полевыми работами.

основанные на хорошем понимании истории геологического развития, фациального состава и строения песчаных тел пространстве (Hodgson et al., 2005) (рис. 2). Детальная наземная съемка была необходима, поскольку стратиграфические границы были нечеткими, и их нельзя было выделить дистанционными методами (например, по АФС). Исследование структуры осадков, например,

выявление эрозионных поверхностей русел и замер пластов песков и сланцев, также включали привязку с помощью dGPS с RTK и полное описание обнажений. Данные по геометрии можно затем использовать при создании статистической модели свойств.

Все типы систем GPS требуют, чтобы спутники находились в прямой видимости от приемника. Обычно приемлемая погрешность достигается, если видно не менее

Способ получения цифровых данных	Типичная точность	Область применения	Преимущества	Недостатки	Затраты
Цифровая аэрофотограмметрия	~5-25 м	Картирование в мелком масштабе и создание опорных ЦММ	Быстрый (минуты) сбор данных, покрывает большие площади, быстрое (дни) дистанционное картирование	Медленная (дни) обработка, сравнительно низкое (на крутых склонах – плохое) разрешение	Высокие, если нужно проведение работ, дешево, если снимки уже есть
Наземная цифровая фотограмметрия	~0.1-0.5 м	Детальные исследования фаций на обнажениях	Быстрый (минуты) сбор данных, можно уменьшить детальность полевых работ	Среднее (дни) время обработки и интерпретации	Относительно дешево £600
Измерения на фотоснимках	~0.2 м	Быстрое определение мощностей фаций и положения границ на крутых склонах	Быстрый (минуты) сбор данных, быстрая (часы) обработка и создание модели	Подвержено фотографическим искажениям, низкое разрешение	Очень дешево £300
Ручные GPS	~1-5 м	Привязка точек отбора образцов и региональное картирование	Мгновенное определение положения	Значительные (до 30 м) ошибки по высоте	Очень дешево £150
dGPS с RTK	Точнее 10 мм	Сбор образцов, исследование обнажений, точная привязка точек	Мгновенное определение положения позволяет «пройти» по целевым границам, среднее (1 день) время обработки	Невозможно на крутых склонах	Дорого £20ks+
Тахеометрия	3 мм на расстоянии 200 м	Сбор образцов, исследование обнажений, лучше для слоистого разреза	Мгновенное определение положения, получение данных с крутых склонов	Медленный сбор данных, данные dGPS нужно переводить в географические координаты	Умеренно дорого £2k
Лазерный дальномер (LIDAR)	5 мм на расстоянии 200 м	Очень быстрая топографическая съемка рельефа обнажения	Сравнительно быстрый (минуты) сбор данных	Длительная (дни) обработка	Дорого £100k
Данные бурения	1 мм (по керну)	Бурение для прослеживания горизонтов в пространстве	Данные высокого разрешения можно сравнивать с данными по обнажению и с картажем на месторождении	Очень медленный (недели) сбор, обработка и интерпретация (тоже недели)	Очень дорого £200k +
Малоглубинная геофизика (здесь – георадар)	~0.1-0.5 м	Прослеживание коррелируемых горизонтов в пространстве	Позволяет получать 3D данные вне обнажения	Медленный сбор (дни) и обработка (тоже дни), применим при определенных условиях	Умеренно дорого £30k

Табл. 1 Сопоставление рассмотренных методов получения цифровых данных на обнажениях (по McCaffrey et al., 2005, с изменениями).

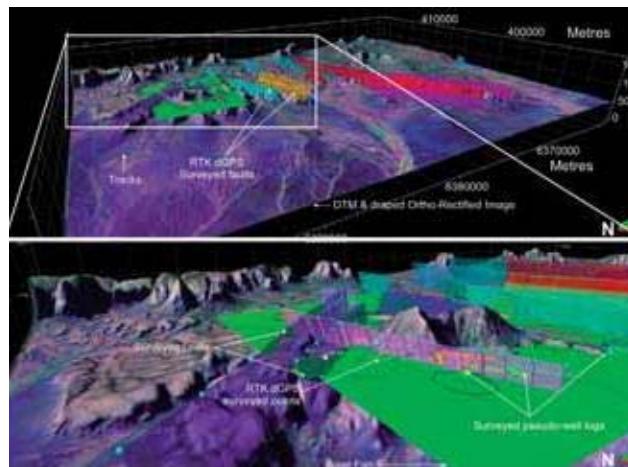


Рис. 2. Данные для построения цифровой модели обнажения подводных конусов выноса пермского возраста в районе Танква, юго-запад бассейна Кару, ЮАР. Построены точные 3D геологические модели подошвы системы конусов. Данные включали: ЦММ, данные спутниковой привязки (dGPS с RTK) опорных горизонтов и разломов, описания разрезов (подробнее см. Hodgetts *et al.*, 2004).

пяти спутников. В некоторых системах dGPS с RTK имеются промежуточные ретрансляторы радиосигнала, что увеличивает радиус действия базовой станции и, тем самым, сокращает число перемещений опорной станции. В скором будущем, с вводом новых частот передачи данных L2C и L5 в системах GPS (США) и в будущей европейской GALILEO, точность измерений еще возрастет.

Несмотря на все преимущества, точность привязки GPS резко снижается в таких местах, как глубокие ущелья

окрестности больших скал и леса, где видимость неба ограничена. Современные системы dGPS не регистрируют точки с большими погрешностями (обычно более ± 0.2 м), хотя их можно было бы отбросить и потом, при обработке. Трудные участки можно отснять обычным способом с лазерными дальномерами или тахеометрами. Эти методы, особенно тахеометрия, полезны также при получении цифровых данных с недоступных обнажений. Обычные съемки проходят медленно, при этом необходим перевод данных GPS в географические координаты. Некоторые dGPS с RTK снабжены лазерными приборами, позволяющими определять координаты в местах, где нет спутникового покрытия.

Если точность менее важна, чем скорость и объем данных (табл. 1), можно применять развивающуюся в последнее время наземную фотограмметрию. В этом методе используются цифровые снимки высокого разрешения, снятые с разных позиций, калибруемые по результатам нескольких измерений на местности. Снимки стыкуются, образуя точные (до 0.1 м) цветные цифровые модели поверхности. Например, на участке размером 100x40 м в Суэцком заливе выходят осадочные породы формации Нуухл третичного возраста, представленные чередованием отложений русел и равнин приливной зоны. Количественные данные по изменению мощностей и геометрии русел позволяют оценить соотношение ширины и мощности интервалов чередования. С расстояния 10–50 м было сделано около 200 цифровых снимков обнажения; далее программным образом было отобрано 20 снимков, из которых сформировалась цифровая модель поверхности (рис. 3). После привязки в географических координатах модель использовалась как для получения цифровых данных, так и в качестве подосновы для привязки полевых данных (цифровых описаний разрезов, данных о палеоруслах, соотношениях пластов и др.). Полученный интегрированный набор данных был использован при построении по данным на обнажении модели коллектора.

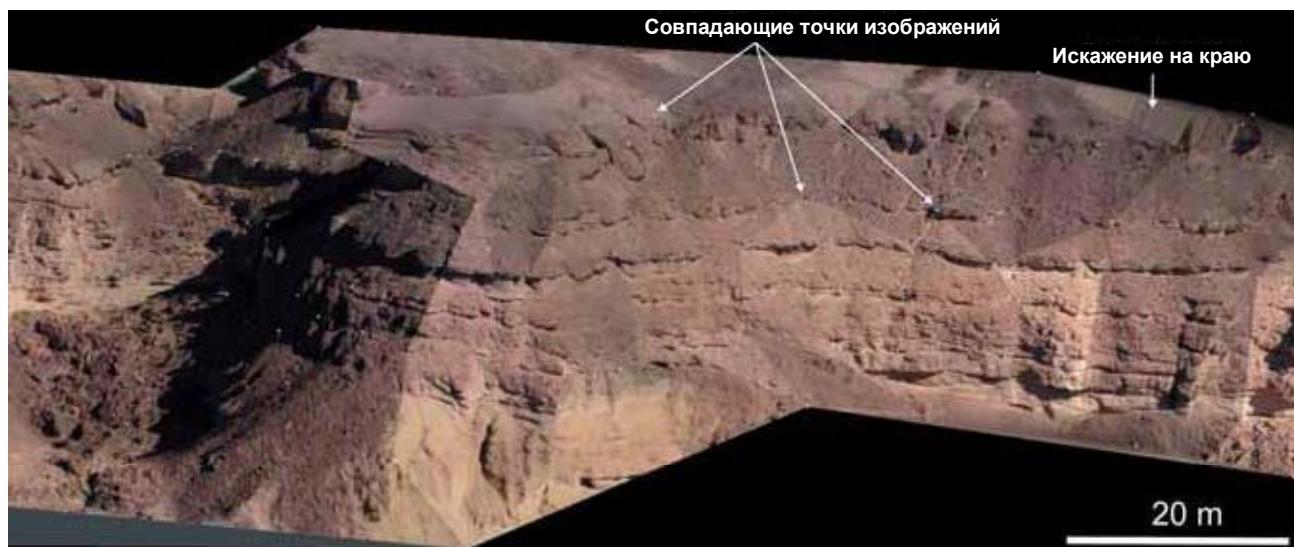


Рис. 3. Цифровая модель поверхности третичных отложений приливных равнин и русловых отложений формации Нуухл, Суэцкий залив, Египет. При построении ЦММ и текстурной заливки с помощью соответствующих программ объединено по контрольным точкам (см. рис.) и исправлено за краевые эффекты 20 фотоснимков с расстояния 10–50 м. Полученная модель стала основой, на которую выносились данные других методов.

Высокотехнологичные методы создания цифровых моделей поверхности

Среди внедряемой в настоящее время аппаратуры для съемки на обнажениях с малого расстояния наибольшее распространение получают наземные лазерные дальномеры лидары (LIDAR – Light Detection and Ranging) или лазерные сканеры. Они позволяют с расстояния до 1 км очень быстро получить пространственные (xyz) координаты большого количества точек на обнажении. Объемы данных велики (до 12000 точек в секунду), а точность высока (лучше 5 мм в оптимальных условиях) (табл. 1). Обычно на каждом обнажении проводится несколько сканирований с различных точек, что позволяет полностью покрыть неровную поверхность обнажения. Окончательные наборы полевых данных могут включать свыше 10 млн. точек (при расстоянии между ними около 1 см) для площади 50х100 м. Координаты точек при обработке можно пересчитать в географические, если есть точные привязки нескольких опорных точек площади и/или положений лидара. В последних моделях лазерных дальномеров, снабженных встроенными высококачественными цифровыми камерами, каждой точке соответствует значение интенсивности отраженного сигнала (зависящее от расстояния до точки отражения и отражающей способности этой точки). Полученные изображения используются для придачи каждой точке данных цветового кода в цветовой модели RGB, что дает результат почти фотографического качества. Если цифровые снимки имеют большее разрешение, чем облако точек, по облаку путем триангуляции строится поверхность, на которую накладывается исправленная за оптические аберрации фототекстура. Пиксели текстуры успешно заполняют все разрывы облака точек. Полученная таким образом модель поверхности остается по-прежнему точной и гибкой, занимает существенно меньше (обычно – более чем в 20 раз) места по сравнению с исходными наборами данных.

Имеется опыт использования лазерных дальномеров при съемке на обнажениях как в сравнительно мелком масштабе при исследовании стратиграфии (Bellian et al., 2005), так и в крупном масштабе при картировании разломов и трещин (Clegg et al., 2005). В районе Мам Тор (Mam Tor), графство Дербишир, Англия, на выходе турбидитных песчаников гритской (Grit) угленосных сланцев размером 500х100 м съемка лазерным дальномером проведена с одного положения прибора на расстоянии около 150 м от обнажения. В ходе съемки за 7 мин получены данные в 1.4 млн. точек (рис. 4). Облако точек было развернуто так, чтобы луч зрения шел вдоль напластования, после чего было определено пространственное положение границ различных отложений и измерены ширина и мощность пластов.

В настоящее время пространственное положение линий определяется непосредственно по облаку точек. Далее участкам поверхности с определенной текстурой приписывается литологическая содержание, которое затем заверяется при полевых работах. Размер исходных наборов данных столь велик, что их визуализация и работа с ними затруднена даже на мощных компьютерах. Преобразование облака точек в набор поверхностей, который легче анализировать и переводить в удобные для использования форматы, занимает обычно несколько дней (Bellian et al., 2005).



Рис. 4. Цветное (RGB) изображение данных лазерного сканирования угленосных сланцев формации Грит на участке Мам Тор в Дербишире, Англия. Обозначено положение сканера. На врезке показано положение отдельных точек и их цвета (см. в тексте). По этим данным определено положение границ осадочного разреза.

Появившиеся недавно авиационные системы лазерных дальномеров позволяют регистрировать полный отраженный сигнал (форму и амплитуду). Ранее регистрировались только начало и конец отраженного импульса. Дополнительная информация оказалась полезной при дистанционном выделении объектов, например – различных пород деревьев, и после доработки соответствующих систем может быть использована при полуавтоматическом выделении границ и состава пород в обнажении.

Результатом применения всех детальных методов является цифровая модель поверхности обнажения, из которой можно извлечь важные геостатистические данные. Но строго трехмерную модель обнажения можно получить только с привлечением данных о разрезе.

Высокотехнологичные методы малоглубинной геофизики
Бурение на малую глубину для уточнения изменений геологического строения в пространстве проводится лишь в некоторых случаях (Browne & Slatt, 2002; Pickering & Corregidor, 2005; Hodgson et al., 2005). Такие данные используют для уточнения соотношения между данными по обнажению и по разрезу и для прямого сравнения данных, обычно доступных на месторождениях (керн, данные каротажа и т. п.), с данными по обнажению. Так, в ходе детальных работ на обнажении в районе Танквэ (Hodgson et al., 2005) по семи скважинам было получено в общей сложности 1274 м керна и проведен полный комплекс каротажа (включая индукционный). Однако, несмотря на высокое разрешение, эти данные не дают непосредственного представления о пространственной структуре осадочных отложений

Преимущество высокоразрешающих методов малоглубинной геофизики состоит в том, что они допускают, при благоприятных условиях, обследование сравнительно больших площадей (табл. 1), и эти данные можно включить в состав цифровых моделей поверхностей. Были попытки ставить на обнажениях малоглубинную сейсморазведку, но, как правило, без особого успеха, что

связано, в основном, с сильной цементацией осадков, приводящей к малым контрастам акустического импеданса различных горизонтов осадочных пород (Coleman et al., 2000). Обычно маломощные горизонты неразличимы в данных малоглубинной сейсморазведки. Однако георадиолокация (ГРЛ), использующая частоты, на порядки более высокие, чем малоглубинная сейсморазведка (100-1000 МГц против 1-200 Гц соответственно). Применение высоких частот увеличивает разрешение (выделяются пласты мощностью, в зависимости от частоты, 0.1-0.5 м). В методе ГРЛ отражение определяется контрастом электромагнитных свойств на литологических границах, а не акустическим импедансом среды. ГРЛ все шире применяется при работах на обнажениях, для получения данных высокого разрешения по строению верхней части разреза (Young et al., 2003; Jol et al., 2003; Staggs et al., 2003; Pringle et al., 2003). Для сопоставления осадочных горизонтов, выделенных по данным ГРЛ, с сейсмическими отражающими границами в разрезе в настоящее время используют блок-диаграммы (Bristow et al., 2000). Кроме того, в данных ГРЛ на крутых склонах (вертикальное радарное профилирование - ВРП), можно установить прямое соответствие радарных отражений и наблюдаемых в склоне горизонтов (Pringle et al., 2004a). Подобно ВСП в сейсморазведке, ВРП позволяет определить скоростной закон и выявить кратные волны.

В разрезе угленосной формации Росс, выходящей в скальных обрывах на западном побережье Ирландии, отмечаются сланцевидные турбидитные песчаники и небольшие (50-300 м) русла, заполненные разнородным материалом (рис. 5). Условия на участке идеально подходят для применения ГРЛ, поскольку, мощность перекрывающих отложений мала, целевые горизонты находятся на сравнительно малых (менее 10 м) глубинах, а контраст диэлектрической проницаемости русловых отложений (объекта поиска) и сланцевидных песчаников высок (Pringle et al., 2003). На участке «Мост Росса» (Bridges of Ross), расположеннем между двумя обрывами, получены 3D данные ГРЛ с высоким разрешением (рис. 5),

по которым выделяются неоднородные русловые отложения. В ходе интерпретации в пространстве прослежены пласти залегающих с разрывами сланцев и наклонно залегающих конгломератов с глинистым цементом, что позволило создать локальные модели русловых отложений, использованные затем при задании параметров турбидитных коллекторов в модели залежи.

В современных георадарах используются антенны с фиксированной центральной частотой; на более низких частотах глубина выше, но разрешение ниже. В работах на участке «Мост Росса» применялась антенна с центральной частотой 450 МГц, что позволило достичь разрешающей способности 0.1 м и глубинности 5 м. Появление в последнее время многочастотных георадаров со встроенными dGPS с RTK весьма повышает производительность метода, хотя длительность полевых работ остается значительной: в ходе работ на «Мосту Росса», только на работы ГРЛ ушло восемь полевых дней.

Сведение и анализ данных, построение модели

Полученные разнородные цифровые данные нужно обработать, свести воедино и проанализировать. Среди данных могут быть 1D описания разрезов обнажений и каротажные диаграммы, 2D фотоснимки и разрезы (все с топографической привязкой); 3D данные, в том числе координаты точек по GPS или dGPS с RTK; результаты цифровой аэро- и/или наземной фотограмметрии; облака точек и поверхности с текстурной заливкой по данным лазерного сканирования и данные малоглубинной геофизики в виде каротажных диаграмм и/или наземных данных и горизонтов, выделенных по ним. Для объединения 1D, 2D, и 3D данных по обнажениям и по разрезу, больше всего пригодны программы моделирования коллекторов в разрезе. Они позволяют также прямую связь с геологами и инженерами-эксплуатационщиками. После обработки, данные можно импортировать в специализированные программы в виде псевдокаротажных кривых (описания разрезов), наборов точек (поверхности и разломы), многоугольников (разломы) или поверхностей с текстурной заливкой. С данными ГРЛ (в формате SEG-Y) можно обращаться так же, как с данными сейсморазведки. В работе (Pringle et al., 2004a) подробно говорится о примере таких работ комплексе наземных и малоглубинных методов на участке Элпорт Каслз (Alport Castles) в графстве Дербишир, Англия. На участке размером 400x50 м на поверхность выходят угленосные сланцевидные турбидиты и русловые отложения, представленные песчаниками. На участке проведены детальная геологическая съемка и фотограмметрия; выполнены также работы методом ГРЛ. Далее с помощью стандартной программы моделирования коллекторов все цифровые данные были сведены в единую цифровую модель (рис. 6). Были установлены строение осадков, соотношение фаций, геостатистические характеристики пластов; последующее уточнение модели залежи показало, что при использовании только 2D наборов данных происходит занижение связности пор и завышение извилистости (Pringle et al., 2004a).

Чтобы лучше представить воздействие строения осадков на течение жидкости в коллекторе, можно средствами программ моделирования залежей дополнить виртуальную модель обнажения петрофизическими параметрами фаций и результатами моделирования движения жидкости. Так, при составлении модели обнажения двух дельтовых систем мелового возраста в

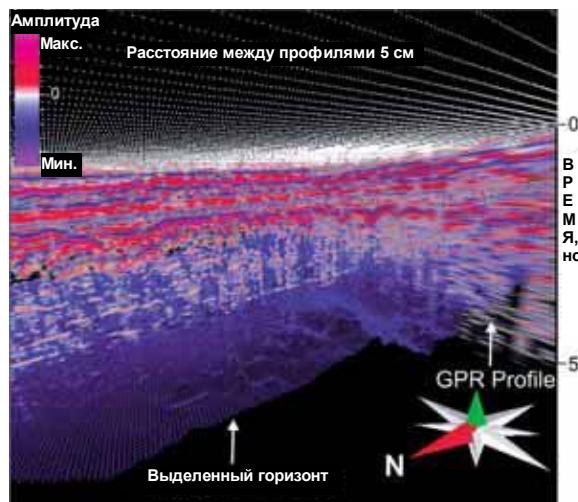


Рис. 5. Псевдотрехмерные данные ГРЛ высокого разрешения на угленосных породах формации Росс (участок «Мост Росса», графство Клер, запад Ирландии). По этим данным установлено пространственное положение неоднородных турбидитных русловых отложений в объеме между двумя крутыми склонами (подробнее см. Pringle et al., 2003).

штате Юта, США, рассматривалось влияние наклонных клиноформ на течение жидкости (рис. 7). По фотоснимкам в масштабе были получены псевдокаротажные диаграммы, которые затем загружались в систему моделирования. Диаграммы применялись для создания ряда детерминистских моделей разреза, в которых каждой фации сопоставлялись свои петрофизические параметры. Далее, в целях изучения некоторых свойств, например, влияния клиноформ на течение, вариантов моделей клиноформ, сравнения продуктивности верхней и нижней делт и связи направления движения жидкости с ориентацией клиноформ, для этих моделей проводилось моделирование течения жидкости (Howell et al., в печати). Способы добычи и петрофизические свойства во всех моделях были одинаковы, поэтому результаты моделирования течения жидкости стали прямой мерой неоднородности.

После построения цифровой модели обнажения для определения параметров первоначального строения отложений, которые можно использовать в моделях залежей или сравнивать с данными по другим обнажениям, может потребоваться снятие деформаций слоев. Кроме того, проводя моделирование осадочных отложений с учетом фактического положения границ, можно значительно снизить потребность в таком снятии. Так, при изучении среднеэоценового турбидитного бассейна Аинза (Ainsa) на юге Пиренеев в Испании, проводилось цифровое картирование, по данным которого были построены 3D модели границ разреза (рис. 8), а затем с помощью стандартных программ восстановлен первоначальный разрез осадков (Fernandez et al., 2004). Далее по этим данным были построены детальные модели коллекторов, по которым потом строились зоны высокого разрешения, причем для задания параметров модели использовались данные о фациальном составе (рис. 9).

Сложности и недостатки цифровой съемки и виртуальных моделей

Как показывают приведенные примеры, все рассмотренные способы цифровой съемки, в зависимости от задач, размеров обнажения, длительности полевых работ и др., имеют свои преимущества и недостатки (табл. 1). Важной задачей является интеграция данных разных методов. Например, по данным цифровой аэрофотограмметрии можно построить ЦММ в масштабе от локального до регионального, по которой затем выделять основные стратиграфические горизонты и структуры, но разрешение этой модели будет низким,

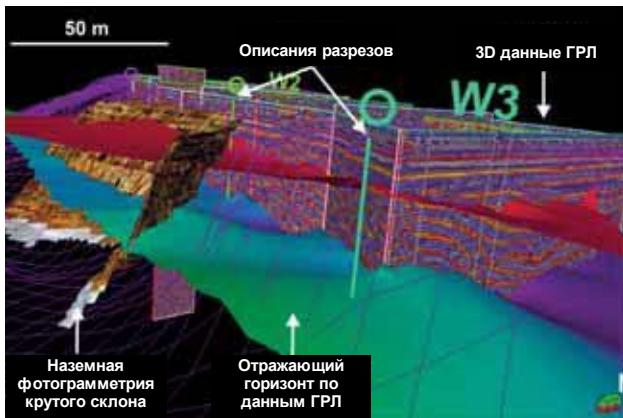


Рис. 6. Цифровая модель угленосных сланцев формации Грит на участке Элпорт Каслз в Дербишире, Англия. Определено пространственное положение пластовых и русловых отложений, представленных турбидитными песчаниками. При составлении модели использованы данные аэро- и наземной фотограмметрии, 3D ГРЛ, описания разрезов, измерения на фотоснимках и данные топографической привязки. По (Pringle et al., 2004b).

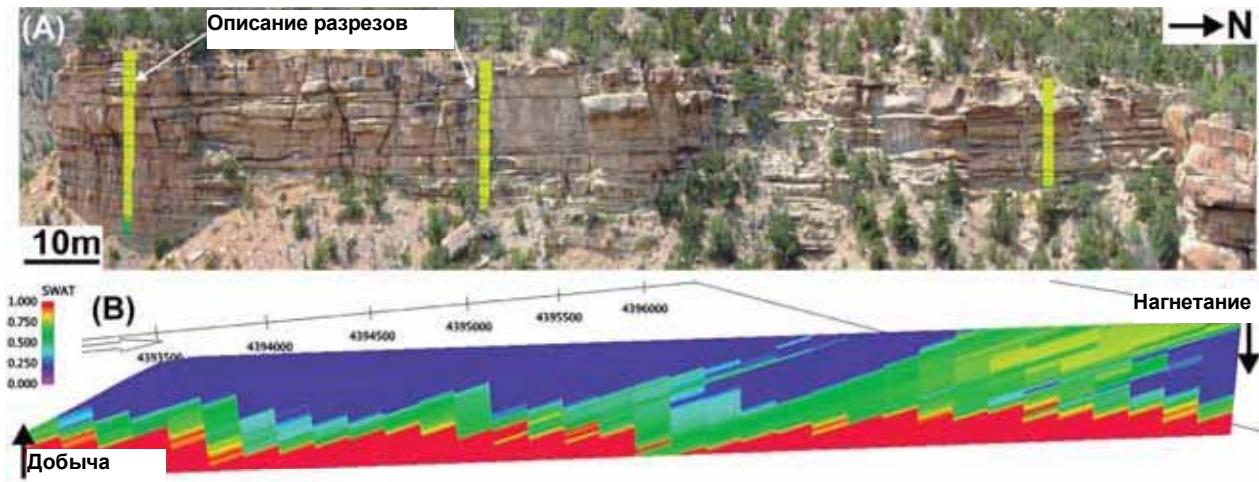


Рис.7. Модели обнажения и коллектора с потоком жидкости на участке «Язык пантеры» («Panther Tongue») в Кийкских скалах, шт. Юта, США. (A) Дельтовые песчаники мощностью 25 м залегают моноклинально и выклиниваются к югу. Описание разреза использовано при построении модели коллектора. (B) Разрез 3D модели залежи с результатами моделирования движения жидкости. Показана водонасыщенность через 10 лет эксплуатации с нагнетанием воды. Заметно, что поток контролируется клиноформами. Такие модели позволяют инженерам по эксплуатации взаимодействовать с геологами и изучать влияние строение отдельных песчаных тел на движение жидкости (Howell et al., в печати).

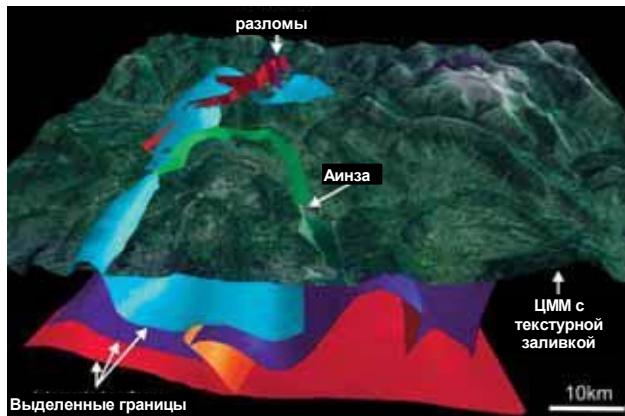


Рис. 8. На результаты аэрофотограмметрии над турбидитными отложениями эоцен на севере Испании наложены данные обычной геологической съемки. Результат использован для прослеживания опорных горизонтов и выделения структур (подробнее см. Fernandez et al., 2004).

а крутые склоны не будут видны. Наземная фотограмметрия производительна в поле, но требует значительной обработки данных и подвержена влиянию краевых эффектов. Привязка системами dGPS с RTK может быть весьма полезна при заверке результатов фотограмметрии и при детальных работах на обнажении, но обработка занимает много времени, а работа вблизи крутых склонов невозможна из-за плохого спутникового покрытия. Обычная геологическая съемка может дать точные данные по обнажению в склоне, но требует больших трудозатрат. Наземное лазерное сканирование позволяет очень быстро получать точные данные по большому числу густо расположенных точек, но объемы данных столь велики, что их трудно обрабатывать, визуализировать и извлекать из них нужные данные.

На создание виртуальных моделей по данным съемки на обнажении или дистанционных методов требуется много времени, и оно будет потрачено впустую, если разрешение итоговой модели недостаточно для решения поставленной задачи. Точность виртуальной модели соответствует точности входных данных, чтобы создать модель, близкую к реальности, нужно проведение полевых работ в больших объемах. Если нужно миллиметровое разрешение, может потребоваться лазерное сканирование с малого расстояния. Наоборот, если нужно метровое разрешение, подойдет метод измерений на фотоснимках. Виртуальные модели помогают геологу при интерпретации данных по коллектору, а не заменяют интерпретацию. Кроме того, некоторые типы программ для интеграции данных только визуализируют данные, но не имеют средств извлечения подмножеств данных.

Направления работы и задачи будущего

В будущем развитие компьютерной техники, полевого оборудования и программного обеспечения существенно изменит процесс сбора данных, как по залежам, так и по обнажениям. С углублением технического прогресса 3D станет стандартной полевой процедурой. Возрастет точность систем dGPS с RTK, их устойчивость к помехам, появится возможность прямой передачи данных на удаленный компьютер и их обработки в реальном времени. Оборудование для лазерного сканирования станет легче и

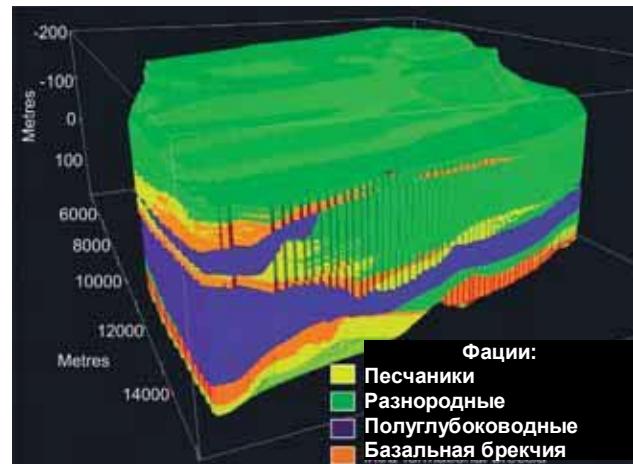


Рис.9. По цифровой модели рис. 8 восстановлены структуры и построена 3D модель залежи с параметрами, определенными по данным о обнажения Аинза.

удобнее для работы в поле, появятся полуавтоматические системы определения литологического состава. Развитие программных средств упростит прямой импорт цифровых данных и их анализ. Совершенствование георадаров ускорит проведение полевых работ на обнажениях и обработку данных, и получение полностью 3D наборов данных станет стандартом (Figure 10). Разнообразные данные по обнажениям, включенные в региональную модель, можно будет сравнивать с данными по коллекторам, что позволит улучшить качество данных, используемых при создании моделей залежей и оценить достоверность этих моделей (рис. 10). Изменится сам подход к изучению аналогов

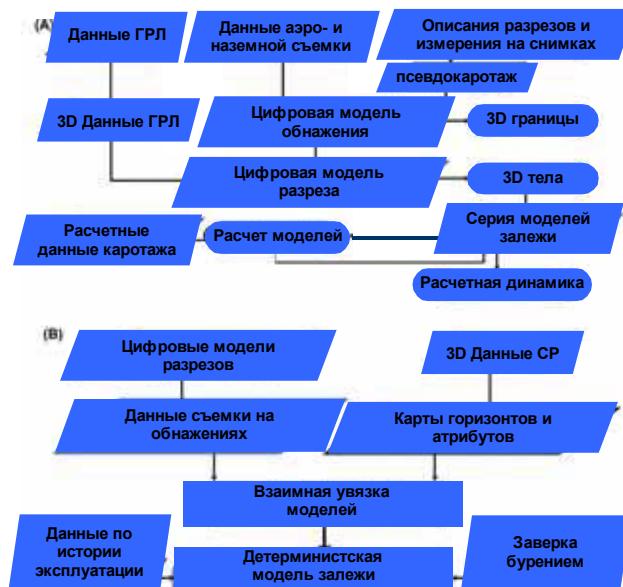


Рис. 10. Упрощенный порядок создания и заверки виртуальных моделей обнажений (A) и проект сопоставления разнородных данных по обнажению и данных сейсморазведки для снижения недостоверности моделей залежей.

коллекторов в обнажениях, в котором будут использоваться параметры, статистически определенные во многих точках. Разрешающая способность 3D сейсморазведки достигнет уровня мелкомасштабных работ на обнажениях, появится возможность определения формы локальных объектов, и все это, безусловно, пойдет на пользу изучению обнажений и повысит эффективность использования аналогов коллекторов. По мере роста возможностей нефтяной отрасли по составлению и обсчету моделей в масштабе бассейна, улучшится использование выходов пород в наземных обнажениях и эквивалентных фаций в качестве аналогов коллекторов в подводных разрезах. Во всех случаях применения аналогов важны как получение данных с оптимальным разрешением, так и верный выбор аналога.

Благодарности

Благодарим за финансовую поддержку нефтяные компании – спонсоров проектов SLOPE2 в Ливерпульском университете «Типы генезиса» («Genetic Units») и GEOTipe в Университете Хериота-Ватта (Heriot-Watt University), а также компании ExxonMobil и Shell за выделение грантов на фундаментальные исследования. Благодарим компанию Schlumberger за передачу в дар Университету и компании Roxar за поддержку программ Petrel и RMS. Благодарим сотрудников компании RIEGL systems Кейт Стрейндже (Kate Strange) и Грэма Хантера (Graham Hunter) за поддержку аппаратного и программного обеспечения. Благодарим сотрудника компании STRAT Group Руфуса Бранта (Rufus Brunt) за создание рис. 1. Рис. 2 опубликован с любезного разрешения рабочей группы проекта NOMAD (компании Schlumberger Research и Statoil, Университеты Дельфта, Ливерпуля и Стелленбос). Благодарим рабочие группы Манчестерского университета по исследованиям бассейнов и стратиграфии (Basin and Stratigraphic Studies) и по Северной Африке за рис. 5 и 6. Полевые и камеральные работы при создании рис. 7 выполнили сотрудники Бергенского университета Таня Ауне (Tanja Aune) и Асмунд Вассель (Asmund Vassel). Выражаем признательность геодинамической группе Барселонского университета и лично По Арбю (Pau Arbues) и Ориола Фаливана (Oriol Falivane) за обсуждение и предоставление данных по участку Аинза для рис. 8 и 9. Выражаем признательность Кену МакКафри (Ken McCaffrey) и неизвестному рецензенту за конструктивные замечания, которые сделали статью лучше по сравнению с первоначальным вариантом.

Литература

- Aigner, T., Doyle, M., & Lawrence, D.T. [1989] Quantitative Modelling of Carbonate Platforms: Some Examples. In Read, J. (Ed) Controls on carbonate platform and basin development. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication*, **44**, 27-37.
- Alexander, J. [1993] A discussion on the use of analogues for reservoir geology. In Ashton, M. (ed) Advances in Reservoir Geology. *Geological Society of London Special Publication*, **69**, 175-194.
- Arnot, M.J., Lewis, J.M., & Good, T.R. [1997] Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale outcrop data. *Journal of Sedimentary Research*, **67**, 984-987.
- Barnes, J.W., & Lisle, R.J. [2004] Basic Geological Mapping. Geological Society of London Handbook Series. *Open University Press*, Milton Keynes, UK.
- Bellian, J.A., Kerans, C., & Jennette, D.C. [2005] Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning LIDAR technology in stratigraphic modelling. *Journal of Sedimentary Research*, **72**, 2, 166-176.
- Breed, C.T. & Grow, T. [1979] Morphology and distribution of dunes in sand seas using LANDSAT (ERTS) Imagery. In McKee, E.D. (Ed) A study of global sand seas. *United States Geological Survey (USGS) Professional Paper*, 253-303.
- Bristow, C.S., Bailey, S.D., & Lancaster, N. [2000] Sedimentary structure of linear sand dunes. *Nature* **406**, 1, 56-59.
- Browne, G.H. & Slatt, R.M. [2002] Outcrop and behind-outcrop characterization of a late Miocene slope fan system, Mount Messenger Formation, New Zealand. *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin*, **86**, 5, 841-862.
- Bryant, I.D. & Flint, S.S. [1993] Quantitative clastic reservoir geological modelling: problems and perspectives In Flint, S. & Bryant, I.D. (Eds) The geological modelling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues. *International Association of Sedimentologists Special Publication*, **15**, 3-20.
- Bryant, I., Carr, D., Cirilli, P., Drinkwater, N., McCormick, D., Tilke, P., & Thurmond, J. [2000] Use of 3D digital analogues as templates in reservoir modelling. *Petroleum Geoscience*, **6**, 3, 195-201.
- Brunt, R.L. [2003] *Vertical transitions in turbidite facies and sedimentary architecture: insights from the Gres du Champsaur, SE France and from laboratory experiments*. Unpublished PhD thesis, Leeds University, UK.
- Burns, C. [2004] Benefits of rapid data assessment and visualization prove themselves in exploration scenarios. *First Break* **22**, 2, 69-72.
- Chapin, M.A., Davies, S., Gibson, J.L., & Pettingill, H.S. [1994] Reservoir architecture of turbidite sheet sandstones in laterally extensive outcrops, Ross Formation, Western Ireland. In *GCSSEPM 15th Annual Research Conference Proceedings, Submarine Fans and Turbidite Systems*. 53-68.
- Clark, J.D. & Pickering, K.T. [1996] *Submarine channels, processes and architecture*. Wallis Press.
- Clegg, P., Trunks, I., McCaffrey, K., Holdsworth, B., Jones, R., Hobbs, R., & Waggott, S. [2005] Towards the virtual outcrop. *Geoscientist*, **15**, 1, 8-9.
- Coleman, J.L., Browne, G.H., King, P.R., et al. [2000] The inter-relationships of scales of heterogeneity in subsurface, deep water E & P Projects - Lessons learned from the Mount Messenger Formation (Miocene), Taranaki Basin, New Zealand. In Weimar, P., Bouma, A.H., & Perkins, B.F. (Eds) *Gulf Coast Section Society of Economic Palaeontologists & Mineralogists Foundation, 20th Annual Research Conference Proceedings, Deep-Water Reservoirs of the World*, Houston, USA. December 3-6, 263-283.
- Collinson, J.D. [1970] Deep channels, massive beds and turbidite current genesis in the central Pennine Basin. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, **37**, 495-520.
- Dreyer, T., Falt, L., Hoy, T., Knarud, R., Steel, R., & Cuevas, J-L. [1993] Sedimentary Architecture of Field Analogues for Reservoir Information (SAFARI): a case study of the flu-vial Escamilla Formation, Spanish Pyrenees. In Flint, S.S. &

- Bryant, I.D. (Eds), The Geological Modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues *International Association of Sedimentologists Special Publication*. London, **15**, 57-79.
- Fernandez, O., Munoz, J.A., Arbues, P., Falivene, O., & Marzo, M. [2004] Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: an example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain). *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin*, **88**, 8, 1049-1068.
- Floris, F.J.T. & Peersmann, M.R.H.E. [2002] Integrated scenario and probabilistic analysis for asset decision support. *Petroleum Geoscience*, **8**, 1-6.
- Geehan, G. & Underwood, J. [1993] The use of length distributions in geological modelling. *International Association of Sedimentologists Special Publication*. **15**, 205-212.
- Glennie, K.W. [1970] *Desert sedimentary environments*. Elsevier Co., Amsterdam.
- Hodgetts, D., Drinkwater, N.J., Hodgson, D.M., Kavanagh, J., Flint, S., Keogh, K.J., & Howell, J. [2004] Three dimensional geological models from outcrop data using digital data collection techniques: an example from the Tanqua Karoo depocentre, South Africa. In Curtis, A. & Wood, R. (Eds) Geological Prior Knowledge. *Geological Society of London Special Publications*, **239**, 457-75.
- Hodgson, D.M., S.S. Flint, D. Hodgetts, N.J. Drinkwater, E.P. Johannessen, & Luthi, S.M. [2006] Stratigraphic evolution of fine-grained submarine fan systems, Tanqua depocentre, Karoo Basin, South Africa. *Journal of Sedimentary Research*. Howell, J.A., Vassel A. & Aune, T. [in press] Modelling of dipping cliniform barriers within deltaic outcrop analogues from the Cretaceous Western Interior Basin USA. In Griffiths et al., (Eds) The Future of Geological Modelling in Hydrocarbon Development. *Geological Society of London Special Publication*.
- Jervey, M.T. [1988] Quantitative geological modelling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression. In Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G., Posamentier, H.W., Ross, C.A., & Van Wagoner, J.C. (Eds), Sea-Level Changes: An Integrated Approach: SEPM Special Publication, **42**, 47-69.
- Jol, H.M., Bristow, C.S., Smith, D.G., Junck, M.B., & Putnam, P. [2003] Stratigraphic imaging of the Navajo Sandstone using ground-penetrating radar. *The Leading Edge*, **22**, 9, 882-7.
- Kenyon, N.H., Amir, A., & Cramp, A. [1995] Geometry of the younger sediment bodies of the Indus Fan. In Pickering, K.T. & Hiscott, R.N. (Eds) *Atlas of deep water environments: architectural style in turbidite systems*, **2**, 89-93.
- Kneller, B.C. & Buckee, C. [2000] The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*, **47**, 62-94.
- Larue, D.K. & Friedmann, F. [2005] The controversy concerning stratigraphic architecture of channelized reservoirs and recovery by waterflooding. *Petroleum Geoscience*, **11**, 2, 131-146.
- McCaffrey, W.D., Gupta, S., & Brunt, R.L. [2002] Repeated cycles of submarine channel incision, infill and transition to sheet sandstone development in the Alpine Foreland Basin, SE France. *Sedimentology*, **49**, 623-635.
- McCaffrey, K.J.W., Jobnes, R.R., Holdsworth, R.E., Wilson, R.W., Clegg, P., Imber, J., Holliman, N., & Trinks, I. [2005] Unlocking the spatial dimension: digital technologies and the future of geoscience fieldwork. *Journal of the Geological Society of London*, **162**, 1-12.
- McKay, S. [2004] Autostereoscopic 3D displays: bringing Imax to the desktop? *First Break*, **23**, 2, 59-62.
- Nordhal, K., Ringrose, P.S., & Wen, R. [2005] Petrophysical characterization of a heterolithic tidal reservoir interval using a process-based modelling tool. *Petroleum Geoscience*, **11**, 17-28.
- Peakall, J., McCaffrey, W.D., & Kneller, B.C. [2000] A process model for the evolution of submarine fan channels: implications for sedimentary architecture. In Bouma, A.H. & Stone, C.G. (eds) *Fine-grained turbidite systems. AAPG Memoir 72* / *SEPM* **68**, 73-88.
- In Hodgson, D.M. & Flint, S.S. [2005] Mass transport complexes and tectonic control on confined basin-floor submarine fans, Middle Eocene, south Spanish Pyrenees. In Flint, S.S. & Hodgson, D.M. (Eds) *Geological Society Special Publication, Submarine Slope Systems, Processes & Products*, **244**, 51-74.
- Pringle, J.K., Westerman, A.R., Clark, J.D., Drinkwater, N.J., & Gardiner, A.R. [2004a] 3D high resolution digital models of outcrop analogue study sites to constrain reservoir model uncertainty - Alport Castles, Derbyshire, UK example. *Petroleum Geoscience*, **10**, 4, 343-352.
- Pringle, J.K., Westerman, A.R., & Gardiner, A.R. [2004b] Virtual Geological Outcrops - Fieldwork and analysis made less exhausting? *Geology Today*, **20**, 2, 67-72.
- Pringle, J.K., Clark, J.D., Westerman, A.R., & Gardiner, A.R. [2003] Using GPR to extract 3-D turbidite channel architecture from the Carboniferous Ross Formation, County Clare, Western Ireland. In Bristow, C.S. and Jol, H. (Eds) *Geological Society Special Publication. GPR in Sediments*, **211**, 309-320.
- Reynolds, A.D. [1999] Dimensions of Paralic Sandstone Bodies. *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin*, **83**, 2, 211-229.
- Ringrose, P.S., Nordahl, K., & Wen, R. [2005] Vertical permeability in heterolithic tidal deltaic sandstones. *Petroleum Geoscience*, **11**, 29-36.
- Staggs, J.G., Young, A., & Slatt, R.M. [2003] Ground-penetrating radar facies characterization of deepwater turbidite outcrops. *The Leading Edge*, **22**, 9, 888-891.
- Vissa, C.A. & Chessa, A.G. [2000] Estimation of length distributions from outcrop datasets - application to the Upper Permian Cutler Formation, Utah. *Petroleum Geoscience*, **6**, 29-36.
- Young, R.A., Slatt, R.M., & Staggs, J.G. [2003] Application of ground penetrating radar imaging to deepwater (turbidite) outcrops. *Marine & Petroleum Geology*, **20**, 809-821.
- Zehner, B., Altekoster & Kumpel, H.-J. [2001] Visualisation of 3D GPR surveys: Application of Virtual Reality in Geosciences. *European Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, **6**, 141-152.