

Цифровые модели геологического обнажения: методика и применение

Digital outcrop models: Technology and applications

Klaas Verwer,¹ Erwin W. Adams,² и Jeroen A.M. Kenter³

Многие модели резервуара не охватывают детальные геологические особенности, которые могли бы управлять дебитом нижних горизонтов. Чтобы улучшить межкважинную корреляцию и вытекающие отсюда характеристики резервуаров нижних горизонтов, необходимо получить и ввести количественные данные по геологической неоднородности. Выходы пластов на дневную поверхность пока являются самым важным источником познания формы, размера и распределения осадочных образований, так как они дают возможность непосредственно визуально наблюдать типы пород и их пространственное взаиморасположение. Напротив, при исследовании подповерхностных горизонтов буровые скважины представляют детальную, но пространственно ограниченную информацию. Двумерные и трехмерные сейсмические изображения представляют детальную информацию о геометрических характеристиках, но являются всего лишь результатом свертки исходного акустического сигнала с акустическими характеристиками пород.

Необходимость количественной оценки геометрических характеристик осадочных образований на геологических обнажениях (выходах их на поверхность) является, следовательно, очевидной и широко признанной, особенно для карбонатных осадочных комплексов. В конечном итоге, количественные модели выходов пород на поверхность обеспечивают составителей подповерхностных моделей ключевой информацией по структуре и неоднородности резервуаров и дают возможность усовершенствовать способы геостатистического и геометрического моделирования, чтобы лучше ввести ограничения при подповерхностном моделировании. Однако, было опубликовано мало наборов данных, которые бы с высокой разрешающей способностью обеспечивали исследования структуры пластов, литофацальных границ и пространственного распределения физических характеристик. Одной из причин явного отсутствия такой информации являются трудности в создании двухмерной и, где это возможно, трехмерной геометрии достоверным и точным способом.

Цифровые методики картирования, такие как кинематические глобальные позиционные системы реального времени (RTK GPS) и сухопутные сканирующие лазерные локаторы, являются в настоящее время стандартными методами при геологических исследованиях выходящих на поверхность пород (см. Jones и др., 2004; Verwer и др., 2004; Adams и др., 2005; Bellian и др., 2005; McCaffrey и др., 2005 и ссылки, помещенные в конце статьи). Цифровые методы позволяют количественно оценить геологические характеристики пород, выходящих на поверхность, через пространственное позиционирование (определение местоположения), т.е. согласуют множество геологических измерений и интерпретаций с истинным географическим пространственным положением. Методика, которая заключает в себе и современные технологии и традиционные полевые геологические исследования, быстро продвинулась вперед в течение последних 5-10 лет и называется цифровой полевой геологией. Процесс объединения полевых наблюдений с их пространственными характеристиками называется цифровым моделированием геологических обнажений (выходов на поверхность горных

пород).

Количественные данные, полученные в результате цифрового картирования, используются для построения цифровых моделей геологических обнажений (DOM – digital outcrop model). Цель DOM при исследовании заключается как в сборе данных по обнажению, так и в восстановлении трехмерной структуры геологического комплекса. Это выходит за пределы простого покрытия фотосъемкой регулярной цифровой модели высот над уровнем моря. Методика включает сбор различного типа данных и способы обработки и интерпретации, которые будут описаны далее. В дальнейшем DOM может быть преобразована в статистические геомодели ячеистого строения и наполнена, применяя различные геостатистические методы. Эти статистические модели могут быть использованы: 1) как количественные аналоги подземных резервуаров (нефтегазоносных пластов) подобного возраста и/или осадочных комплексов, 2) как входные данные для динамических моделей резервуара, 3) для сейсмического моделирования и 4) для обучающих целей, особенно с использованием визуализации методами виртуальной реальности (VR).

В этой статье мы представляем последовательность действий в цифровой полевой геологии. К тому же мы представляем два примера цифровых моделей геологических обнажений карбонатных комплексов и оцениваем и демонстрируем их результаты для более ясного научного понимания механизмов, которые контролируют осадочные карбонатные комплексы, и, вторых, для введения обоснованных ограничений при моделировании геологической среды. Первый пример относится к Каменноугольной системе в Испании; второй пример рассматривает Девонскую систему Западной Австралии. Для других примеров DOM и многочисленных методов интеграции количественных исходных данных кремнисто-обломочных, а также карбонатных комплексов читатель отсылается к приложенному в конце статьи списку литературы.

Цифровое моделирование выходящих на поверхность геологических комплексов

Все исследования при цифровом моделировании начинаются с «классической» геологической съемки. Например, для понимания литофацальных характеристик изучаются и детально описываются вертикальные разрезы. Характеризуется стратиграфическая последовательность и создается схематическая модель исследуемой системы. Более того, оцениваются тектонические условия объекта исследования. Другими словами, до развертывания цифровой полевой геологии должны быть установлены геологические рамки работ. Затем такая «классическая» геологическая съемка может быть расширена и зарегистрирована одновременно с использованием цифровых полевых методик и загружена в DOM. Ниже приводится описание последовательности работ для формирования DOM (рис. 1). Этап 1 – выбор геологического обнажения. Первым этапом в цифровой полевой геологии является выбор характерного объекта исследования с соответствующим масштабом и типом, относящимся к изучаемому комплексу. Выбранный объект обнажения должен быть преобразован сообразно следующим критериям: 1) сохранный и удобный для

¹ Corresponding author (E-mail: klaas.verwer@falw.vu.nl) Vrije Universiteit, Faculty of Earth and Life Sciences

² Shell International Exploration and Production

³ Chevron Energy Technology Company

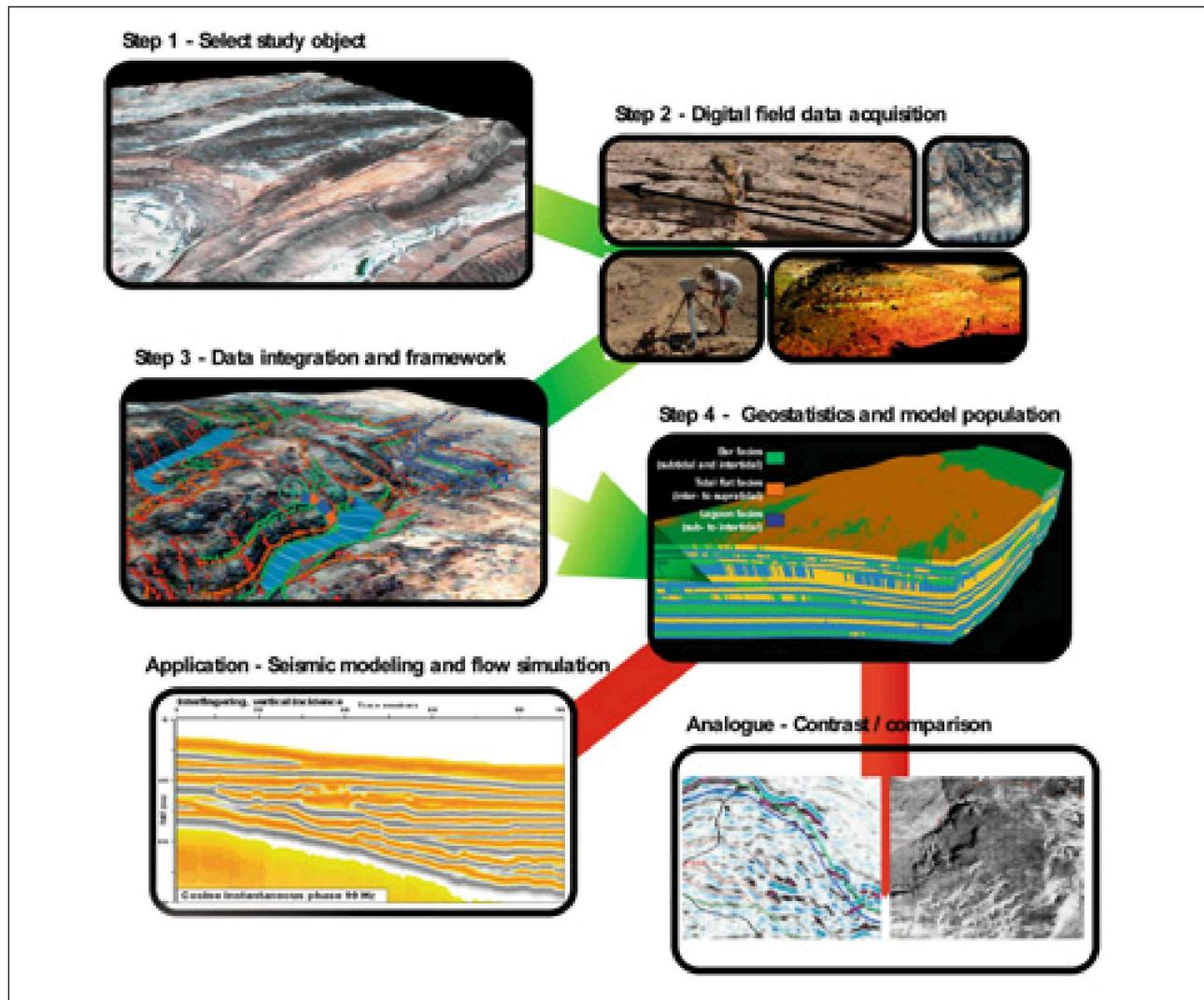


Рис. 1 Диаграммы цифрового моделирования геологического обнажения. Сейсмический разрез по Bracco Gartner и Schlager (1999); аналогичные изображения по Weber и др. (2003). Более подробно смотрите в тексте.

доступа, 2) хорошо исследован и документирован, 3) непрерывный (сплошной) и достаточно значительный по размеру, чтобы определить структуру пласта, 4) иметь известную структурную деформацию, соответствующую изучаемым объектам, и 5) наличие качественного изображения (спутниковое изображение или аэрофотоснимки) совместно с цифровыми моделями высот рельефа над уровнем моря (DEMs) для визуализации и подтверждения региональной геологической обстановки.

Обнажения могут иметь несколько видов проявлений на поверхности, такие как поперечные траншеи (канавы), системы каньонов или топография, созданная породами, выходящими на поверхность (экстремированная топография), которые дают многочисленные срезы по всему объему пласта. Выбор обнажения, следовательно, может влиять на эффективность модели.

Этап 2 – Цифровая полевая геология и сбор данных по территории. Важным перед изучением геологического обнажения является построение базовой карты по цифровой модели высот рельефа над уровнем моря и, особенно, по изображениям, полученным с воздуха. Точечные пространственные данные, собранные по RTK GPS и сухопутному лазерному сканированию, могут быть загружены в базовую цифровую карту. Все данные могут быть скомпонованы и визуализированы в стандартном геоинформационном пакете программ.

RTK GPS позволяет собрать данные по дискретным точкам, расположенным на поверхности геологического обнажения, с помощью приемного устройства RTK GPS. Таким образом, каждое наблюдение регистрируется непосредственно, а параметры геологических элементов, или зоны трещиноватости выражаются в количественной форме. Стратиграфические разрезы могут быть снабжены геологическими ссылками и внесены в базу данных как псевдоскважины. Пространственные изменения свойств пород (например, литофацальные переходы) могут быть зарегистрированы при прохождении вдоль контактов пластов. Регистрируя в определенных местах литофацальные изменения, получаем информацию по латеральной литофацальной изменчивости. Для нефтяной индустрии это может быть подобно направлению траектории скважины вдоль стратиграфического контакта. Обычно этим методом собирается от нескольких точек в минуту до одной точки в секунду.

Сканирование лазерным локатором является непрерывным методом измерения, где множество точек собирается над границами геологического обнажения в целом. Сканирование лазерным локатором может собирать многие тысячи точек в секунду и дополнительно к определению координат x,y,z определять энергию отклика. Эти данные могут быть снабжены геологическими ссылками для использования их вместе с непосредственно собранными данными, такими как RTK GPS.

Практичность лазерного сканирования заключается в том, что создается высокоразрешающая модель геологического обнажения для того, чтобы исследовать, насколько полно данные по дискретным точкам, полученные по RTK GPS, отслеживают морфологию, или, чтобы получить пространственные данные по удаленным пунктам. В настоящее время ведутся исследования по выявлению в автоматическом режиме таких характеристик разреза, как слоистость и литология, используя мощность лазерной установки и характер очертания геологического обнажения. Дополнительные данные, например, по системе разрывных нарушений, характеру ложа пород, выходящих на поверхность и литологическим формированиям, могут быть получены методами дистанционной регистрации, такими как орто-исправленные фотоснимки и спектральные спутниковые изображения. Пространственные данные могут быть собраны несколькими способами и классифицированы как достоверные и недостоверные данные. Достоверными данными являются физические наземные наблюдения, такие как вертикальные разрезы, или трассированные по RTK GPS поверхности пластов или плоскости разрывных нарушений. В этой статье мы определяем недостоверные данные, как плохо привязанные данные, или не подтвержденные наземными наблюдениями точечные данные, полученные по спутниковым или лазерным изображениям. Это не предполагает, что недостоверные данные сами по себе не интерпретируются и более низкого качества. Например, пластовый контакт, оцифрованный по лазерному изображению, является недостоверным, но его геометрия является достаточно качественной, так как базируется на точечных данных RTK GPS. Выделенное свойство, однако, сохраняет недостоверную классификацию с различной степенью доверия.

Этап 3 – объединение данных и система компоновки. Одно из важнейших преимуществ цифровой геологии заключается в том, что существует непрерывная обратная связь с полевыми наблюдениями. Многоуровневые наблюдения начинаются во время проведения полевых работ. Например, данные RTK GPS и лазерные изображения регистрируются, объединяются и используются в качестве трехмерной модели для создания статистической модели и могут быть задействованы почти мгновенно. Суммарная ошибка в определении координат порядка нескольких дециметров и является результатом погрешности RTK GPS и лазерного изображения и объединения различных баз данных в единой системе координат. После того, как данные удовлетворительно объединены, на первом этапе построения статистической модели создаются стратиграфическая и структурная общие схемы. Поверхности пластов, трассированные RTK GPS, разрывные нарушения и измеренные участки вдоль границ раздела или пластов, отслеженные по лазерным изображениям, объединяются для воссоздания стратиграфических горизонтов и плоскостей разрывных нарушений. Они образуют определенный каркас, схему, по которой на следующем этапе корректируется трехмерная ячеистая геологическая модель.

Этап 4 – Геостатистика и заполнение модели.

Следующим этапом является моделирование фаций, распределенных в пределах дискретных зон, обусловленных цифровыми регистрирующими наблюдениями геологического обнажения. Непрерывно регистрируемые данные дают возможность создать карты распределений, например, условий осадконакопления. Эти карты представляют информацию о множестве литофациальных типов и о данных по объему, геометрии и пространственному распределению осадочных образований. Пространственная статистика, полученная по районам с высокой плотностью данных, в дальнейшем используется для заполнения районов с низкой плотностью данных.

Результативная модель геологических фаций может быть скомпонована с петро-физическими свойствами присоединением к ней результатов измерения петрофизических свойств образцов, отобранных на геологическом обнажении, или с другими петрофизическими базами данных. Модели, которые могут быть созданы по этим геологическим ячеистым моделям геологического обнажения, включают плотность, пористость, акустическую скорость и проницаемость (Verwer et al. 2006; Janson et al. 2007).

Приложения методики и примеры аналогичного моделирования

Синтетические сейсмические модели, созданные по данным геологического обнажения, помогают истолковывать подповерхностные конфигурации в разрезе, полученные по сейсмическим отражениям (Bracco Gartner и Schlager, 1999, Janson и др., 2007). Модель флюидного потока может помочь лучше понять и предсказать свойства подземного резервуара (продуктивного пласта, нефтеносного слоя). DOM (digital outcrop model) может быть непосредственно использована для решения обеих задач. К тому же, цифровые модели геологических обнажений (DOM), визуализированные в трехмерном пространстве и виртуальной реальности, предоставляют исключительную и благоприятную возможность обучения и для геологов-нефтяников, и для инженеров.

Использование DOM для детализации границ раздела и сопоставления с конкретными резервуарами для улучшения их характеристик является более сложным. Изучение моделей геологических обнажений важно, поскольку они ограничивают неоднозначность интерпретации и определяют степень успешности прогнозирования в случае сложной фациальной характеристики подземного резервуара. Однако, результаты по изучению цифровых моделей геологических обнажений непосредственно не переносятся на подземные резервуары, в частности в карбонатных средах, представленных литологическим многообразием и диагенетическими модификациями. DOM, тем не менее, помогает понять структуру карбонатных платформ и предоставляет многочисленные данные по возможному пространственному распределению различных структур ее. Предлагаются следующие две работы, в которых цифровое моделирование геологического обнажения доказывает применимость этого метода для непосредственного изучения проблемы развития резервуара.

Геологическое обнажение Sierra del Cuera (Asturias, northern Spain) является карбонатной плитой от Серпуховского до Касимовского возраста (верхнекаменноугольная система). Плита выходит на поверхность непрерывно на расстоянии 15 км, в виде, похожим на вертикальный сейсмический разрез (рис. 2A). Аэрофотоснимки показывают поднятие с почти плоской вершиной, ограниченное ступенчатым склоном с углом наклона от 20° до 45° и рельефом от нескольких сотен метров до 850 м. Характеристика литологии обстоятельно представлена в работе Della Porta и др., 2004 и в ссылках к настоящей статье. Соответствующие по возрасту и фациальному составу отложения склона наблюдались в Прикаспийском бассейне в Казахстане (Tengiz, Korolev, Kashagan) (Kenter и др., 2005). Здесь зона резервуара трудно отображается вследствие мощного солянокупольного покрова, а средняя часть зоны ограничена точечной информацией. Первоначально наблюдения в средней части были рассеянными, и гипотетическая модель была построена на основании данных по Астуре (Испания), откуда пространственная информация по литологии склона и распределению была перенесена на поперечный разрез Tengiz.

Окраина Астурской карбонатной платформы была исследована относительно распределения лиофаций и пространственной геометрии, трассированной по RTK GPS системе. Карбонатные плиты характерны для верхней части склона, где они преобладают, до глубины ~250-350 м под краем плиты, представлены микробиологическими карбонатными осадочными породами, обусловленными многочисленными скелетными скоплениями и обильным морским цементированием (Della Porta и др., 2004; Collins и др., 2007; Kenter и др., 2007). DOM документирует размеры и формы размывания и намывания плитной структуры на основании ортопографии и количественных оценок поверхности пластов и показывает наклон слоев плиты, склоновые клиноформы и относительное процентное содержание лиофаций района, а скорости аккумуляции были рассчитаны по картам распределения лиофаций (рис. 2B, C, D). К тому же, DOM дает входную информацию для количественных геоячеистых моделей в пределах поднятой плиты микробиологических карбонатных осадочных пород (Della Porta и др., 2004; Kenter и др., 2005).

Для района Тенгиз принятие литофациального распределения DOM Астурии и пластовой структуры в пределах района обеспечило ключевую, решающую вводную информацию для ограничения интерпретации подповерхностной геологии. Результативная карта литофациального распределения была сопоставлена с сейсмическими данными и использована для картирования сейсмических фаций, а также определения положения границы между склоном и плитой. Это предоставило информацию для модели резервуара комплекса микробиологических осадочных пород, который проявляет низкую проницаемость нетрещиноватого известнякового коллектора, но высокий поток в трещине гидроразрыва. Пространственное моделирование показало, что карбонатные осадочные породы верхней части склона составляют приблизительно 25% объема плиты в позднем Визе в Башкирском резервуаре (Weber и др., 2003). Скважины с непрерывным отбором керна, подобно T-5056, T-463 и другие (см. рис. 2 и Weber и др., 2003), подтвердили прогнозную значимость первоначальной модели, основанной на данных Астурийской цифровой модели геологического обнажения.

Геологические обнажения франского яруса верхнедевонской системы бассейна Canning в Западной Австралии демонстрируют классические примеры регрессирующих и обратноступенчатых окраин карбонатной плиты, образованных при высоких скоростях ее погружения (Playford, 2002). Выходящие на поверхность рифовые комплексы в районе Bugle Gap хорошо проявлены; показывают слабые тектонические деформации и

имеют экскавированную топографию, т.е. современная топография отражает литологический профиль Девонского морского дна. Геологические обнажения представлены остроконечными рифами, образующими самую южную оконечность карбонатной плиты (рис. 3А). Остроконечные рифы простираются на расстояние около 500 м и имеют максимальную высоту приблизительно 30 м. Со временем, по мере формирования карбонатной системы развился обратноступенчатый и регрессирующий стиль окраин, выраженный в уменьшении размера системы. Накопления нефти в продуктивном пласте, связанные с небольшими надстройками на более обширной карбонатной плите, ранее обнаружены в подповерхностных девонских образованиях Leduc Канады (Atchley и др., 2006). Сейсмические примеры в открытом море по Третичной системе Юго-Восточной Азии иллюстрируют изолированные карбонатные плиты, становящиеся менее протяженными и смещеными от плоской вершины плиты к остроконечным рифам под влиянием прогрессирующего увеличения занимаемой ими площади (Zampetti и др., 2004). Хотя необходимы высокоразрешающие сейсмические данные, чтобы выявить эти небольшие надстройки или остроконечные рифы, количественные данные по размещению аналогичных геологических обнажений могут обеспечить вводную информацию для численной оценки темпа развития этих изолированных надстроек и их внутренней неоднородности.

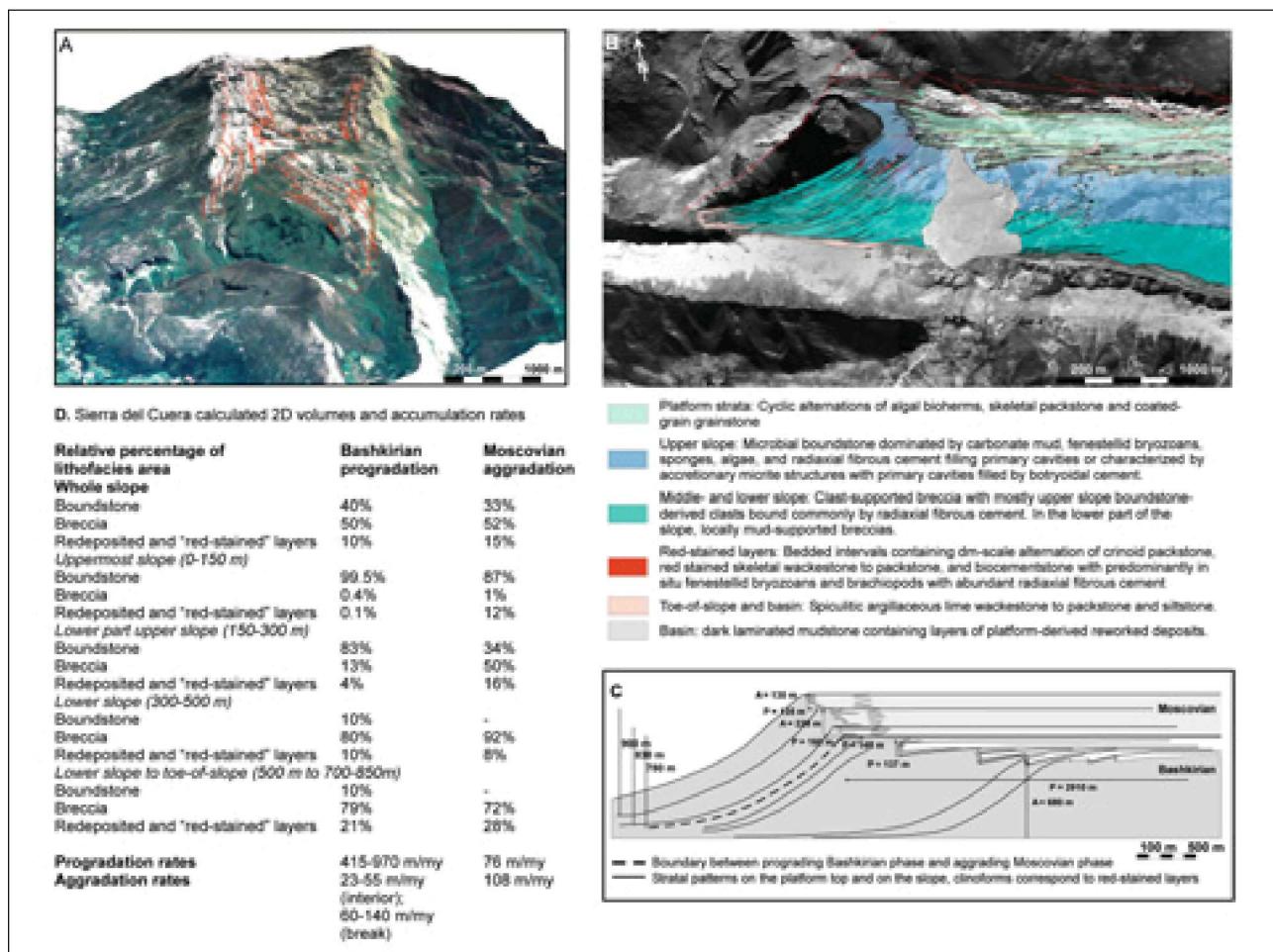


Рис. 2 Исследование структуры Башкирско-Московской карбонатной платформы по аналогии с Астурийской плитой (северо-западная Испания). А) Изображение, представляющее пересечение в восточном направлении цифровой модели геологического обнажения Sierra de Cuera, с трассированием пластовых характеристик (красные крестики). Сечение горизонталей приблизительно 2 м. В) ортоизправленные (черные) фотоснимки и (белые) аэрофотоснимки, показывающие карту литофаций. Сечение горизонталей изображения 0.5 м. С) Модель структуры платформы и геометрии пластов. Размеры латеральной протяженности и изменений по вертикали (наносы и пр.) платформенного среза представлены в метрах со стрелками, указывающими направление возрастания. Клиноформы, относящиеся к окраиненным в красный цвет интервалам, трассированы по DGPS на геологическом обнажении. Д) Таблица, представляющая количественные данные, извлеченные и рассчитанные в DOM, (модифицированная по Verwer и др., 2004, перепечатанная с разрешения Лондонского Геологического общества (Geological Society London).

Была оценена эволюция франской карбонатной плиты и системы пикообразных рифов района Bugle Gap, зарегистрированы по RTK GPS стратиграфические и литологические границы, и все данные были скомпонованы, визуализированы и смоделированы в DOM (Adams и Hasler, 2007). Взаимосвязь между закартированными литологическими границами и топографией геологического обнажения была визуализирована комбинированием цифровых данных геологического обнажения с данными DEM. Рис. 3 поэтапно иллюстрирует процедуру, с помощью которой была построена 3D геологическая модель одного из пикообразных рифов. Могут быть отображены и рассчитаны объемы, представляющие различные литологические среды. Была построена модель, воссоздавающая современную эрозию. Важный результат этого исследования заключается в том, что могут быть извлечены численные данные по поверхности и объему плиты для каждого этапа ее развития. В дальнейшем эти эмпирически полученные данные могут быть использованы в качестве входных параметров для стратиграфического моделирования, чтобы оценить характер, параметры и темп изменения размера плиты под влиянием аккомодации (процесса роста рифовых построек) Hasler и др., 2007). В итоге DOM Девона бассейна Canning охватывает развитие системы пикообразных рифов, представленные в количественной форме обратноступенчатые и регрессирующие свойства и последующее уменьшение размера надстраивания. Численное представление таких систем дает возможность лучше ограничить подповерхностные неопределенности подсчетных параметров и типов структурного развития карбонатной системы, которые контролируются высокими скоростями погружения.

Выходы

Методы цифрового картирования, такие как RTK GPS и лазерное сканирование, становятся стандартными в геологических полевых работах. Эти методы объединяют геологические наблюдения и интерпретации с их истинным географическим пространственным положением. Эти данные могут быть эффективно скомпонованы в цифровую модель геологического обнажения (DOM – digital outcrop model), использование которой дает следующие положительные результаты:

- В DOM пространственно ограниченные геологические наблюдения могут быть визуализированы и детально исследованы по каждому виду, масштабу и геометрии. Трактовки (интерпретации) могут быть представлены в любой случайной плоскости для экстраполяции (распространения) истинных простираний и глубин. Например, DOM может быть сглажена на определенных стратиграфических горизонтах, или может быть изменен вертикальный масштаб.
- DOM обобщает численную информацию по геологической неоднородности геологических обнажений в 3D модель. Множество литофаций, размеры и природа латеральных фациальных переходов выражаются в количественной форме и непосредственно сохраняются в цифровом поле. Комплексная информация по структуре и протяженности осадочных образований может быть эффективно перенесена в статистические модели.

Области приложения DOM многообразны:

- Стационарные модели, полученные по DOM, могут быть использованы для сейсмического моделирования, или проверки динамического моделирования резервуара.
- DOM эффективна для количественной характеристики границ раздела и сопоставления с аналогичными отложениями подземного резервуара.
- DOM обеспечивает количественную характеристику полевых работ для развития геостатистических методов наполнения с целью введения лучшего ограничения при подповерхностном моделировании.

В этой статье детально не рассматривается то, что DOM превосходно обеспечивает обучающие базы данных, особенно, когда они визуализированы методами виртуальной реальности. К тому же, численные данные геологического обнажения, содержащиеся в DOM, служат основой для расширения сотрудничества между геологами и учеными других специализаций, таких как геофизики и инженеры-нефтяники.

Благодарности

Klaas Verwer and Jeroen Kenter выражают благодарность Giovanna Della Porta (Cardiff University) за вклад в исследование примера Астурии. За вклад в исследование примера бассейна Canning Erwin Adams выражает признательность Claude-Alain Hasler (University of Geneva), с которым это исследование было проведено. Выражаем благодарность Jerry Bellian (Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin) за обсуждение цифрового моделирования геологических обнажений и критический комментарий ранних версий, который улучшил рукопись. Помощник редактора Rutger Gras (Schlumberger) и анонимные рецензенты дали ценные замечания, которые внесли ясность в рукопись.

Рекомендуемая литература для чтения

- Adams, E.W., Grotzinger, J.P., Watters, W.A., Schroder, S., McCormick, D.S., and Al-Siyabi, H.A. [2005] Digital characterization of thrombolite-stromatolite reef distribution in a carbonate ramp system (terminal Proterozoic, Nama Group, Namibia). *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 89, 1293-1318.
- Adams, E.W. and Hasler, C.-A. [2007] Spatial Quantification of Aggrading, Backstepping, and Drowning Patterns of a Frasnian Carbonate Platform System (Bugle Gap, Canning Basin, Western Australia). *AAPG Annual Convention*, Long Beach, California, USA.
- Atchley, S.C., West, L.W., and Sluggett, J.R. [2006] Reserves growth in a mature oil field: The Devonian Leduc Formation at Innisfail field, south-central Alberta, Canada. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 1153-1169.

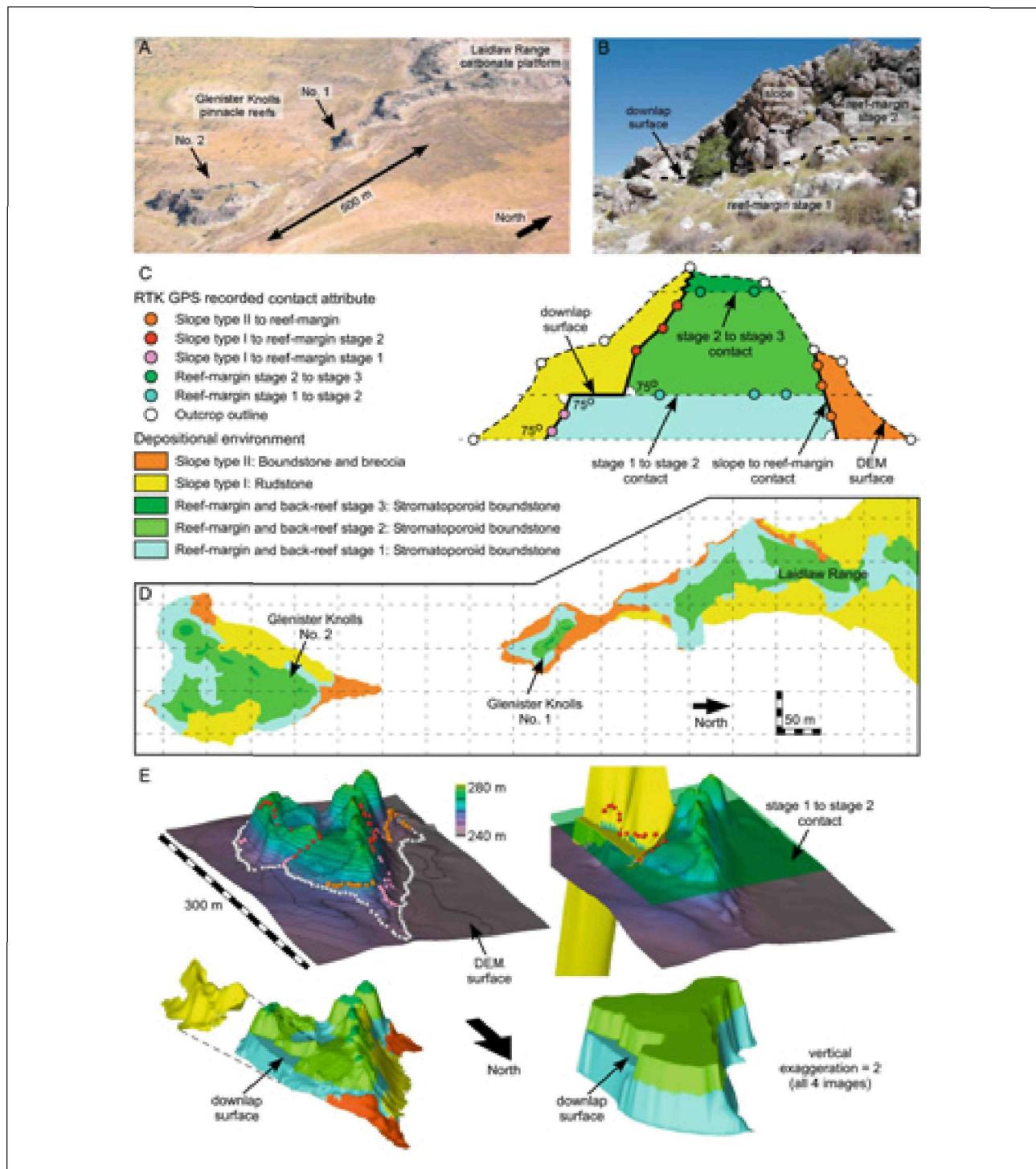


Рис. 3 Пример исследования в районе Bugle Gap бассейна Canning, Западная Австралия, воспроизводящий развитие остроконечных рифов Франской системы. А) Диагональный аэрофотоснимок, показывающий экзегуированную топографию. В) Фотография геологического обнажения, взятая из Glenister Knolls No. 2, иллюстрирующая поверхность прилегающей подошвы, т.е. результат ее обратноступенчатой структуры. С) Схематическая модель, иллюстрирующая развитие и структурные элементы, наблюденные и зарегистрированные в поле. Д) Геологическая карта района исследования в цифровой форме, показывающая литологическое распределение. Е) Модельные снимки, иллюстрирующие поэтапное построение модели. Для моделирования вертикальной стратиграфии окраинных рифов был использован стандартный метод кригинга для согласования и интерполяции поверхности между точечными данными, которые были собраны по геологическим границам. Согласование между точечными данными, зарегистрированными на границе между склоном и положениями платформы 1 и 2, соответственно, создало две почти вертикальные поверхности. Эти две поверхности были объединены в обратноступенчатую или подошвенную поверхность с помощью горизонтального разрыва между двумя вышеуказанными поверхностями. К тому же, были построены модели, восстанавливающие современную эрозию.

