

## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

**Необходимость правильного геологического обеспечения для моделирования: появление преобразования UVT. The need for a correct geological modelling support: the advent of the UVT-transform**

Stanislas Jayr, Emmanuel Gringarten, Anne-Laure Tertois, Jean-Laurent Mallet и Jean-Claude Dulac of Paradigm\* представляют систему для поддержки геологического моделирования, которая позволяет создавать геологические структуры, какой бы сложности они ни были, с использованием всех имеющихся данных. Также рассказывается о согласованном картировании между положением осадочных фракций в настоящее время и их положением в первоначальном месте осадения, параметрическом пространстве.

На расстоянии от скважин для заполнения моделей резервуара петрофизическими характеристиками, такими как пористость и проницаемость, используются методы интерполяции. Эти методы рассчитывают оценки значений параметров в заданных точках резервуара. Эта оценка зависит от того, как строго согласуется вещество пород в интересующем нас месте с окружающими данными. Методы интерполяции используют значения пространственной корреляции, предполагаемые по наблюдениям, которые являются функцией расстояния «смещения» между двумя (или более) точками. Однако, в настоящее время расстояния между осадочными фракциями трудно установить исходя из того, каким оно было в то время, когда эти фракции были отложены. Чтобы аппроксимировать (приблизить) первоначальные расстояния использованы алгоритмы, основанные на преобразованиях, предполагаемых геометрией «стратиграфических» систем, использованных для представления 3D моделей подземных резервуаров. Эти трансформации преобразуют системы в регулярные декартовы системы ячеек равных размеров, предположительно являющихся пространством осадения или «параметрическим» пространством. Рассмотрены современные методы создания сетей (гридирования) и методы преобразований и представлены новые методы (названные преобразованием UVT), преодолевающие их недостатки и допущения.

**Стратиграфические интервалы и параметрическое пространство**

Положение любой фракции осадков, «s», наблюдаемой в настоящее время в резервуаре, может быть охарактеризовано двумя способами:

- Первый, по Эвклидовым координатам (x,y,z) ее современного положения, где (z) – высота «s», а (x,y) – ее географические координаты в 3D геологическом пространстве;
- Второй, по «палео-координатам» (u, v, t), где (t) – время отложения «s», а (u, v, t) – ее палеогеографические координаты в 3D геологическом пространстве;

Чтобы точно заполнить модели резервуаров петрофизическими параметрами, интерполяционные методы требуют вычисления «стратиграфических расстояний» d(a,b) между парами фракций осадков (a,b), расположенных в настоящее время в положениях r(a) и r(b) в резервуаре. Теоретически d(a,b) может быть рассчитано следующим образом:

$$d(a,b) = \sqrt{\{u(b) - u(a)\}^2 + \{v(b) - v(a)\}^2 + \lambda \times \{t(1) - t(a)\}^2} \quad (1)$$

Где {u(a), v(a), t(a)} и {u(b), v(b), t(b)} – палеокоординаты (a) и (b), соответственно, а  $\lambda$  – масштабный коэффициент, который отвечает за то, как прослеживается диапазон изменения в геологическом времени.

Обычно, в области применения моделирования резервуаров, имеющих промышленное значение, индексы (i, j, k) шестигранных (кубических) ячеек структурного стратиграфического грида, представляющего резервуар, используются вместо палео координат (u, v, t) для аппроксимации стратиграфического интервала d(a, b) интервалом D(a, b), которое следует из:

$$D(a,b) = \sqrt{\alpha \times \{i(b) - i(a)\}^2 + \beta \times \{j(b) - j(a)\}^2 + \lambda \times \gamma \times \{k(b) - k(a)\}^2} \quad (2)$$

Где {i(a), j(a), k(a)} и {i(b), j(b), k(b)} – индексы двух ячеек, содержащих фракции осадков (a) и (b), соответственно, а ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) – размеры ячеек в направлениях (j) и (k), соответственно.

Для D(a,b), равного d(a,b), должно быть выполнено два ограничения:

- *Постоянные размеры ячеек:* изменения индексов  $\Delta i$ ,  $\Delta j$ ,  $\Delta k$  между двумя ячейками должно согласовываться с такими же изменениями  $\Delta u$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta t$  палео-географических координат, какое бы ни было положение этих ячеек в резервуаре. Другими словами:

$$\Delta u = \alpha \cdot \Delta i; \Delta v = \beta \cdot \Delta j; \Delta t = \gamma \cdot \lambda \cdot \Delta k \quad (3)$$

Если эти ограничения выполнены, (u, v, t) палео-координаты и (i, j, k) индексы могут быть затем эквивалентно использованы для вычисления расстояний, требуемых алгоритмами интерполяции. Это может быть получено так:

- (u, v, t) или (i, j, k) определяют *параметризацию* поверхности под землей, которая связывает каждое положение (x, y, z) в резервуаре с положением (u, v, t) или (i, j, k) в параметрическом пространстве.
- Параметрическое пространство (u, v, t) или (i, j, k) проявляется как пространство осадения, хорошо известное как «пространство Wheeler» в хроно-стратиграфическом обществе (Wheeler, 1958).

\* www.pdgm.com.

### Опасный побочный эффект вертикально организованного грида

Специалисты, занимающиеся моделированием и инженеры-эксплуатационники обычно создают вертикально организованный стратиграфический грид, базирующийся на колонках ( $i, j, k$ ), ячейки которых в направлении  $k$  никогда не пересекают разломы. В соседних неперпендикулярных разломах это ведет к генерации шестигранных ячеек непостоянного размера и некубической формы. Рис. 1 иллюстрирует вертикально секущий разрез через смоделированный резервуар с вертикально организованным гридом. Из-за искривлений, вызванных вариациями размеров ячеек, песчаный горизонт, хотя и одинакового размера в пространстве осаднения, не имеет таких же размеров в текущем географическом пространстве ( $x, y, z$ ). При сопоставлении созданный грид, использующий преобразование UVT (или UVT грид), не показывает нарушения объемов.

В таком случае действительный объем пород резервуара будет либо недооценен, либо переоценен, в зависимости от их положения относительно неперпендикулярных разломов. Такая систематическая ошибка может оказать сильное влияние на оценку объемов на месте залегания и соответствующих запасов, так как вариации латерального и вертикального распространения песчаного горизонта будут влиять на связность резервуара, оказывая, таким образом, влияние на поток флюидов, проходящий через резервуар.

### Новые виды гридов

Чтобы избежать недостатков подхода с вертикально организованным гридом, описанного выше, было введено несколько новых видов гридов, в которых колонки ячеек в направлении ( $k$ ) позволяют пересекать разломы. Например:

#### A-Pillar Grid



#### B-UVT Grid



Рис. 1 (А) вертикальный разрез вертикально организованного грида и грида (В) UVT. Непрерывность песчаных горизонтов нарушена в вертикально организованном гриде.

- В первом типе, представленном на рис. (2)-А, ячейки еще ограничены для того, чтобы они имели шестигранную форму. Чтобы сохранить кубическую форму, поверхности разломов аппроксимируются ступенями.
- Во втором типе, представленном на рис. (2)-В, ячейки больше не ограничены. Эти гриды создаются, используя «срезающий» горизонтальный 2D грид, пересечения которого с горизонтами и разломами создают многогранные ячейки. Мы можем назвать этот грид ХУТ грид.

Эти новые гриды в первую очередь предназначены для задач имитации линий токов. С этой целью и, как требуется большинством моделей, имитирующих промышленные потоки, вычисление коэффициента передачи (проницаемости), предназначенного для центров «трубчатой» связи двух соседних ячеек, должно быть, по возможности, ортогональным к единой поверхности, разделяющей эти ячейки.

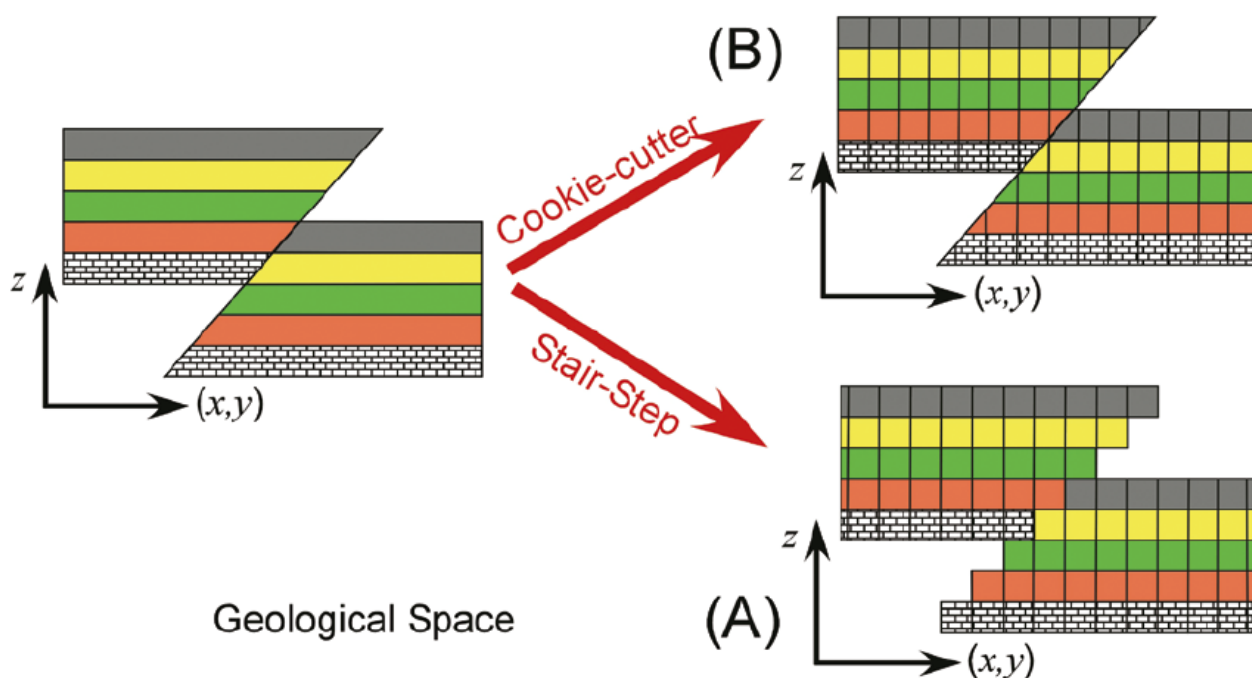
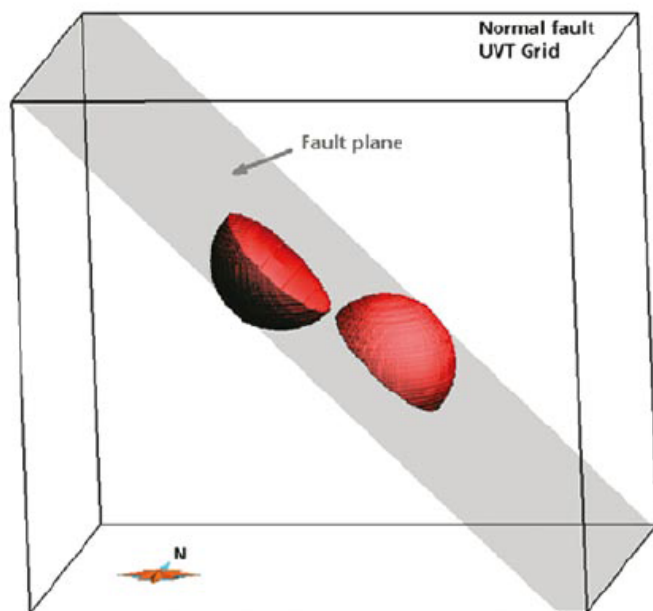


Рис. 2 Представление «ступенчатого» (А) и «ХУТ» гридов по Mallet (2008).

## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

A: UVT Grid



B: XYT Grid

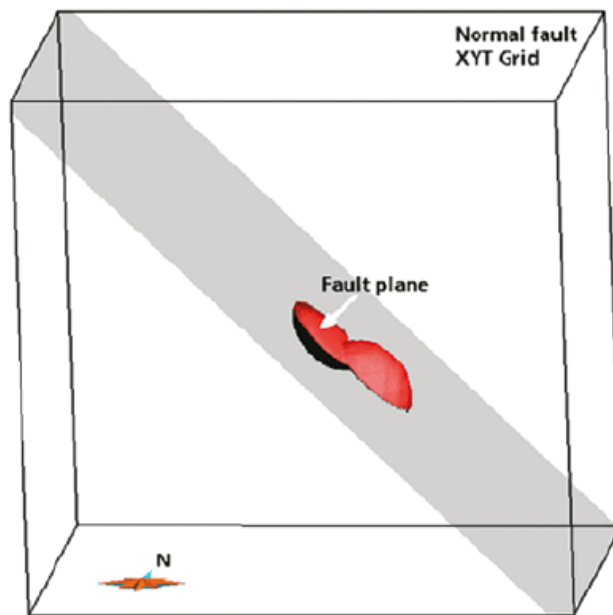


Рис. 3 ICT анализ, проведенный на UVT гride и XYT гride – случай нормального разлома. Объем палео-сферы не сохранился в гride «XYT».

- В случае ступенчатых гридов ортогональность трубки/поверхности всюду обеспечена в явной форме, даже рядом с разломами: как следствие, коэффициент передачи может быть корректно вычислен.
- В случае «XYT» гридов, ортогональность трубки/поверхности всюду обеспечена в явной форме, кроме окрестностей разломов. Если трубка срезана разломом, чтобы вычислить коэффициент передачи, обычная плоскость (разлома) может быть заменена ее проекцией виртуальную плоскость, ортогональную трубке: отметим, что используя , таким образом, использование этого «хитрого» приема эквивалентно созданию «виртуального» ступенчатого грида.

Необходимо отметить, что в противоположность ступенчатым гридам, везде имеющим квази-кубическую форму, вблизи разломов гриды срезанной формы создают сложные многогранные ячейки, которые могут внести множество проблем при моделировании потока.

Другие виды гридов с анализом их доводов за и против представлены более подробно в работе Mallet (2008).

#### Опасный побочный эффект неактивных и неработающих ячеек

В присутствии невертикальных разломов, любая индексация (i, j, k) ячеек может привести к резким искажениям при вычислении стратиграфических интервалов. Этот недостаток, наблюдаемый со всеми видами гридов, часто приводит к ошибкам моделирования, которые могут иметь глубокие последствия при оценке извлекаемых объемов.

#### Анализ индекса связности (ICT)

Когда используется грид с ячейками, индексированными (i, j, k), он может быть легко проанализирован, если эта индексация может быть использована для геостатистических приложений. Как проиллюстрировано на рис. 3 и 4, это можно осуществить следующим образом:

1. Сформировать грид с горизонтальными границами и невертикальным разломом, срезающим всю область под углом 45° со смещением приблизительно на 1/3 от размера грида по вертикали;

2. Выбрать ячейку b рядом с невертикальным разломом (в литологическом пространстве);
3. Выбрать объем «n» такой, что ячейка с индексами  $\{i(b) \pm n\}$ ,  $\{j(b) \pm n\}$  и  $\{k(b) \pm n\}$  все еще принадлежит гриду;
4. В каждой ячейке грида поместить объем D(a,b), вычисленный с помощью уравнения (2) с параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , и  $\lambda$ , равными 1; а затем
5. Показать область объема, для которого D(a,b) меньше или равно «n».

При достаточно большом «n» размер V(n), полученный таким образом, должен быть близок к объему сферы с радиусом «n». Если это не так, тогда этот грид не может быть использован для задач геостатистического моделирования свойств. Рис. 3 и 4 показывают анализ ICT, проведенный на обоих гридах XYT и UVT.

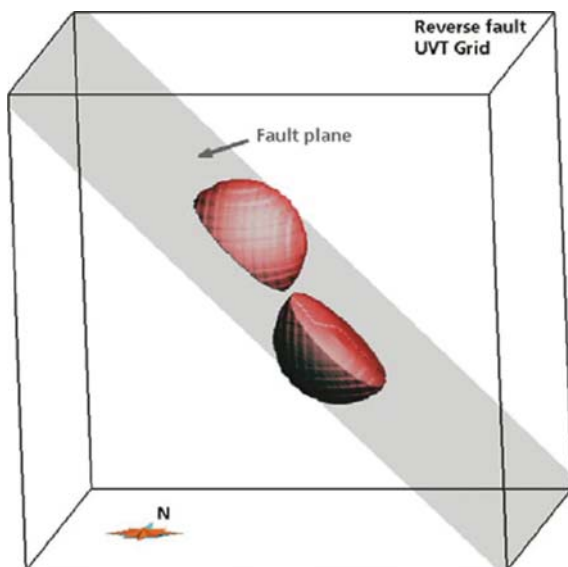
#### Применение UVT- преобразования

Как выше показано, в присутствии разломов, неортогональных слоев, невозможна индексация (i, j, k), которая бы позволила рассчитать стратиграфические интервалы по уравнению (2). Следовательно, решение этой проблемы состоит только в использовании уравнения (1) и вычислении расстояния d(a,b) как функции палеокоординат центров (a) и (b) любых пар ячеек. Для этой цели необходимо определить функции u(x, y, z), v(x, y, z) и t(x, y, z), преобразующие любую точку геологического пространства с координатами (x, y, z) в точку (u, v, t) в параметрическом (литологическом) пространстве.

$$(x,y,z) \rightarrow (u,v,t) \quad (4)$$

Такое преобразование называется UVT-преобразованием. Предполагая структурный тектонический вид минимальной деформации, можно показать, что функции u(x, y, z), v(x, y, z), и t(x, y, z) должны по возможности удовлетворять следующему системам объединенных нелинейных дифференциальных уравнений, где (grad f) принимается для градиента f(x, y, z) и точечный символ «.» принимается для точечного результата вектора:

A: UVT Grid



B: XYT Grid

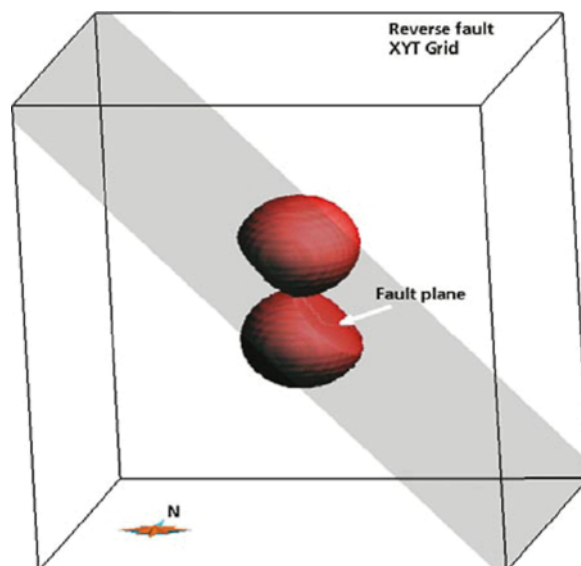


Рис. 4 ICT анализ, проведенный на UVT гриде и XYT гриде – случай инверсионного разлома. Объем палео-сферы увеличен в «XYT» гриде.

- 1)  $\text{grad } u \cdot \text{grad } v \simeq 0$
- 2)  $\text{grad } t \cdot \text{grad } u \simeq 0$
- 3)  $\text{grad } t \cdot \text{grad } v \simeq 0$
- 4)  $\|\text{grad } u\| \simeq \|\text{grad } v\| \simeq 1$

(5)

Чтобы гарантировать геологическую устойчивость моделей, могут быть добавлены оптимальные ограничения, например, принять во внимание тектонический тип разломов (например, нормальный или реверсивный). Для представления по глубине нижеприведенных концепций UVT-преобразования, читатель отсылается к работам (Mallet, 2004) и (Mallet, 2008).

- Существует бесконечно удаленная точка функций  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$ , и  $t(x, y, z)$ , соответствующая ограничениям, определенным уравнением (5), и должны быть установлены следующие данные, чтобы удалить любую неопределенность:
- Набор точек  $\{S(t_1), S(t_2)\}$ , расположенных на границах раздела  $\{H(t_1), H(t_2)\}$  должен быть обеспечен их соответствующими временами  $\{t_1, t_2\}$ , упорядоченными таким образом, что  $H(t_i)$  была отложена в геологическое время  $t_i$ ;
- Точка приведения  $(x_0, y_0, z_0)$  должна быть выбрана в качестве начала палео-координат  $(u, v)$ :

$$u(x_0, y_0, z_0) = v(x_0, y_0, z_0) = 0 \quad (6)$$

- Должно быть установлено направление  $(\text{grad } u)$  в точке приведения  $(x_0, y_0, z_0)$ .

На рис. 5 приведен пример UVT-преобразования в присутствии сложной геологической структуры с так называемыми «X», «Y», и «L» разломами:

- В параметрическом (литологическом) пространстве изображения границ раздела представляют совершенно горизонтальные плоскости и разломы исчезли.
- Обратное UVT-преобразование разворачивает любой блок литологического пространства в сеть шестигранных ячеек в геологическом пространстве: отметим, что эти ячейки могут быть разбиты разломами.
- В геологическом пространстве  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$  и  $t(x, y, z)$  функции прерываются на разломах, и для любого геологического времени  $t_i$ , изолинии поверхности  $t(x, y, z) = t_i$  представляют горизонт  $H(t_i)$ . Следовательно,  $t(x, y, z)$  виртуально моделирует безграничность горизонтов, которые могут быть извлечены для любого геологического времени.
- В результате решения уравнений (5-1), (5-2) и (5-3) в геологическом пространстве и для любых палео-географических координат  $(u_i, v_j)$ , изолинии поверхностей  $u(x, y, z) = u_i$  и  $v(x, y, z) = v_j$  взаимно ортогональны, а также ортогональны границам раздела.
- В результате решения уравнения (5-4) структурные интервалы вдоль границ раздела не искажены.

Два последних последних пункта являются самыми важными, так как они обосновывают использование параметров  $(u, v, t)$ , определенных для вычисления корректных стратиграфических интервалов без использования грида, а следовательно, не требующие искусственного введения неактивных ячеек.

#### Применение UVT- преобразования

UVT-преобразование может быть использовано во множестве приложений. Например:

- Вместо классических индексов  $(i, j, k)$ , каждая ячейка грида, покрывающего геологическую область, определяется палеокоординатами  $(u, v, t)$  ее центра. Это дает возможность применять геостатистические методы на гриде любого типа, даже с неопределенными многогранными гридами.
- Как предполагается из рис. 5, литологическое пространство может быть покрыто регулярным



## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

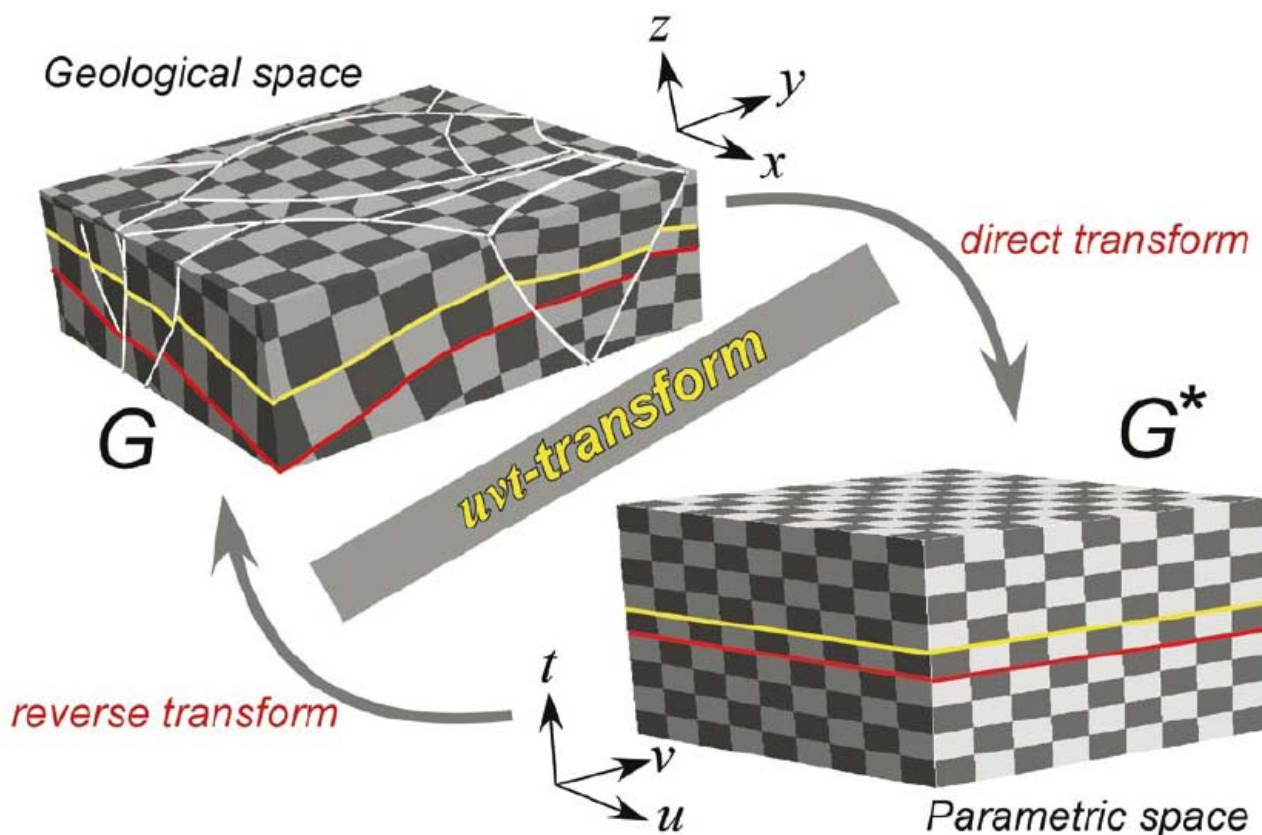


Рис. 5 UVT-преобразование сложно нарушенного резервуара с «x2», «Y» и «λ» разломами. Двухцветное (чернобелое) изображение использовано для представления изменчивости  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$ , и  $t(x, y, z)$  функций (привилегия программного обеспечения Paradigm SKUA).

прямолинейным гридом  $G^*$ , параллельным осям ( $u$ ), ( $v$ ) и ( $t$ ) и принятым в качестве отслеживания для моделирования статистических петрофизических свойств резервуара:

- а) Использует UVT-преобразование непосредственно для перенесения данных, наблюдаемых по каротажным диаграммам в геологическом пространстве, в литологическое пространство;
- б) Выполняет проведение геостатистического моделирования на гриде  $G^*$ , покрывающем литологическое пространство;
- с) Использует обратное UVT-преобразование, чтобы непосредственно изобразить геологическое пространство или любую ячейку грида  $G$  в геологическом пространстве со свойствами, выработанными на гриде  $G^*$  (например, см. рис. 6).

#### UVT-преобразование в сравнении с 3D сбалансированной разверткой

Изображение *всех* горизонтов, имеющих горизонтальные плоскости, в параметрическом пространстве ( $u, v, t$ ), представляющее изображение резервуара в параметрической области, соблазнительно провести как 3D сбалансированную развертку. Существует два основных различия между UVT-преобразованием и 3D сбалансированной разверткой:

- Первое, в параметрической области ( $u, v, t$ ) по сравнению с восстановленной геологической моделью, размер по вертикали ( $t$ ) является не длиной, а геологическим временем: как следствие, все горизонты в параметрической области параллельны горизонтальным поверхностям (см. рис. 5).
- Второе, в параметрической области все горизонты сразу выровнены: это отличается от методик восстановления, где горизонты выровнены по времени.

#### Практические стороны UVT-преобразования

С теоретической точки зрения UVT-преобразование обеспечивает самую строгую поддержку, при которой проводится геостатистическое моделирование свойств резервуара по современному, существующим в больших количествах алгоритмам. Реализованное как основа программы Paradigm SKUA Suite, UVT-преобразование удалило препятствия традиционного моделирования резервуара, облегчая истинное 3D решение и, следовательно, гарантируя согласованное объединенное представление земли по сейсмической и геологической интерпретации при моделировании потоков.

Другие значительные преимущества использования UVT-преобразования включают:

- Облегчает создание сложной структуры резервуара, включающей разломы любых конфигураций, стратиграфический тип, стратиграфическое несогласие и в особенности чрезвычайно тонкие интервалы в резервуаре.

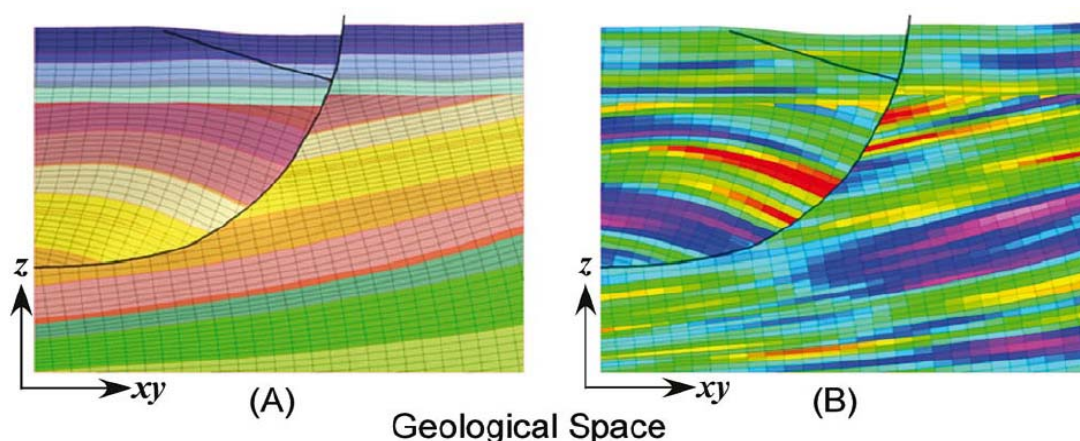


Рис. 6 Приложение UVT-преобразования к (A) моделированию стратифицированного резервуара (UVT grid) и (B) проницаемости. Черные линии представляют пересечение (u) и (t) с вертикальным сечением: отметим регулярность параметризации (u, v, t), которая гарантирует корректное вычисление стратиграфических интервалов.

- Использование всех типов интерпретации (сейсмической и геологической) данных. UVT-преобразование, основанное на моделях, не требует каких-либо упрощений или удаления данных, которые могут представлять важную часть любого исследования резервуара.
- Способность создавать модели с очень ограниченным вмешательством пользователя (One click modelling – моделирование одним щелчком), однако, дающая возможность для ограничения информации по редко существующим или достоверным, таким как вертикальный разлом и сдвиговое смещение.
- Возможность точно создавать grids моделей потока со ступенчато представленными разломами и точное картирование свойств резервуара с изменением масштаба, которое требуется ввести по геостатистическому подтверждению в модель

потока. Эти типы grids позволяют сохранять целостность структуры резервуара, кроме того, являются оптимальными для численного моделирования флюидного потока (Gringarten et al., 2008).

### Примеры конкретных случаев

1 – Сложная область на рис. 7, расположенная в региональном бассейне, который испытал растяжение, левосторонний сдвиг в течение рифтовой стадии, который позднее реактивировался как правосторонний сдвиг сжатия.

Создать полную модели резервуара для этого частного месторождения, используя традиционную методологию колонок, невозможно.

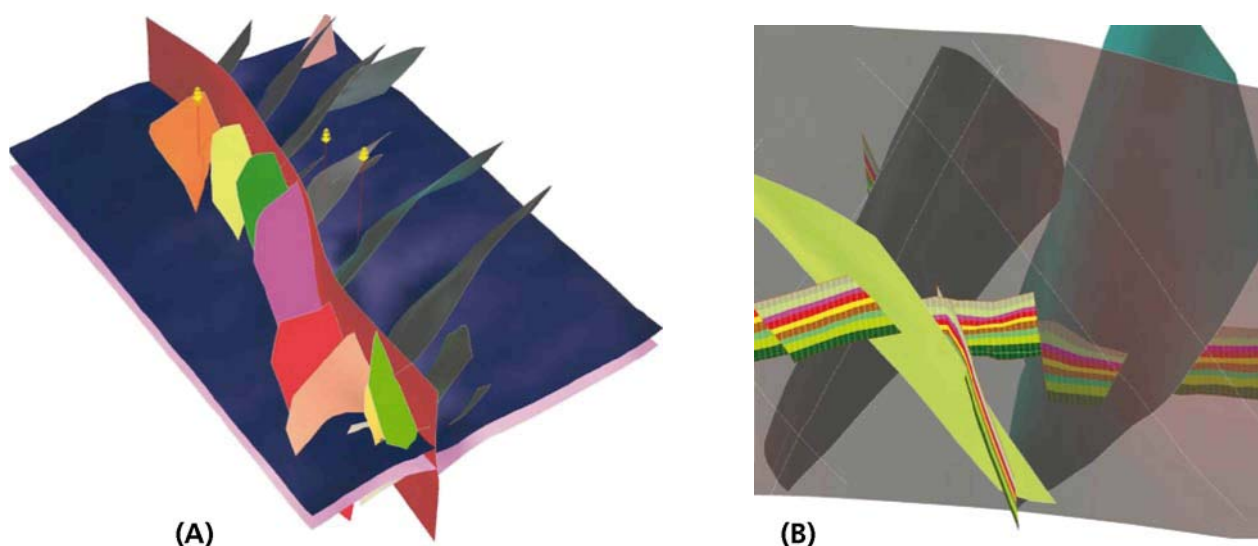


Рис. 7 (a) сложная система рифтового разлома, (b) соответствующая геологическая модель, содержащая укомплектованные перекрывающие и подстилающие породы.

## Геофизика коллектора и инженерная геофизика

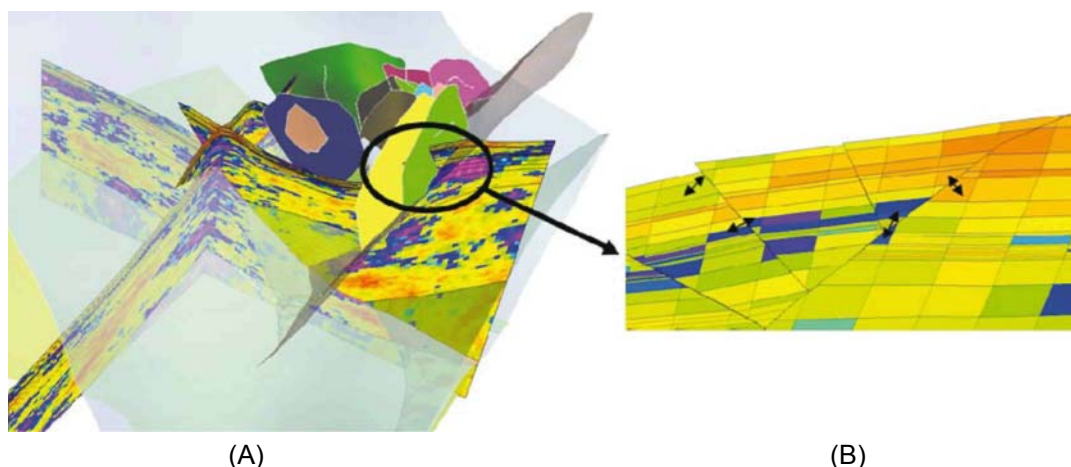


Рис. 8 (А) 3D геостатистическое моделирование пористости в интенсивно сжимаемой структурной среде, (В) обычные объемы пород расколоты разломом.

Это очень сложно, даже если модель содержит только ограниченное количество сейсмически опознаваемых разломов (22) и по этой причине на первый взгляд, кажется, просто ее построить. Обычно процесс может быть очень длительным и трудоемким, требующим многих моделей, соединенных вместе, и упрощения структурной модели, с тем, чтобы сделать некоторые разломы вертикальными, или даже удалить их.

Одним из основных преимуществ UVT-преобразования является то, что оно может быть рассчитано без проблем, которые могут быть вызваны сложностью структурной обстановки. Условие ограниченного вмешательства пользователя дает возможность создать полностью герметизированную структуру (рис. 7а). При UVT-преобразовании все горизонты (границы раздела) моделируются одновременно, согласно информации по стратиграфической колонке, таким образом, всегда гарантируя, что они (границы) согласованы друг с другом. Модель может включать геологическую колонку от дна воды до фундамента (рис. 7б). Разрез, приведенный на рис. 7б, соответствует значениям изолинии  $u$  и  $b$  uvt-параметризации; эти разрезы не совершенно плоские и существуют латеральные смещения, которые представляют пространственное перемещение вдоль разломов, гарантирующее соответствующую пространственную корреляцию характеристик осадконакопления.

2 – Рис. 8а показывает модель резервуара, построенную в интенсивно сжимаемой среде, включающей множество разломов Y-конфигурации. Рис. 8а также показывает стохастическое моделирование пористости, а рис. 8б подчеркивает, как обычные блоки горных пород раскалываются разломами, при этом сохраняя их стратиграфическую (литологическую) непрерывность.

### Выводы

Чтобы было возможно грубое геостатистическое моделирование свойств резервуара, введена новая технология, так называемое UVT-преобразование. Оно позволяет создавать геологические структуры любой сложности по мере поступления данных и гарантирует согласованное картирование между положением осадочных фракций в настоящее время и их положением в исходном месте осаднения, параметрическом пространстве. Эта технология обеспечивает истинный 3D подход и открывает новые пути для множества аспектов моделирования подземного резервуара.

### Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Paradigm за разрешение опубликовать эту статью.

### Библиография

- Goovaerts, P. [1997] *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press. Gringarten, E., Arpat, B., Haouesse, A., Dutranois A., Deny, L., Jayr, S.,
- Tertois A.L., Mallet, J.-L., Bernal, A., Nghiem, L. (2008) New Grids for Robust Reservoir Modeling. *SPE ATCE 2008*, Denver, Colorado, USA.
- Mallet, J.-L. [2004] Space-time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical Geology*, 36(1), 1-32.
- Mallet, J.-L. [2008] *Numerical Earth Models*. EAGE Publications, 147 pp.
- Wheeler, H.E. [1958] Time-Stratigraphy. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 42(5), 1047-1063.