

Системы геологического моделирования семейства DV: DV-Discovery, DV-Geo, DV-SeisGeo

Кашик А.С., Гогоненков Г.Н., Билибин С.И., Перепечкин М.В., Ушатов Е.Ю., Жемжурова З.Н., Ковалевский Е.В., ОАО "ЦГЭ", г.Москва

Введение

Геологическое компьютерное 3D моделирование – новое направление в нефтяной индустрии, порожденное развитием вычислительной техники. Сегодня геологи, геофизики и разработчики ежедневно и непосредственно на своих рабочих местах используют цифровые геологические модели – численные представления реальных геологических объектов (осадочных бассейнов, месторождений, природных резервуаров нефти и газа), выполненные на том уровне абстракции, который достаточен для решения поставленной задачи. Какой именно задачи? В процессе поиска, разведки и разработки месторождений нефти и газа специалисты решают не одну, а некоторую иерархическую последовательность задач, и на каждом уровне иерархии используются свои модели.

Верхний уровень в иерархии моделей является региональным. Здесь создается модель осадочного бассейна (протяженностью в тысячи километров), которая должна предсказать, на каком участке региона и на каком горизонте имеются условия для накопления углеводородов. Известно, что для этого требуется наличие пластов коллектора, перекрытых непроницаемыми покрывками. Исходными данными для такого рода моделей являются региональные сейсморазведочные профили, опорные и параметрические скважины, структурно-тектонические карты и многое другое.

Следующий уровень в иерархии моделей является поисковым. Модель этого уровня строится уже не для всего региона, а только для его перспективного участка (протяженностью в сотни километров), выделенного на предыдущем этапе. Задача моделирования состоит теперь в том, чтобы найти на целевом горизонте структурные поднятия или неструктурные ловушки, которые могут аккумулировать нефть и газ. Для решения указанной задачи выполняются поисковые исследования по сети сейсмических профилей 2D. По результатам интерпретации этих данных конструируется трехмерная геологическая модель, отображающая рельеф целевого горизонта и крупные тектонические нарушения. Перспективные объекты, обнаруженные с помощью полученной модели, проверяются поисковым бурением. Скважина устанавливает наличие нефти и газа, а также дает первые сведения о литологии и коллекторских свойствах продуктивного пласта. На основании поисковой модели оцениваются ресурсы углеводородов.

В случае открытия месторождения поисковый этап сменяется разведочным. Он касается уже только конкретного месторождения (если мы продолжаем говорить о протяженности, то это порядка десяти километров). Названный этап включает выполнение сейсмических наблюдений 3D и бурение группы разведочных скважин. В результате этих работ получают данные для построения действительно трехмерной детальной геологической модели. Тем самым осуществляют переход на следующую, третью ступень в иерархии моделей, на которой точность прогноза коллекторских свойств и насыщения существенно возрастает. На основании

детальной геологической модели выполняют подсчет запасов и составляют проект разработки.

Дальнейшее уточнение геологической модели производится в ходе разработки. Во-первых, модель уточняют в результате бурения эксплуатационных скважин, поскольку в каждой из них выполняются исследования методами ГИС. Наиболее точную модель мы получаем на поздних стадиях разработки, когда число эксплуатационных скважин составляет многие десятки и сотни. Во-вторых, модель уточняется по данным о продуктивности эксплуатационных скважин. Каким образом? Модель пересчитывают на крупную сетку и подают на вход гидродинамического симулятора. Сравнивая модельные и реальные данные о продуктивности скважин, определяют различия. Далее в модель вносят поправки, стараясь эти различия устранить. Данная процедура называется адаптацией модели к истории разработки. В случае успешной адаптации модель можно использовать для выбора наиболее эффективного режима добычи и прогнозирования кривых продуктивности скважин.

Современные геологические модели интегрируют огромные объемы сейсмических и скважинных данных. Для построения таких моделей используют мощные компьютеры и большие (иногда очень большие, возможно – крупнейшие из существующих) программные комплексы – системы геологического моделирования. Где создаются эти системы, кто их разрабатывает?

Системы геологического моделирования являются наукоемкими программными продуктами высокого уровня сложности. Их разрабатывают крупные специализированные компании в сотрудничестве с университетами, государственными и частными научными центрами. Лучшие мировые производители названных систем – компании: Schlumberger, Paradigm, Landmark, Roxar, SMT. Россию в этой мировой таблице о рангах представляет Центральная геофизическая экспедиция (ЦГЭ). Мы придаем большое значение тому обстоятельству, что Экспедиция, созданная в 1967 г. как главный в СССР методический центр обработки цифровой сейсмике и каротажа, входит сегодня в число ведущих мировых разработчиков систем геологического моделирования, воплощая в эти системы знания и опыт, накопленные в нашей стране.

Специализируясь в области геофизического сервиса, ЦГЭ предоставляет российским и зарубежным нефтяным компаниям широкие услуги в сфере геологического моделирования – обработку и интерпретацию сейсмике 2D и 3D, интерпретацию данных ГИС, построение геологических моделей месторождений, подсчет запасов, проектирование разработки, гидродинамическое моделирование. Как подытожить, ЦГЭ имеет в своем распоряжении программные системы Petrel, Tigress, IRAP RMS, More и другие. Однако главными рабочими инструментами в ЦГЭ являются программные системы собственного производства. В первую очередь это системы семейства DV (разработанные совместно с компанией ПИК – Петролеум инжиниринг и консалтинг). В семействе DV входят

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ

три системы - сейсмической интерпретации DV-Discovery, геологического моделирования DV-Geo и сейсмогеологического моделирования DV-SeisGeo. Название DV есть сокращение от Dynamic Vision. Системы DV неоднократно описывались - смотрите, например, работы предыдущих лет [1, 2, 3, 4, 5]. Но поскольку системы DV непрерывно развиваются, считаем, что пришло время сделать это еще раз.

Сейсмическая интерпретация в системе DV-Discovery

Система DV-Discovery предназначена для интерпретации сейсмических данных 2D и 3D. Она применяется для решения двух типов задач: первая - создание поисковых моделей по данным сейсмике 2D, вторая - создание детальных моделей резервуаров по данным сейсмике 3D. Исходными данными для системы DV-Discovery являются сейсмические профили или кубы сейсмотрасс после суммирования и миграции, а также данные ГИС. Система выполняет следующие функции:

- интеграцию сейсмических наблюдений 2D и 3D;
- трехмерную интерпретацию профильных данных - 2.5D;
- ручную и автоматическую корреляцию отражающих горизонтов;
- пространственное картирование тектонических нарушений;
- привязку отражающих горизонтов к скважинным данным;
- подбор скоростной модели среды, пересчет отражающих горизонтов из временной вертикальной шкалы в глубинную, построение карт изохрон и глубин;
- седиментационный анализ;
- палеотектонический анализ;
- расчет атрибутов сейсмической записи;
- дообработку сейсмограмм (фильтрацию, устранение помех и т.д.);
- расчет синтетических сейсмограмм и оценку формы сейсмического сигнала методом стратиграфической деконволюции;
- прогноз коллекторских свойств горных пород по скважинным данным и сейсмическим атрибутам;
- псевдоакустическое преобразование и стохастическую инверсию.

Главным достоинством DV-Discovery являются встроенные средства чрезвычайно быстрой динамической визуализации. Лучше всего их возможности проявляются в ходе работы с кубами сейсмических данных. Динамическая визуализация играет ключевую роль при поиске структурных ловушек, при корреляции отражающих горизонтов, при трассировании тектонических нарушений. Пример корреляции отражающего

Рис. 1. Корреляция горизонта и трассирование нарушений в DV-Discovery

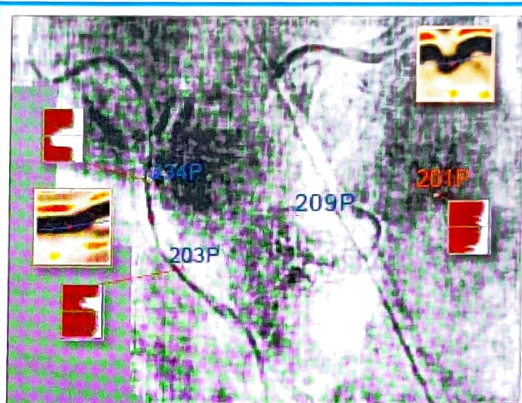


Рис. 2. Седиментационный слайс. Четко выделяются палеоканалы и малоамплитудные тектонические нарушения. В наложенных окнах визуализированы интервалы каротажных кривых по скважинам и фрагменты вертикальных сейсмических разрезов

горизонта и трассирования тектонических нарушений показан на рис. 1.

К числу особых достоинств системы DV-Discovery относятся инструменты седиментационного и палеотектонического анализа. Седиментационный слайс представляет собой сечение куба сейсмических амплитуд поверхностью, делящей интервал между откоррелированными отражающими границами в одной пропорции. Такой слайс можно рассматривать как стратиграфическую поверхность. Этим достигается устранение структурного (тектонического) фактора, что позволяет увидеть особенности строения локальных тел (рис. 2). Важным элементом седиментационного анализа является возможность наложения на главное изображение малых окон с фрагментами вертикальных разрезов. Последние облегчают геологическую идентификацию седиментационных объектов на вертикальных разрезах.

Разработанная технология позволяет эффективно извлекать из сейсмического куба информацию о палеогеографии - погребенных каналах, локальных телах, малоамплитудных нарушениях. Кроме того, она позволяет увидеть, какое влияние на

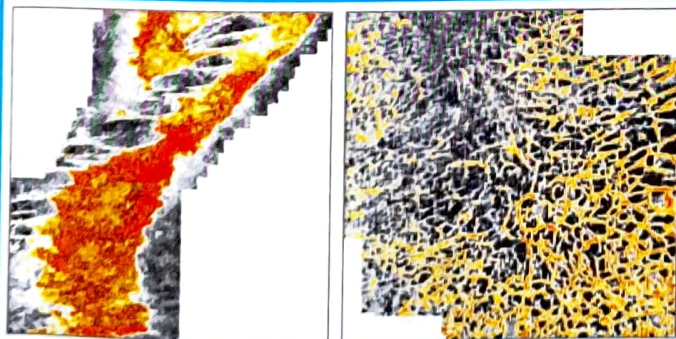


Рис. 3. Седиментационные слайсы. Слева - газовая залежь и зона тектонических нарушений. Справа - система полигональных нарушений

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ОБЕСПЕЧЕНИЕ

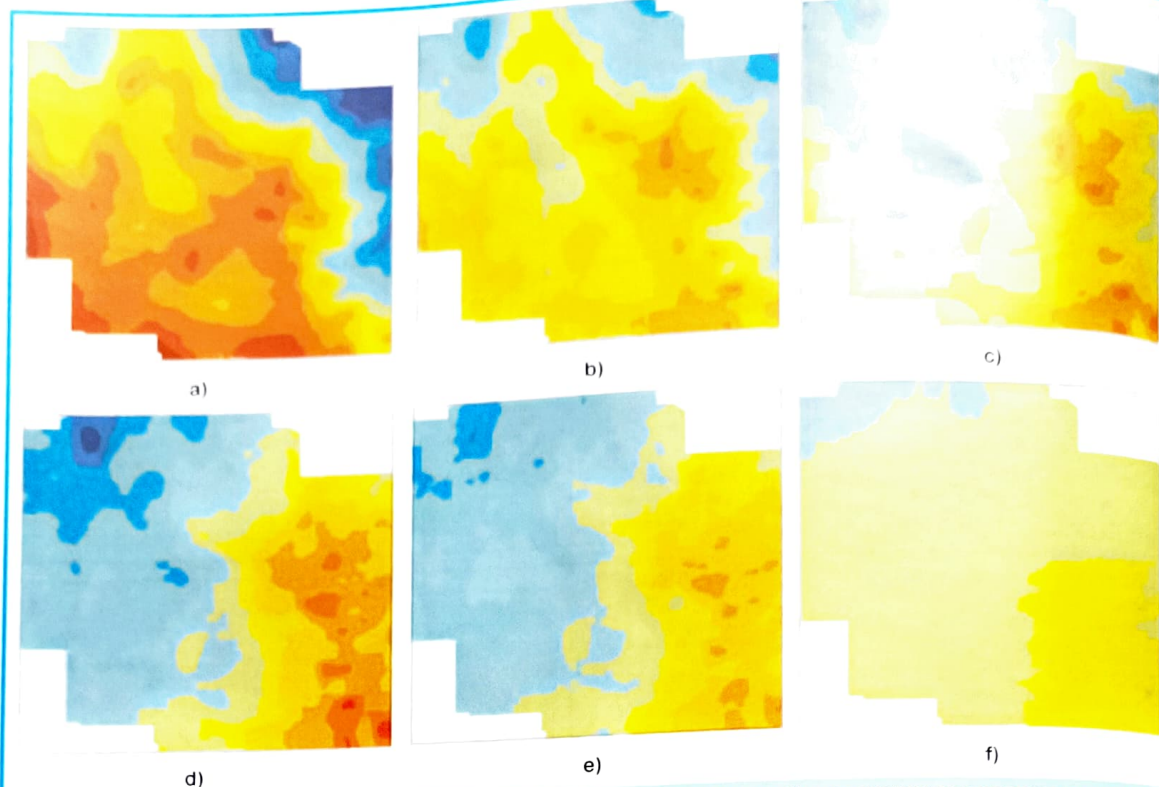


Рис. 4. Палеорекострукция структурного плана целевого горизонта. Красный цвет палитры соответствует приподнятым участкам. Последовательно: а - современное состояние, б - третичный период, с - верхний мел, д - средний мел, е - нижний мел, ф - юрский период

динамику сейсмической записи оказывает залежь углеводородов (рис. 3).

Палеотектонический анализ в DV-Discovery реализует следующую идею. Широкий класс седиментационных поверхностей изначально формировался в субгоризонтальных условиях. Возьмем в качестве объекта анализа некоторый нефтеносный горизонт. Если мы будем поочередно выравнивать все седиментационные поверхности, начиная от кровли выбранного горизонта и до самого верха куба, то увидим, как менялась форма нашего нефтеносного горизонта (какие происходили наклоны, искривления, изломы) с момента его образования и до настоящего времени. В результате такого анализа появляется возможность прогнозировать зоны аномальной трещиноватости, пути миграции, время и области скопления углеводородов (рис. 4).

Относительно недавно в систему включены средства, обеспечивающие трехмерную интерпретацию профильных данных. Методика создания кубов из профилей 2D основана на том же принципе, что и седиментационный анализ. Отличительной особенностью разработанной технологии является то, что она не накладывает условий на сеть профильных данных и не требует их специальной предварительной обработки.

Геологическое моделирование в системе DV-Geo

Система DV-Geo предназначена для построения детальных трехмерных геологических моделей и подсчета запасов. Наиболее эффективной она является при построении моделей по данным ГИС на площадях, разбуренных эксплуатационной сеткой скважин. Вместе с данными ГИС могут использоваться сейсмические данные о структуре и свойствах объекта (отражающие горизонты, разломы, кубы

параметров, карты атрибутов), импортированные из DV-Discovery или других интерпретационных сейсмических систем. В ходе создания и документирования трехмерной геологической модели система DV-Geo позволяет выполнять следующие действия:

- анализ и верификацию загруженных данных;
- ручную и автоматическую корреляцию разрезов скважин;
- интерпретацию и увязку керна;
- интерпретацию данных ГИС;
- обоснование флюидных контактов;
- статистическое исследование данных;
- построение структурного каркаса и 2D моделирование;
- трехмерное литологическое и петрофизическое моделирование;
- анализ и картирование трехмерных объектов;
- подсчет запасов;
- подготовку отчетной документации;
- ремасштабирование трехмерной геологической модели для передачи в систему гидродинамического моделирования;

При построении геологической модели возможно применение как детерминированного, так и стохастического подходов. В обоих случаях может использоваться принципиальная модель. Последняя представляет собой карты эффективных толщин и петрофизических свойств, составленные геологом по имеющейся информации, но с привлечением его субъективных суждений о генезисе геологического объекта. В процессе трехмерной интерполяции данных принципиальная модель может быть задана как обуславливающий фактор. Данный подход позволяет геологу контролировать прогнозирование свойств в пространстве 3D. Вторая функция принципиальной модели - она помогает согла-

совывать результаты моделирования на различных этапах. В результате упрощается подготовка отчетной документации и облегчается защита модели на экспертном совете.

В инструментарий DV-Geo входит широкий набор алгоритмов двухмерного и трехмерного моделирования, которые представлены далее в соответствии с основными этапами технологического процесса.

Структурное моделирование:

- весовая интерполяция;
- сплайновая интерполяция;
- 2D кригинг;
- 2D последовательное гауссовское стохастическое моделирование.

ЛитоLOGическое моделирование:

- весовая интерполяция;
- 3D последовательное индикаторное стохастическое моделирование, в том числе с использованием вторичной переменной;
- 3D объектное стохастическое моделирование.

Параметрическое моделирование:

- 3D весовая интерполяция, в том числе с использованием индикаторного куба;
- кригинг;
- 3D последовательное гауссовское стохастическое моделирование, в том числе с использованием вторичной переменной и (или) индикаторного куба;

Все разработанные в DV-Geo алгоритмы учитывают следующие требования:

- возможность работы при неравномерном распределении скважин по площади;
- возможность моделирования с учетом нарушений;
- возможность моделирования латеральной макро анизотропии;
- возможность учета трендовых данных;
- надежная работа при большом числе скважин и дополнительных контрольных точек.

Множество алгоритмов обеспечивает значительную гибкость в поиске решений задач, возникающих по ходу построения геологической модели, при широком разнообразии исходных данных и требований геологов.

В настоящее время большинство работ по подсчету запасов выполняются по детерминированным моделям. В DV-Geo имеются средства для оперативной оценки неопределенности получаемых объемов запасов методом Монте-Карло. По детерминированным поверхностям - кровле пласта и водонефтяному контакту - создается множество их стохастических

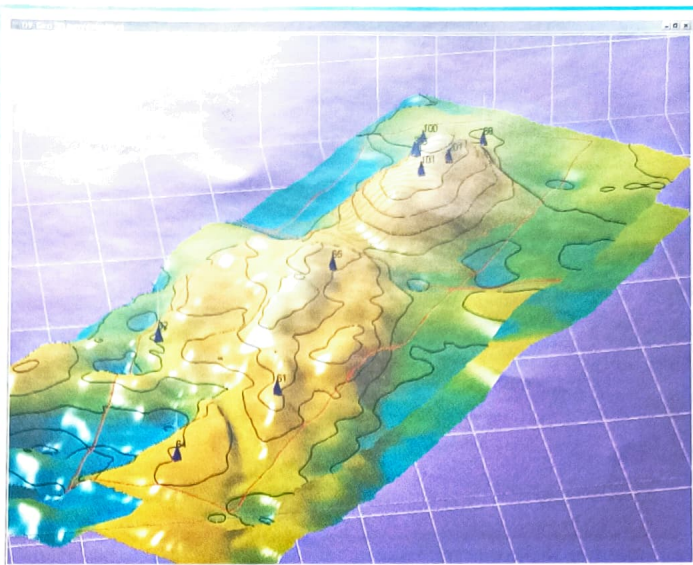


Рис.5. Пример структурного каркаса геологической модели

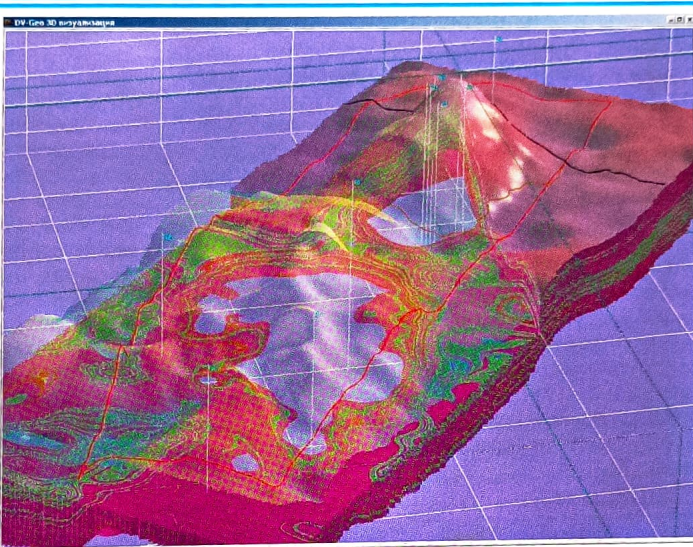


Рис.6. Пример литологической модели

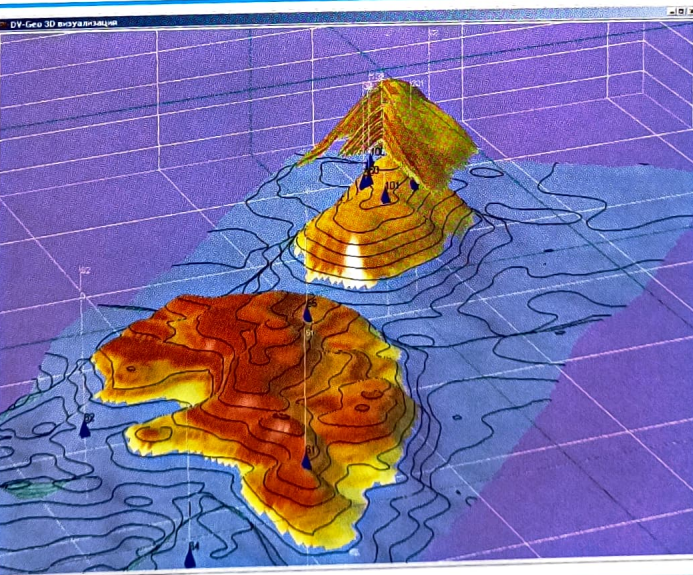
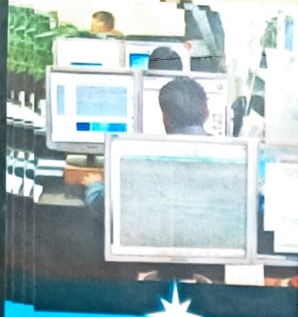


Рис.7. Пример куба одного из подсчетных параметров - нефтенасыщенности

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ



ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

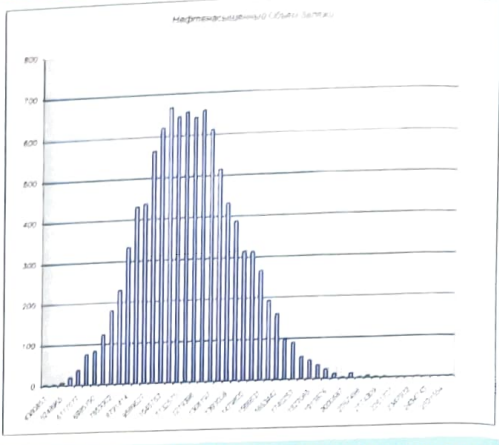
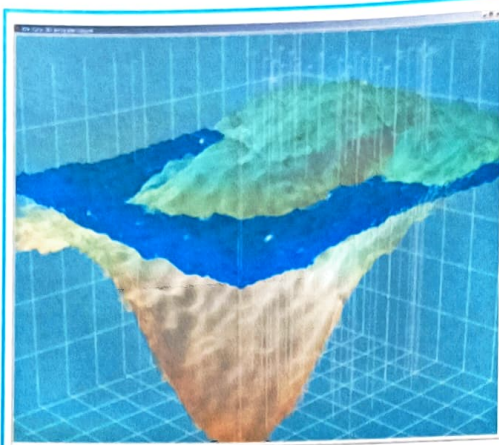


Рис. 8. Слева - реализация кровли резервуара и реализация поверхности ВНК. Справа - распределение значений нефтенасыщенного объема

реализаций, включающих случайные отклонения с заданной вариограммой. Для каждой пары таких реализаций находится площадь и объем залежи. Далее задаются фиксированные распределения значений подсчетных параметров - пористости и нефтенасыщенности. В каждом элементарном объеме нефтенасыщенной части залежи из этих распределений делается случайная выборка, после чего подсчитывается суммарный объем запасов, тысяч тонн. Многократное повторение названного расчета дает возможность построить распределение объема запасов (рис.8). Второе, что позволяет названный подход - построить карту вероятности попадания в нефтяную залежь.

Система DV-Geo предоставляет пользователю возможность проведения различных вычислений, как с объектами исходных данных, так и с результатами геологического моделирования. Для этого в системе реализованы мощный, функционально расширяемый калькулятор объектов (первый уровень) и встроенный интерпретатор языка программирования (второй уровень).

Встроенный язык программирования широко используется. Большая часть обрабатываемых процедур DV-Geo, а также все процедуры импорта и экспорта данных, написаны именно на встроенном языке. Это сотни процедур. Названные коды открыты для пользователя и могут служить образцами для написания (и включения в систему) его собственных процедур. Благодаря этому принципиальному решению доступная пользователю степень владения системой приближается к той, которую имеют ее разработчики. Наличие средств программирования позволяет настраивать DV-Geo на решение любых нестандартных задач, а также использовать ее как творческую лабораторию в ходе научно-исследовательских работ. Моделирование в DV-Geo описывается также в статьях [6, 7].

Сейсмогеологическое моделирование в системе DV-SeisGeo

Задача программного комплекса DV-SeisGeo состоит в том, чтобы объединить функциональные возможности DV-Discovery и DV-Geo на одном рабочем месте. В системе DV-SeisGeo

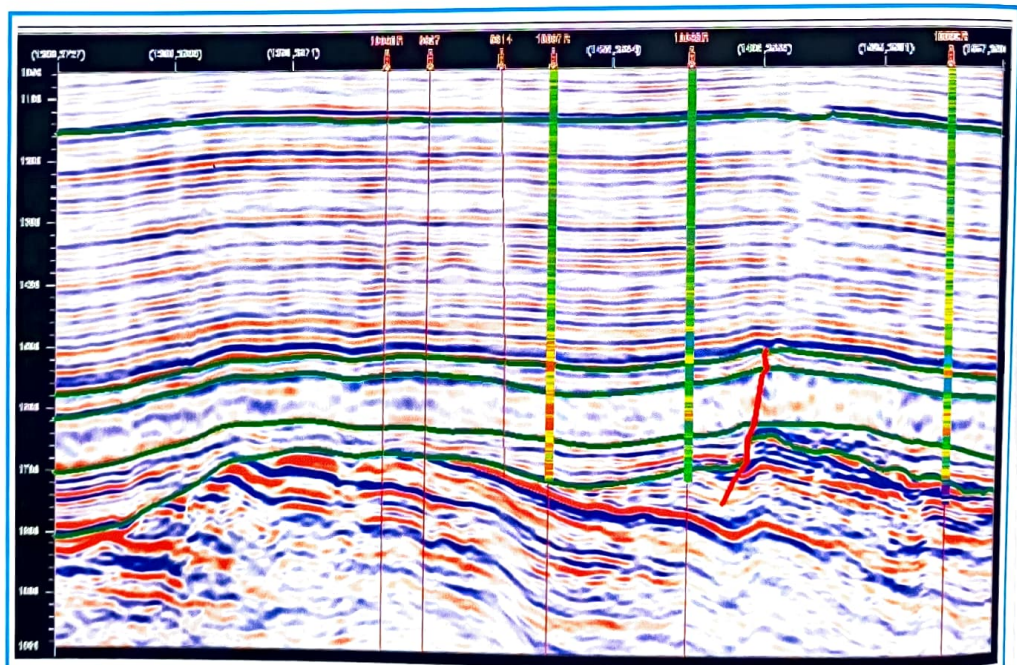


Рис. 9. Сейсмотектоническая модель и значения коэффициента нефтегазонасыщения K_{ng} по скважинным данным. Оранжевый цвет на скважинах соответствует $K_{ng} = 90\%$

пользователь может осуществлять переход от интерпретации данных сейсморазведки к построению геологической модели (рис. 9, 10).

Сегодня дело обстоит так, если пользователь может один работать по всему спектру задач (от сейсмики до геологического моделирования), то ему лучше использовать DV-SeisGeo. Если же интерпретацию сейсмики и геологическое моделирование выполняют два разных специалиста, то им лучше использовать, соответственно, DV-Discovery и DV-Geo.

В основу построения программного комплекса DV-SeisGeo заложены следующие принципы:

- метрика моделей является четырехмерной XYZT. Координата T представляет (в зависимости от задачи) геологическое время, время разработки или сейсмическое время;
- действия пользователя и выполняемые расчеты отображаются на мониторе в динамике формирования конечного результата;
- действия пользователя запоминаются с возможностью последующего воспроизведения. Тем самым решается задача опробования многовариантной интерпретации, оптимизации графов обработки, создания и накопления базы знаний;
- отображение объектов на мониторе производится в привычном для специалистов виде;
- предусмотрена совместная и раздельная визуализация множества различных параметров.

Моделирование в DV-SeisGeo завершается подготовкой данных для гидродинамического моделирования. Возможно также отображение результатов гидродинамического моделирования в четырехмерном пространстве XYZT. Возможности работы с четырехмерными пространствами имеются в каждой системе DV, но в DV-SeisGeo они используются наиболее широко. Моделирование в DV-SeisGeo подробно описано в практическом курсе [8].

Заключение

С использованием программных комплексов DV в ЦГЭ выполнено более сотни проектов по сейсмогеологическому моделированию и подсчету запасов. Среди них - трехмерная модель уникального Самотлорского месторождения. Кроме того, в названное число входит ряд зарубежных проектов - модели месторождений в Казахстане, Узбекистане, Вьетнаме, Алжире, Китае (Ин-Дай) и Ираке. Программные комплексы семейства DV являются базовыми инструментами на большинстве рабочих мест геофизиков и геологов ЦГЭ. Более 200 лицензий на системы DV передано в сторонние компании - в НК «Роснефть», ОАО «ВНИИнефть», ОАО «Самаранефтегаз» и другие.

Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ГКЗ Роснедра) сертифицировала все три системы DV - DV-Discovery, DV-Geo и DV-SeisGeo. ГКЗ рекомендует работающим в России нефтяным и сервисным компаниям использовать системы DV для моделирования и подсчета запасов.

Выполненная во ВНИИГАЗе сравнительная оценка систем DV и ведущих зарубежных про-

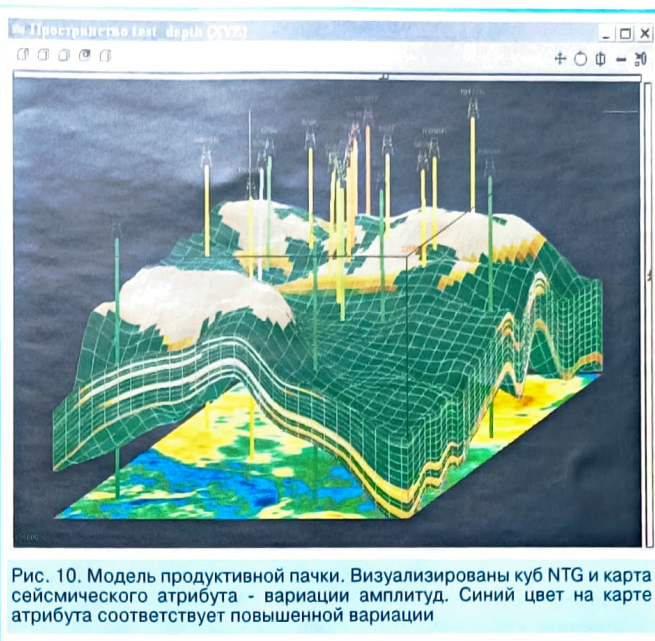


Рис. 10. Модель продуктивной пачки. Визуализированы куб NTG и карта сейсмического атрибута - вариации амплитуд. Синий цвет на карте атрибута соответствует повышенной вариации

граммных комплексов [9] показала, что отечественные программные системы ни в чем существенном зарубежным не уступают, а по некоторым показателям - даже их превосходят.

Литература

1. Кашик А.С., Гогоненков Г.Н. О моделировании крупных, давно эксплуатирующихся месторождений (в порядке обсуждения). «Нефтяное хозяйство», М, 2002, № 7, с. 94-99.
2. Кашик А.С., Билибин С.И., Гогоненков Г.Н., Кириллов С.А. Новые технологии при построении цифровых геологических моделей месторождений углеводородов. «Технологии ТЭК», № 3 2003.
3. Кашик А.С., Кириллов С.А., Ческис В.Л. Решение геологических задач в четырехмерном многопараметровом пространстве. НТЖ «Геофизика», специальный выпуск «Технологии сейсморазведки - II», М, 2003, с. 3-16.
4. Гогоненков Г.Н., Ковалевский Е.В. DV-Geo, DV-Discovery, DV-SeisGeo - системы геологического моделирования, разработанные в России «Недропользование XXI век», № 4, 2007.
5. Гогоненков Г.Н., Ковалевский Е.В. Системы геологического моделирования семейства DV «Нефтяное хозяйство», № 10, 2007.
6. Перепечкин М.В., Билибин С.И. Технологии использования принципиальных моделей при проведении этапа литологического моделирования залежи углеводородов в программном комплексе DV-Geo. МГНЦ, ВНИИ Геосистем, Геоинформатика, №1, 2007.
7. Кашик А.С., Гогоненков Г.Н., Билибин С.И., Перепечкин М.В., Ковалевский Е.В. Система геологического моделирования DV-Geo как пример российского инновационного бизнеса. Экспозиция Нефть Газ, 2011, № 5/Н, с. 11-15.
8. Золоева Г.М., Жемжурова З.Н., Рыжков В.И., Чекунова В.А., Черноглазов В.Н. Практический курс геологического моделирования. М.: Недра, 2010. 319 с.
9. Ларин Г.В., Эффективный компьютерный инструментарий геолога и геофизика при изучении нефтегазового месторождения // Геофизика, 2010, №3, с. 3-15.