

Адаптация модели к истории разработки методом EnKF на основе программной системы DV-Geo

Ковалевский Е.В., к.ф.-м.н., ведущий инженер ОАО "Центральная геофизическая экспедиция", г. Москва.

1. Введение

Задача адаптации модели природного резервуара к истории его разработки является сегодня, наверное, вершиной геологического моделирования. Сама ее постановка свидетельствует о высоком качестве систем геологического и гидродинамического (ГД) моделирования. Трудности решения этой задачи очень велики. Назовем те, которые мы видим (очень может быть, что это еще не все):

1. Геологическая модель должна адекватно воспроизводить изменчивость природной среды, что возможно только на основе использования множества стохастических реализаций.
2. Гидродинамический симулятор должен давать результаты, действительно соответствующие входным данным. Сравнивая модельные дебиты с реальными, мы должны иметь возможность судить не о качестве симулятора, а о качестве геологической модели. Время расчета на симуляторе также должно быть приемлемым, поскольку ГД моделирование необходимо производить для многих десятков реализаций.
3. Оценка поровой проницаемости должна быть адекватной. Трудность состоит в том, что проницаемость не измеряется методами ГИС.
4. Очень большая трудность заключается в правильной оценке проницаемости и пространственной конфигурации естественных трещин.
5. Еще большая трудность связана с моделированием искусственных трещин, создаваемых посредством гидроразрыва пласта.
6. ГД моделирование должно сопровождаться геомеханическим моделированием, поскольку упругая деформация поровой матрицы меняет давление в пласте.
7. Данные в отношении дебитов должны быть точны и надежно привязаны к продуктивным интервалам.

Тем не менее, задачу адаптации пытаются решать. Почему это так важно? Воспроизведение истории разработки является ключевым критерием точности геологической модели. Если модель при расчете фильтрации воспроизводит реальную историю разработки, то ее (эту модель) можно использовать для прогнозирования. И, что еще важнее, такую модель можно использовать для опробования мер, направленных на повышение эффективности разработки.

Практически все современные подходы к адаптации стараются извлечь выгоду из представления геологической модели в виде множества стохастических реализаций. Действительно, такое представление модели многое обещает. Мы как бы пробуем геологическую среду, показываем, какой она может быть. Существуют разные методы использования реализаций. Например, один из подходов называется "метод роя частиц" (*Mohamed L. et al., 2010*). В данной статье мы будем говорить о подходе к адаптации на основе множественного фильтра Калмана (Ensemble Kalman Filter, EnKF, *Bianco A. et al., 2007*). Насколько мы можем судить, именно этот подход является сегодня самым популярным (*Peters E. et al., 2009*).

Идея метода EnKF достаточно проста. Допустим, у нас есть 100 реализаций трехмерной геологической модели, каждая из которых включает кубы пористости, проницаемости и насыщенности. Все эти реализации обчисляется на гидродинамическом симуляторе, после чего мы получаем 100 вариантов модельных кривых дебитов воды, нефти и газа (и целый ряд производных кривых) по каждой скважине. Имея множество реализаций модели и множество модельных кривых, мы можем рассчитать ковариацию значений параметров в ячейках модели (пористости, проницаемости и насыщенности) со значениями дебитов в скважинах на каждую дату.

Если такая ковариация обнаружится (а ковариация параметров ячеек, окружающих скважину, и дебитов по этой же скважине должна быть), то ее можно использовать. Как? С ее помощью отличия модельных дебитов в скважинах от реальных можно пересчитать в поправки к значениям параметров в ячейках модели. Поскольку у каждой реализации отличия модельных дебитов от реальных будут свои, то и поправки к параметрам в ячейках у каждой реализации будут свои. Последующий расчет на ГД-симуляторе показывает, что после внесения поправок модельные кривые дебитов по скважинам притягиваются к реальной кривой. И второе: различия между значениями параметров в ячейках модели у разных реализаций уменьшаются, а сами реализации приближаются к неизвестному действительному виду реальной геологической среды.

Из краткого изложения подхода EnKF к адаптации следует, что для его воплощения необходимо иметь:

- систему геологического моделирования, позволяющую рассчитывать множество стохастических реализаций параметров геологического объекта в пространстве 3D. Например, это может быть система Petrel, или IRAP RMS, или DV-Geo;
- систему гидродинамического моделирования для расчета модельных дебитов по скважинам. Например, это может быть система Eclipse, или Tempest, или tNavigator;
- специализированный блок адаптации, который может рассчитывать названную выше ковариацию и далее, на ее основе, вносить поправки в реализации геологической модели.

В данной статье описывается адаптация с использованием в качестве инструмента геологического моделирования системы DV-Geo. Гидродинамическое моделирование ориентируется на использование программы tNavigator. Специализированный модуль адаптации разработан в DV-Geo как набор процедур на встроенном языке программирования TH.

2. Исходная геологическая модель

Рассматривается площадь, на которой имеются 14 скважин. Мы построили на этой площади геостатистическую модель, то есть множество стохастических реализаций модели геологического объекта. Отметим следующее. Для рассматриваемой площади существует детерминированная модель, построенная по тем же скважинам. Более того, А.Р.Клепацкий (ЦГЭ) адаптировал ее к данным разработки. Из нашего описания будет видно, что мы использовали многие результаты (все, которые нам подошли), полученные в ходе предшествующего детерминированного моделирования.

Продолжим. На основе детальной корреляции данных ГИС на рассматриваемых скважинах были расставлены стратиграфические отметки кровли и подошвы целевого (продуктивного) интервала. Затем, посредством детерминированной интерполяции этих скважинных отметок, были рассчитаны поверхности кровли и подошвы (рис. 1, 2).

Поскольку рельеф полученных поверхностей меняется между скважинами, можно заключить, что в ходе интерполяции точечных отметок использовалась как минимум одна отражающая поверхность из сеймики.

Замечание. Поверхности кровли и подошвы - это первое, что мы заимствовали из детерминированной модели. Стохастические реализации кровли и подошвы не рассчитывались. Поскольку геометрия пласта является достаточно простой, мы полагаем, что ошибка, допускаемая вследствие недооценки истинной изменчивости рельефа кровли и подошвы, не является существенной. В чем эта ошибка? На значения пористости и проницаемости изменчивость границ не влияет, поскольку интерполяция пористости и проницаемости производится в стратиграфических координатах. Небольшая ошибка допускается в истинных (не стратиграфических) координатах каждой ячейки модели в пространстве и, следовательно, в положении ВНК. Другими словами, ошибка есть в начальной насыщенности ячеек. Но, повторим, поскольку геометрия пласта является простой, названная ошибка не должна быть заметной.

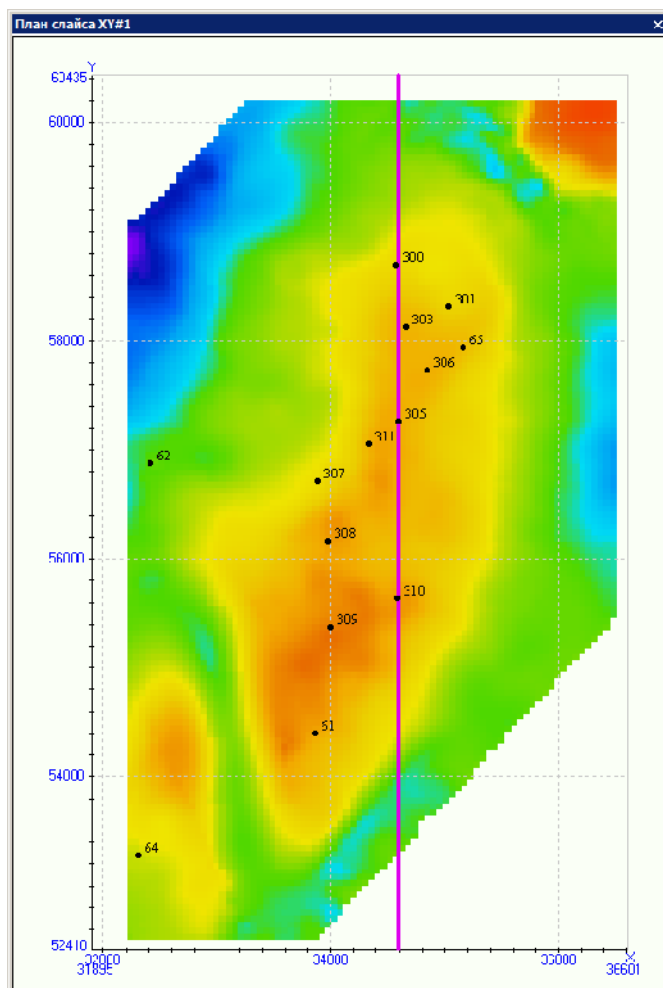


Рис. 1. Размещение скважин на плане XY. Цветом отображена поверхность кровли целевого интервала. Линия показывает положение вертикального слайса (см. далее рис. 2)

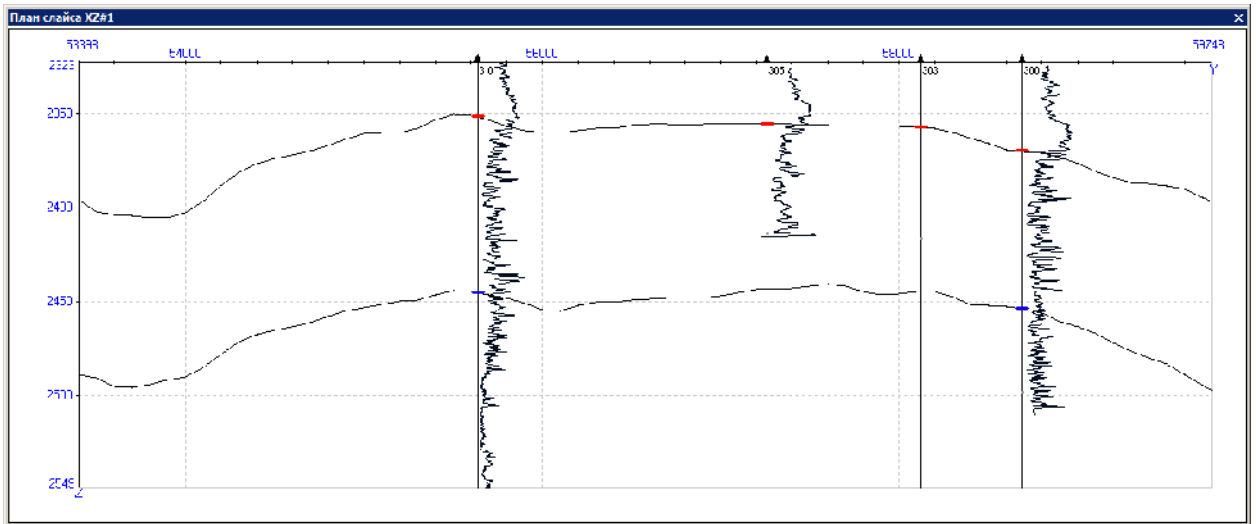


Рис. 2. Картина, видимая в границах вертикального слайса на рис. 1. Показаны стратиграфические отметки границ целевого интервала на скважинах и рассчитанные по ним поверхности кровли и подошвы. Для иллюстрации межскважинной корреляции визуализированы каротажные кривые ГК.

Поверхности кровли и подошвы продуктивного интервала использовались как направляющие границы при задании стратиграфической сетки 86x154x200. Числа указывают количество ячеек сетки по X, Y и Z. Далее в координатах стратиграфической сетки была выполнена стохастическая интерполяция пористости. Исходными данными для нее служили значения пористости вдоль траекторий скважин (кривые РГИ), полученные посредством интерпретации данных ГИС.

Поскольку гистограмма значений пористости по данным РГИ явно не гауссовская (рис. 3), корректная стохастическая интерполяция требует или предварительного разделения среды на категории (как минимум, на коллектор и неколлектор), или использования преобразования "Normal Score". В противном случае гистограмма значений пористости в пространстве будет резко отличаться от гистограммы значений в скважинах. В рассматриваемом примере был выбран второй подход - стохастическая интерполяция выполнялась с опцией "Normal Score". Благодаря этому гистограмма пористости в объеме среды очень хорошо воспроизвела гистограмму пористости в скважинных данных (точнее, в ячейках стратиграфической сетки на траекториях скважин, рис. 3).

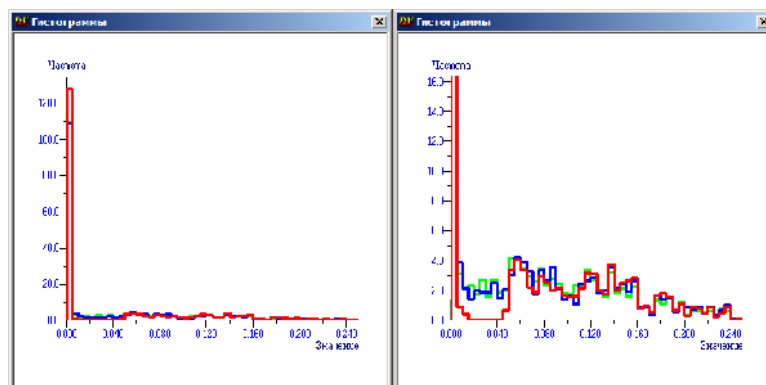


Рис. 3. Гистограммы пористости в скважинных данных РГИ (красные линии), в пересекаемых скважинами ячейках стратиграфической сетки (зеленые линии) и после интерполяции в объеме пласта (синие линии). На картине справа изменен только вертикальный масштаб

Расчет стохастических реализаций контролировался также посредством расчета вариограмм (рис. 4). На основании показанных вариограмм можно сделать вывод о том, что стохастические реализации правильно воспроизводят вертикальную и горизонтальную изменчивость геологической среды.

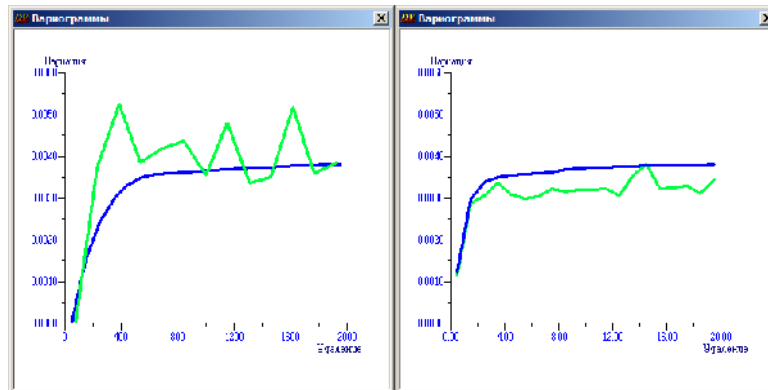


Рис. 4. Вариограммы пористости в ячейках на скважинах (зеленые линии) и в объеме пласта для реализации R0 (синие линии). Слева показаны горизонтальные вариограммы, справа - вертикальные

Всего было рассчитано 60 реализаций кубов пористости. Две из них показаны на рис. 5.

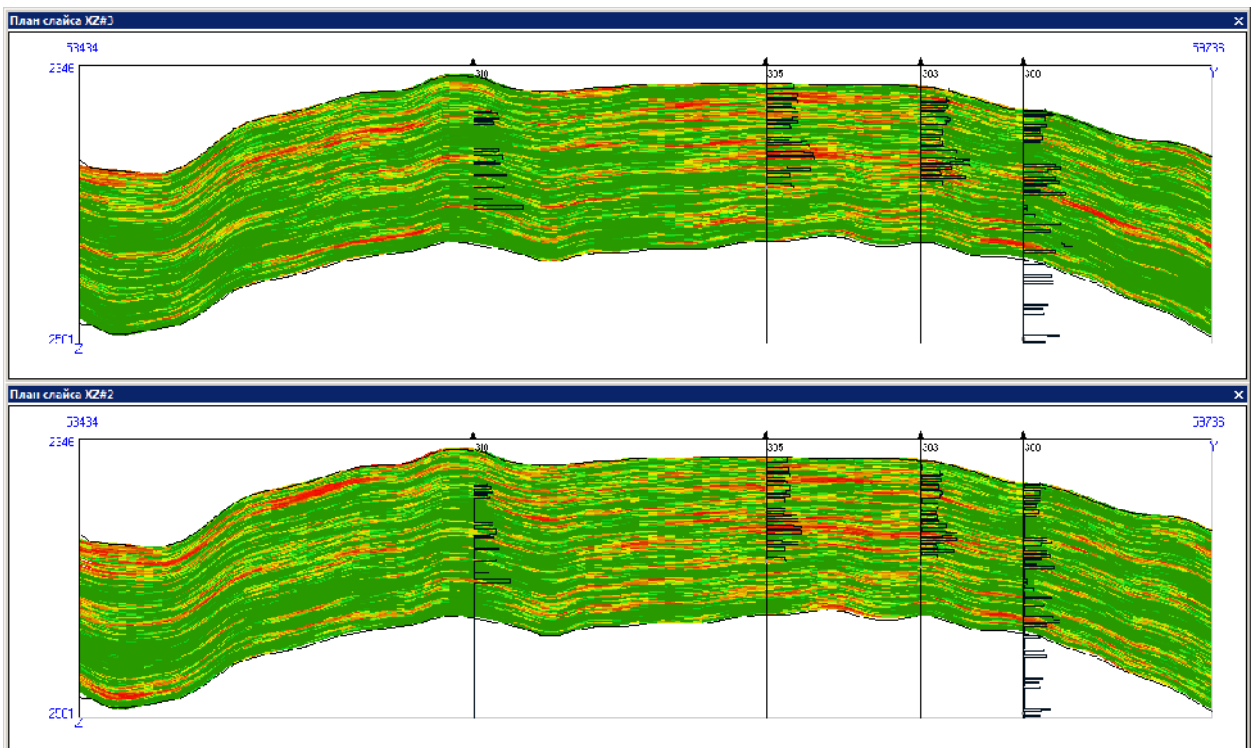


Рис. 5. Две реализации пористости, рассчитанные в границах целевого интервала. На скважинах показаны исходные данные о пористости в виде кривых РГИ

Для гидродинамического расчета помимо куба пористости необходим еще куб проницаемости и куб начальной насыщенности. Поскольку данный пример изначально предполагал работу с множеством реализаций, были приняты следующие упрощения. Первое - проницаемость специально не моделировалась; вместо этого использовалась

функциональная связь проницаемости с пористостью. Формальный вид этой связи будет показан ниже. И второе упрощение - использовалась детерминированная (не стохастическая) интерполяция скважинных данных о начальной нефтенасыщенности (рис. 6). Поскольку в горизонтальном направлении нефтенасыщенность меняется слабо, мы считаем, что допускаемая при этом ошибка является незначительной.

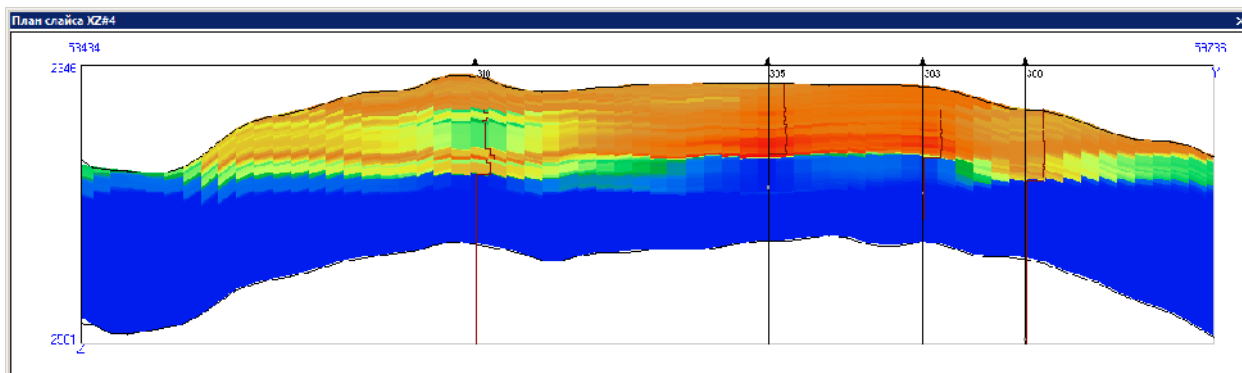


Рис. 6. Детерминированная интерполяция нефтенасыщенности. На скважинах показаны исходные данные о K_n в виде кривых РГИ

3. Гидродинамическая модель

Для ускорения расчета на ГД-симуляторе полученная геологическая модель была пересчитана на более крупную гидродинамическую сетку 42x76x20 (сравните с исходной сеткой 86x154x200). Результат такого пересчета для параметра "пористость" показан на рис. 7. Пересчет нефтенасыщенности на гидродинамическую сетку показан на рис. 8.

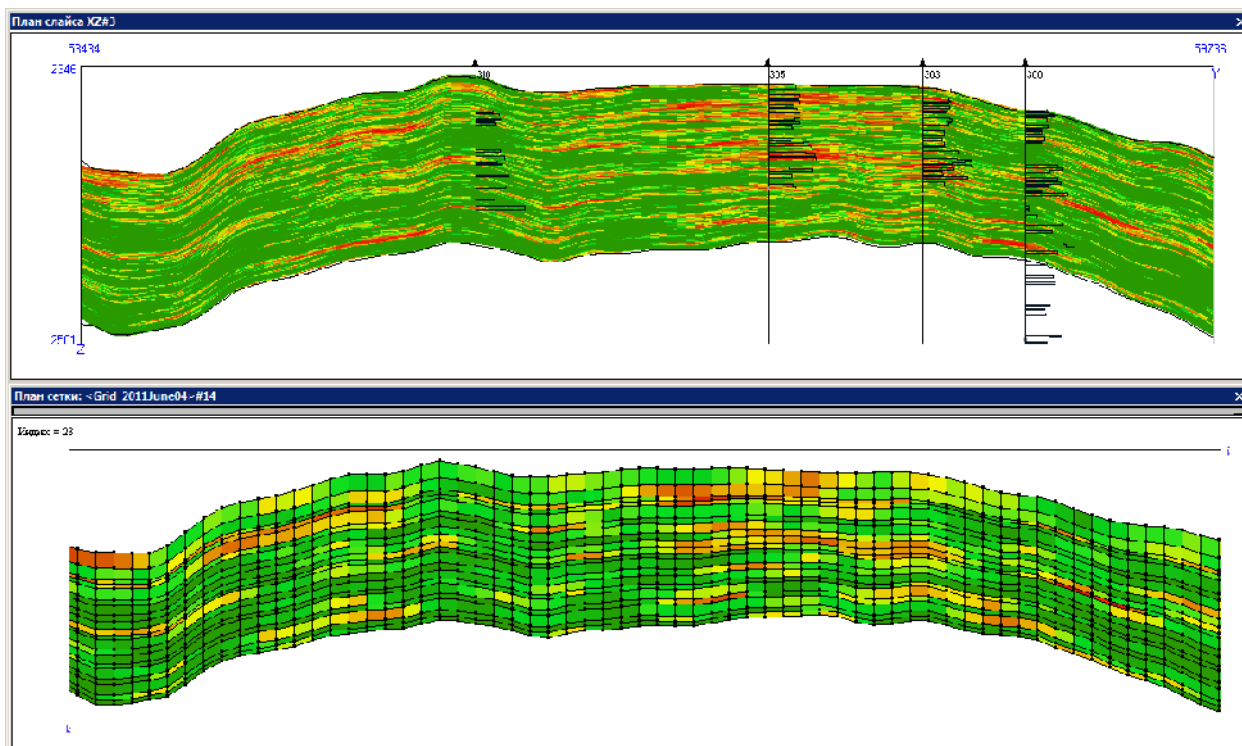


Рис. 7. Пересчет на гидродинамическую сетку куба пористости (вверху - куб на исходной стратиграфической сетке, внизу - куб на гидродинамической сетке)

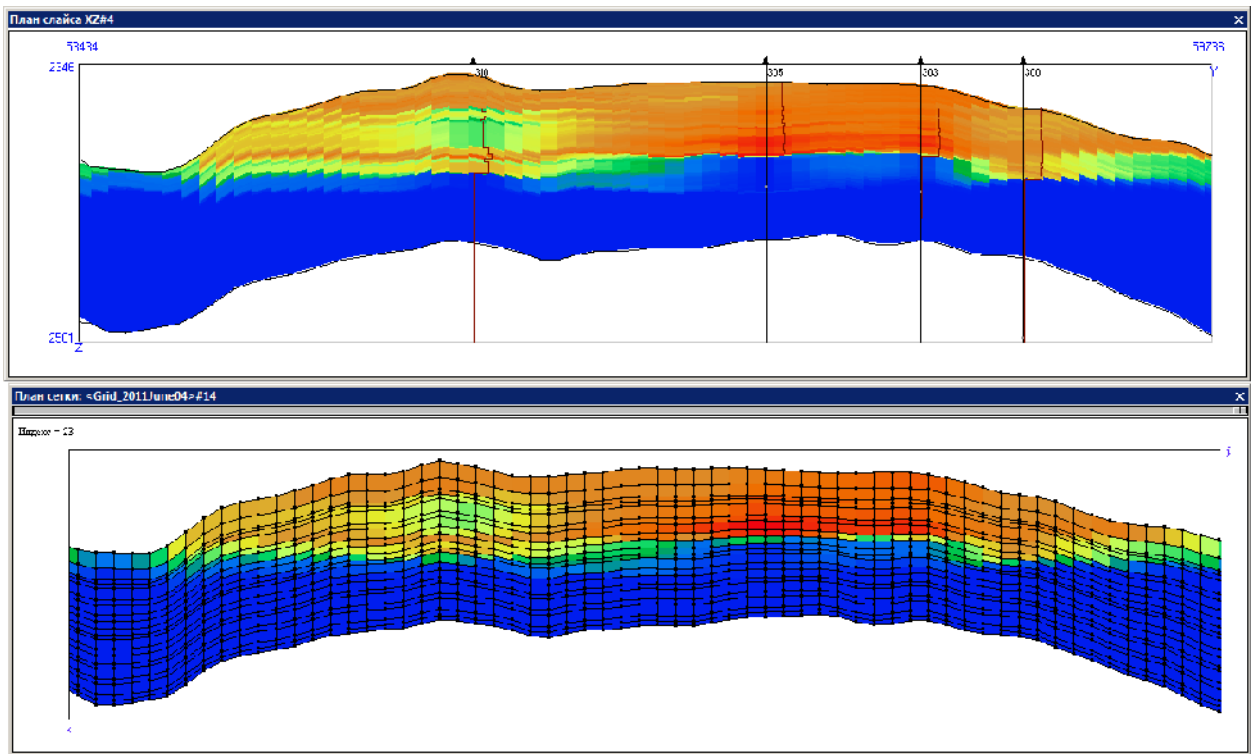


Рис. 8. Пересчет на гидродинамическую сетку куба нефтенасыщенности (вверху - куб на исходной стратиграфической сетке, внизу - куб на гидродинамической сетке)

Теперь сделаем замечание о проницаемости. В предшествующей детерминированной модели куб проницаемости рассчитывался посредством интерполяции значений проницаемости на скважинах, то есть независимо от куба пористости. В геостатистической модели мы также могли бы рассчитать стохастические реализации кубов проницаемости в дополнение к кубам пористости и, после этого, вычислять ковариационные связи дебитов скважин с пористостью в ячейках модели (отдельно) и с проницаемостью в тех же ячейках (тоже отдельно). Но мы так не сделали. Для того, чтобы упростить вычисления (уменьшить число ковариационных связей, сделать оставшиеся более явными), мы решили выводить проницаемость из пористости. Принятый подход позволяет нам дальше ограничиться ковариацией дебитов только с пористостью.

Итак, кубы проницаемости по X и Y рассчитывались из куба пористости по формуле, выведенной из регрессии по наличным скважинным данным (рис. 9):

$$K_{perm\ X,Y} = 5500 K_{por}$$

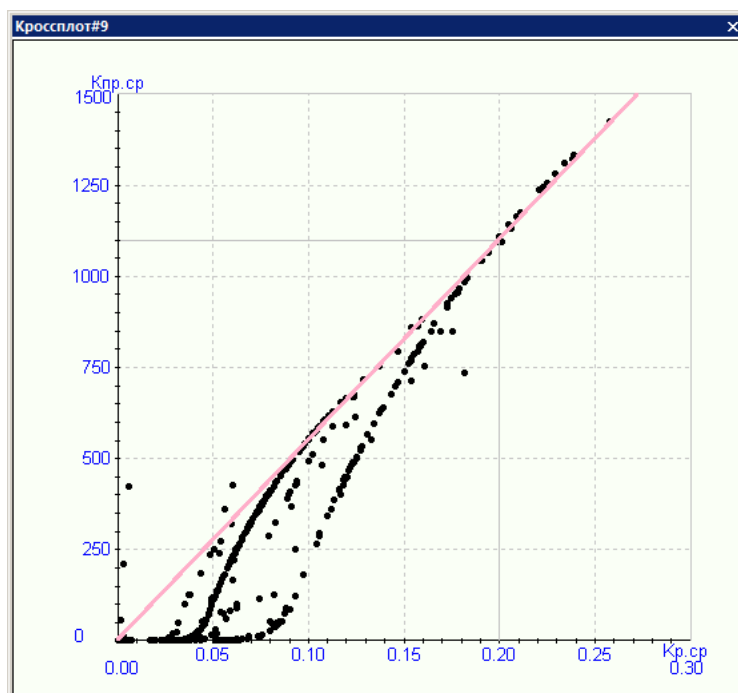


Рис. 9. Регрессионная зависимость проницаемости от пористости (по скважинным данным на рассматриваемой площади)

Проницаемость по Z была задана в 10 раз меньшей (по рекомендации А.Р.Клепацкого):

$$K_{perm Z} = 550 K_{por}$$

Куб критической нефтенасыщенности рассчитывался из куба проницаемости по X по формуле (по рекомендации А.Р.Клепацкого):

$$K_{N crit} = 0.2263 - 0.0066 \ln(K_{perm X}), \quad 0.3 \leq K_{perm X} \leq 1000$$

4. Гидродинамический расчет по исходным реализациям

Гидродинамический расчет был произведен по 60 реализациям модели (включающих исходные кубы пористости и нефтенасыщенности, а также производные кубы проницаемости и критической нефтенасыщенности). Файл задания на гидродинамический расчет (включающий информацию об интервалах перфорации на скважинах, о режиме работы скважин, а также фактические данные по истории разработки) был тем же самым, что и при расчетах на предшествующей детерминированной модели. Указанный файл задания "*.data" был подготовлен А.Р.Клепацким. Особо отметим - мы использовали названный файл задания в начальном, не адаптированном варианте. Результаты гидродинамического моделирования (таблицы "*.rsm") при помощи специальной ГН-процедуры загружались в DV-Geo. Вид модельных и реальных кривых обводнения (отображаемых средствами DV-Geo) показан на рис. 10.

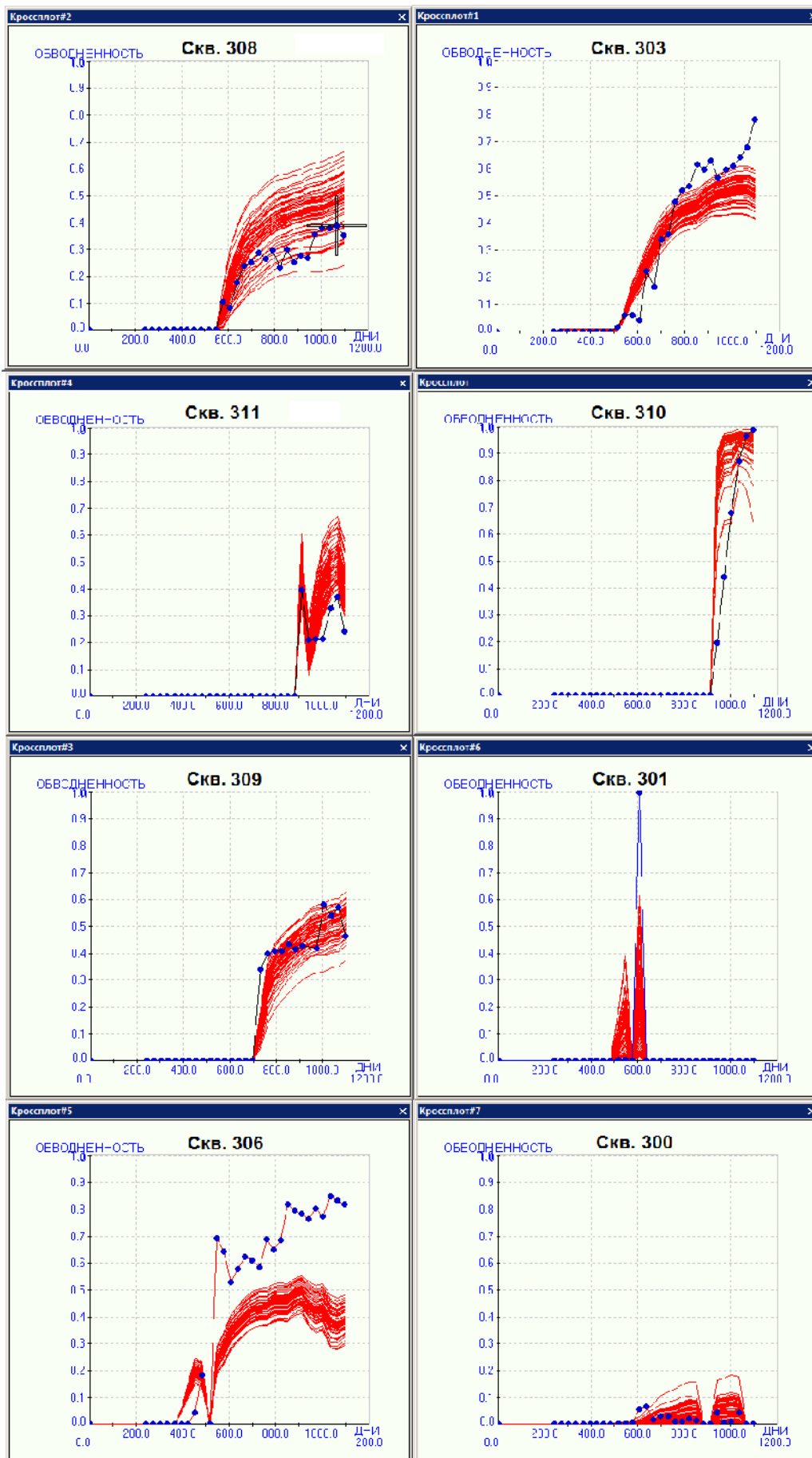


Рис. 10. Динамика коэффициента обводнения в зависимости от времени. Точки - реальные данные, красные кривые - результат расчета на ГД-симуляторе для 60 реализаций

На что мы обращаем внимание на картинах, показанных на рис. 10? Очень важно, чтобы веер модельных кривых хотя бы касался реальной кривой обводнения. Если это имеет место (как мы видим на большинстве показанных скважин), то мы можем заключить, что множество реализаций покрывает неизвестные истинные значения пористости и проницаемости геологической среды, то есть адекватно представляет неопределенность модели. Если же модельные кривые оказываются в стороне (что мы видим на скважинах 310 и 306) - то это означает, что наши реализации представляют неопределенность неадекватно. Попытка притянуть кривые модельного веера к реальным точкам в этом случае приведет к выходу значений пористости-проницаемости за пределы допустимых величин.

Какие особенности геологической среды могут быть ответственны за такое расхождение кривых, какое мы видим на скважинах 310 и 306? Скорее всего, причины показанного расхождения заключаются не в геологической среде, а в условиях работы указанных скважин. Это могут быть неправильно указанные интервалы перфорации, ошибочные значения скин-факторов, заколонные перетоки или что-нибудь другое подобное. То есть, этапу "геологической" адаптации модели к реальным дебитам на скважинах 310 и 306 должен предшествовать этап "технологической" адаптации работы соответствующих скважин. Если "технологическую" адаптацию для скважины выполнить не удастся, то из процесса "геологической" адаптации ее следует исключить.

5. Расчет ковариации

Зафиксируем на графиках обводнения одной из скважин какую-нибудь дату. Мы выбрали скважину 308 и зафиксировали дату 1065 дней (выбранная дата отмечена крестообразным курсором-селектором, рис. 10). Имея множество реализаций, рассчитаем ковариацию показателя обводнения на эту дату и значений пористости в ячейках модели. Напомним, ковариация есть склонность двух случайных величин одновременно находиться по одну сторону от своих средних:

$$\text{Cov}(X, Y) = E[(X - E(X)) \cdot (Y - E(Y))]$$

Здесь E означает математическое ожидание, $E(X)$ есть среднее для X . В нашем случае X есть значение пористости в ячейке (i, j, k) реализации с порядковым номером n , а Y есть значение коэффициента обводнения для скважины 308 на дату "1065-й день", рассчитанное на ГД-симуляторе для той же реализации n . Осреднение идет по множеству реализаций.

Ковариация - это просто число. Если мы нормируем ее на среднеквадратичные отклонения для X и Y , мы получим безразмерный коэффициент корреляции ρ , который лежит в интервале от -1 до 1.

$$\rho = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - E(X)) \cdot (Y - E(Y))]}{\sqrt{E[(X - E(X))^2]} \sqrt{E[(Y - E(Y))^2]}}$$

На рис. 11 показана нормированная ковариация значений пористости в ячейках модели и коэффициента обводнения для скважины 308 на дату "1065-й день". Расчет ковариации производился по 60 реализациям (кубов пористости и кривых обводнения).

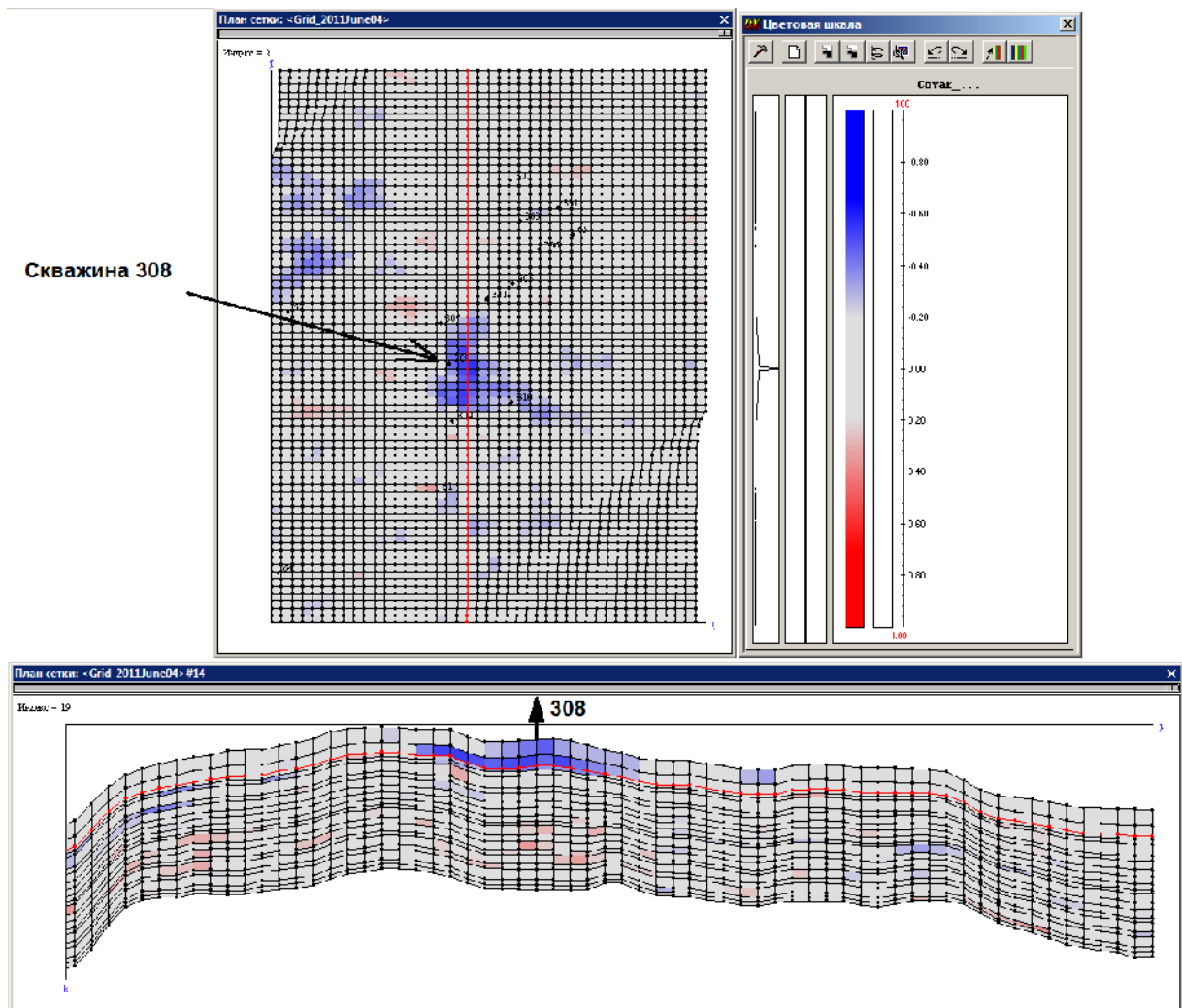


Рис. 11. Нормированная ковариация пористости и коэффициента обводнения для скважины 308 на дату "1065-й день"

Что мы видим на показанной выше картине? Главное - ковариация есть! В ячейках вокруг скважины мы видим отрицательные значения нормированной ковариации, равные примерно -0.5. То есть, чтобы понизить коэффициент обводнения на указанную дату, пористость и проницаемость в окружающих скважину ячейках надо повысить. И еще что мы видим - значения пористости и проницаемости в удаленных ячейках (исключая пару сотен ближайших) на коэффициент обводнения в скважине 308 практически не влияют.

6. Адаптация

Имея куб ковариации (рис. 11), мы можем выполнить акт адаптации значений пористости в ячейках реализаций модели по следующей формуле

$$P_{адоп}^n(i, j, k) = P^n(i, j, k) + \rho(i, j, k) \frac{K_{в. факт.}^n - K_{в. модели}^n}{\sigma_{кв}} \sigma_p$$

Здесь $P(i, j, k)$ обозначает пористость в ячейке (i, j, k) , n - индекс реализации, K_v - коэффициент обводнения, $\sigma_{кв}$ - среднеквадратичное отклонение коэффициента

обводнения на выбранную дату, σ_p - среднеквадратичное отклонение значения пористости в ячейке (i, j, k) , ρ - нормированная ковариация. При расчете среднеквадратичных отклонений осреднение идет по числу реализаций.

Очевидно, что один акт адаптации корректирует значения пористости-проницаемости только в тех ячейках, в которых мы имеем ненулевые значения ковариации, то есть, только в окрестности соответствующей скважины. У каждой реализации поправки будут свои. После акта адаптации мы должны будем выполнить гидродинамический расчет для исправленных кубов. Это позволит нам убедиться, что новые модельные кривые по выбранной скважине приблизились (на выбранную дату) к реальной кривой. Далее мы можем взять на этой же скважине другую дату, или же взять некоторую дату на другой скважине, и все (начиная с расчета куба ковариации новых модельных кривых и значений пористости в исправленных реализациях) повторить. Количество актов адаптации мы выбираем сами.

Результаты

Для рассматриваемой модели был реализован процесс последовательной адаптации, включающий три акта, по одному для скважин 308, 303 и 311. Кривые обводнения, рассчитанные по адаптированным реализациям (итоговым), показаны на рис. 11.

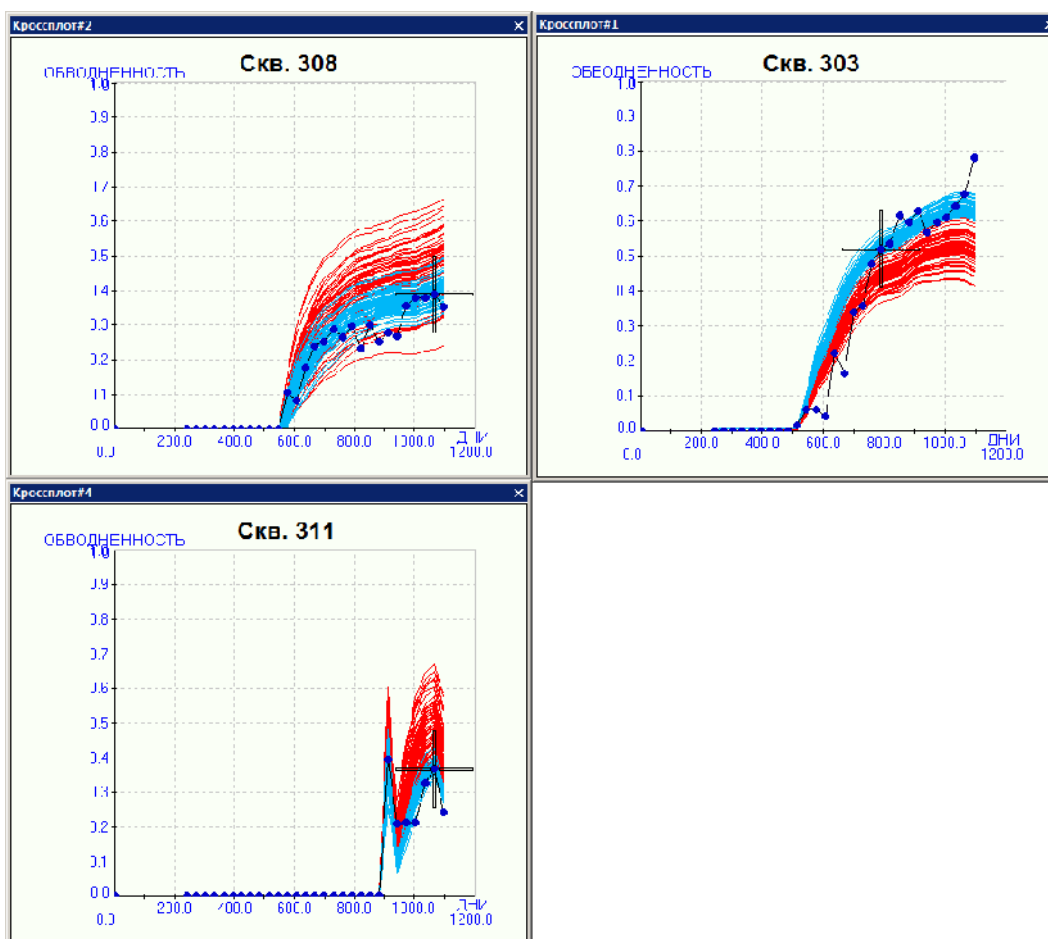


Рис. 12. Динамика коэффициента обводнения в зависимости от времени. Точки - реальные данные. Красные кривые - для исходных реализаций, голубые кривые - для адаптированных реализаций. Курсором-селектором выделены точки, к которым производилось притягивание модельных кривых

Какие изменения произошли при этом в реализациях? На рис. 13. показаны три реализации пористости - исходные (вверху) и они же после трех актов адаптации (внизу). Напомним, всего реализаций у нас 60.

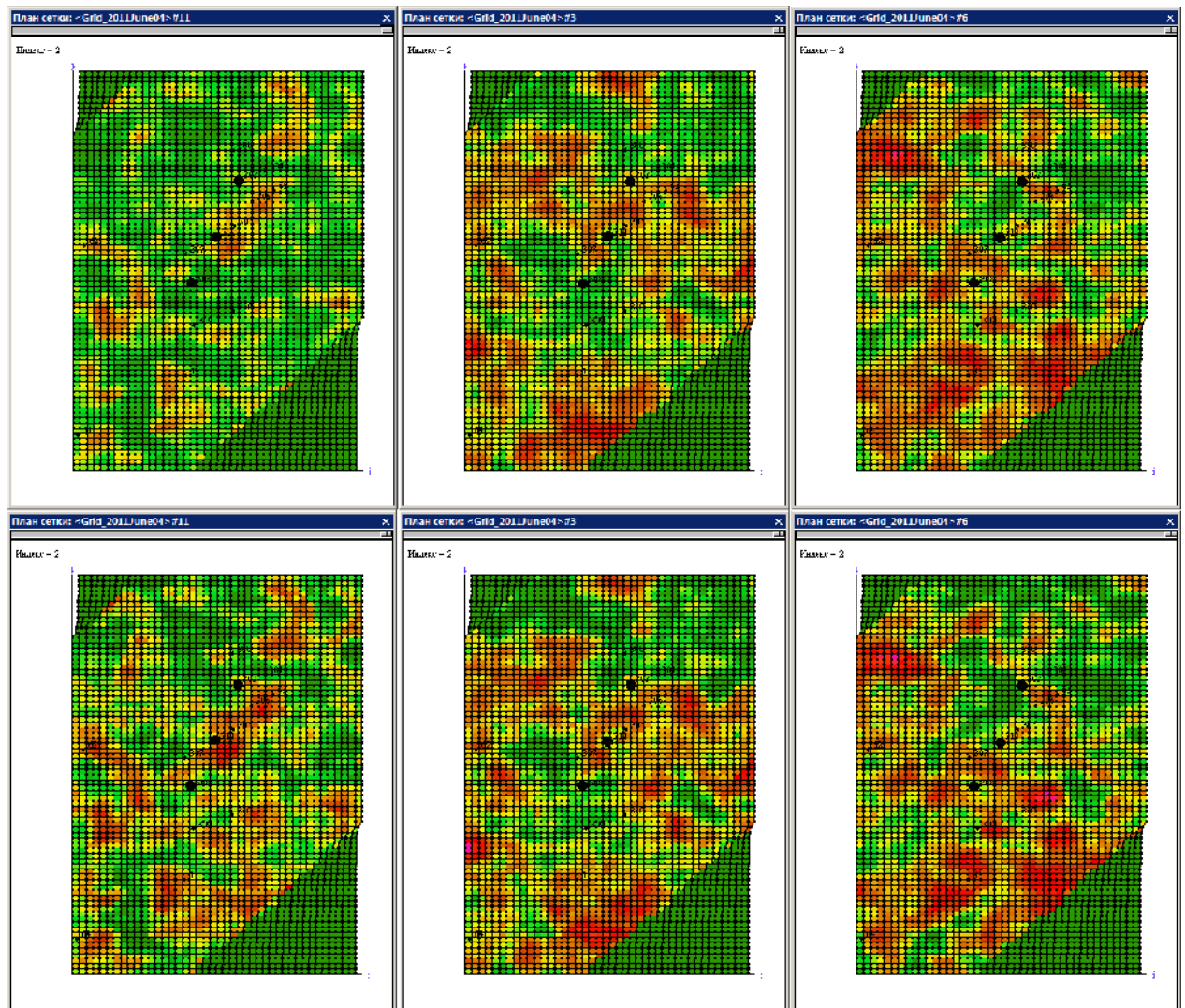


Рис. 13. Три исходные реализации пористости (вверху) и они же после трех актов адаптации (внизу). Выделены скважины, использованные при адаптации

Показан тот же слой максимальной ковариации (и, соответственно, максимальных изменений), что и на рис. 11. Мы видим, что изменения не очень велики. Наибольшей коррекции подверглась реализация, показанная слева, в которой пористость рассматриваемого слоя была изначально мала. Если сравнить три верхние реализации, и три нижние, то можно заметить, что различия между реализациями уменьшаются.

На рис. 14 можно видеть, как в результате адаптации меняется неопределенность модели. На левой картине показана исходная неопределенность (слой ячеек тот же, что и на рис. 11). Это обычная для геостатистики картина - в точках со значениями пористости (на 12 скважинах) неопределенность равна нулю, а за пределом радиуса вариограммы неопределенность выходит на стандартное отклонение. На правой картине показана неопределенность после трех актов адаптации. Видно, что в результате адаптации неопределенность несколько уменьшилась.

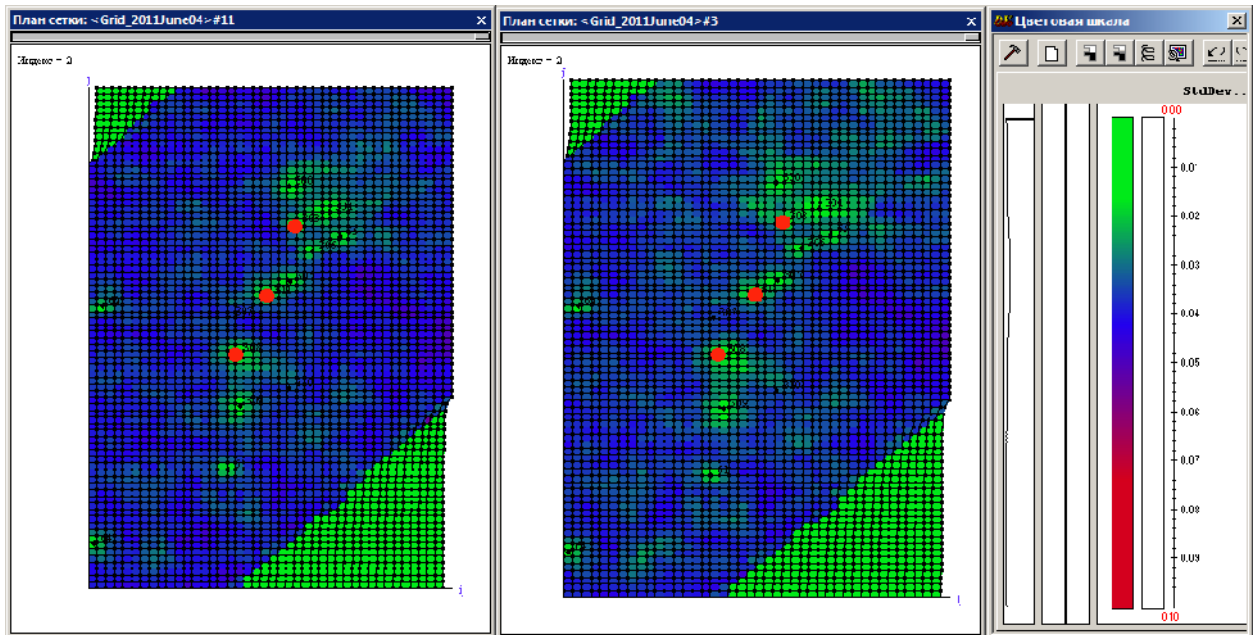


Рис. 14. Неопределенность модели. Слева - для исходных реализаций, справа - для адаптированных реализаций. Выделены скважины, использованные при адаптации

Еще один заслуживающий внимания результат - как меняется результат осреднения реализаций (рис. 15). На левой картинке показано среднее для исходных реализаций (слой ячеек тот же, что и на рис. 11). Эта картина соответствует тому, что мы знаем: осреднение реализаций дает нам кригинг точечных данных. Поскольку точек со значениями пористости мало (всего 12 скважин), картина кригинга предельно проста. На правой же картинке мы видим, что в результате адаптации исходная осредненная картина значительно усложняется. Адаптация проявляет в реализациях некоторые общие черты. Мы полагаем, что это черты реальной геологической среды.

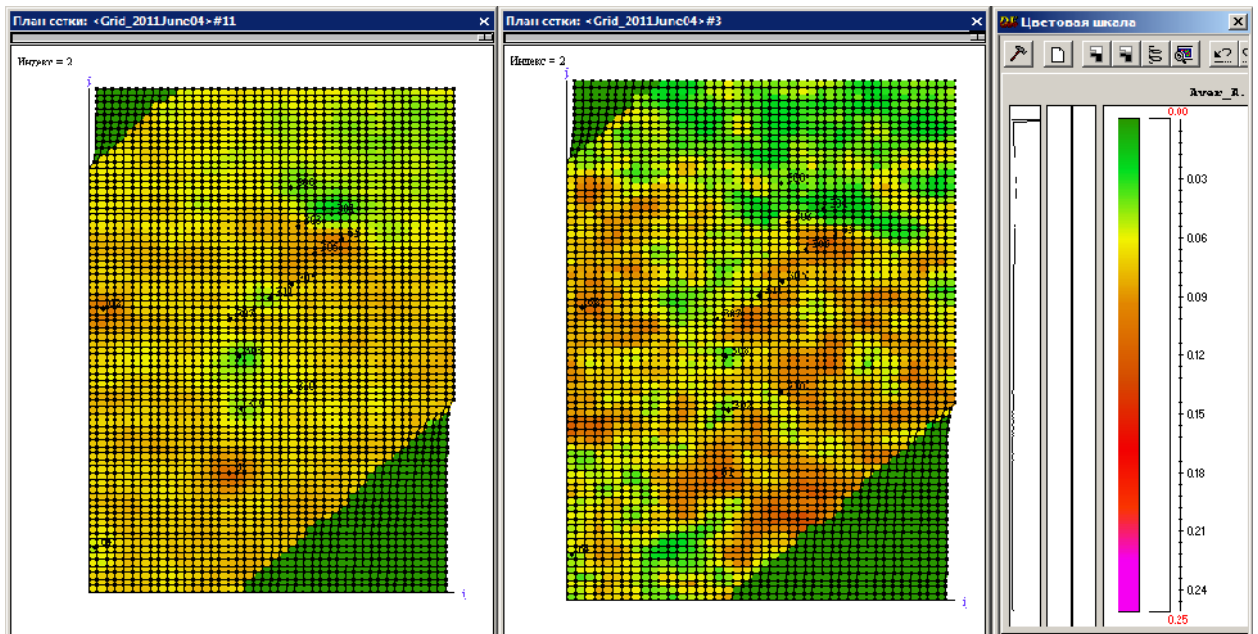


Рис. 15. Результат осреднения реализаций. Слева - для исходных реализаций, справа - для адаптированных реализаций. Цветовая палитра соответствует рис. 13.

Дискуссия

Необходимо отметить, что в оригинальной работе *Bianco A. et al., 2007*, при той же сути, рассматривается более сложный алгоритм. Их процесс тоже идет с некоторым шагом по времени. Но у них на каждую очередную дату одним актом адаптации осуществляется коррекция реализаций по разнице расчетных и фактических показателей сразу на всех скважинах. При этом авторы используют ковариацию отношения газ/нефть в дебите скважин не только с пористостью в ячейках, но и с давлением и насыщенностью (там же). Что это дает? Дополнительные ковариационные связи обеспечивают очень важное - корректность вносимых поправок. Это позволяет, выполнив очередной акт адаптации, продолжить гидродинамический расчет непосредственно из текущего состояния.

Упрощенный же подход, который описан в нашей статье, этого не позволяет. Поправки к давлениям и насыщенностям мы не рассчитываем, вследствие чего продолжить гидродинамический расчет после изменения значений пористости мы не можем. Давления и насыщенности в ячейках у нас уже некорректны! Поэтому после каждого акта адаптации мы должны начинать гидродинамический расчет с самого его начала. Из чего следует, что в затратах времени мы, в сравнении с оригинальным подходом, сильно проигрываем. Выигрываем же мы в том, что наш процесс адаптации прост, нагляден и может выполняться последовательно по скважинам. Как долго мы сможем обходиться без реализации оригинального алгоритма в его полном объеме, покажет время.

И последнее. Мы уже упоминали, что модуль автоматической адаптации геологической модели к истории разработки написан в DV-Geo на встроенном языке программирования ТН. Модуль адаптации включает следующие процедуры: экспорт из DV-Geo кубов пористости во внешние файлы в формате ГД-симулятора; запуск ГД-симулятора из командной строки; импорт в DV-Geo рассчитанных ГД-симулятором дебитов из внешних файлов; вычисление куба ковариаций пористости и дебитов для очередной скважины и на очередную дату; расчет и внесение поправок в кубы пористости; составление задания на адаптацию, управление циклами адаптации. Мы специально подчеркиваем, что все эти процедуры написаны на ТН, поскольку указанный факт означает следующее. Описанный модуль адаптации мог бы разработать любой пользователь DV-Geo и на любом рабочем месте, где установлена эта система. То есть, настоящая статья демонстрирует не только реализованную в DV-Geo адаптацию моделей, но и возможности DV-Geo в части воплощения любых инновационных идей.

Литература

1. Mohamed L., Christie M., Demyanov V., Robert E., Kachuma D., 2010, Application of Particle Swarms for History Matching in the Brugge Reservoir. SPE-135264, 16 p.
2. Bianco A., Cominelli A., Dovera L., Naevdal G., Valles B., 2007, History Matching and Production Forecast Uncertainty by Means of the Ensemble Kalman Filter – A Real Field Application, SPE-107161, 10 p.
3. Peters E., Arts R., Brouwer G., Geel C., 2009, Results of the Brugge Benchmark Study for Flooding Optimization and History Matching, SPE-119094, 21 p.