

## Замкнутый цикл управления залежью Closed-loop reservoir management

Дж. Д. Янсен<sup>\*,†</sup> (J.D. Jansen), Д. Р. Броуэр<sup>†</sup> (D.R. Brouwer), Г. Невдаль<sup>\*</sup> (G. Naevdal) и К. П. Дж. В ван Крюйсдийк<sup>\*,†</sup> (C.P.J.W. van Kruisdijk)

### Аннотация

В работе рассматриваются подходы и вычислительные средства для организации «замкнутого цикла» управления залежью, основанного на моделировании. Замкнутый цикл, известный также как управление залежью в реальном времени, включает использование моделей (приближенных) залежи и способа разработки в сочетании с данными по добыче и другими данными, такими как повторные сейсморазведочные наблюдения, которые используются для постоянного уточнения моделей. Авторы опирались на теорию измерений и управления, применяемую в управлении промышленным производством и методики учета новых данных, применяемые в метеорологии и океанографии. Важными шагами на пути к замкнутому циклу управления являются оптимизация, учет новых данных, методики упрощения моделей и, в особенности, их

### Введение

**Открытые и замкнутые циклы управления залежью.** На рис. 1 управление залежью представлено как управляемый процесс, основанный на моделировании. Система в верхней части рисунка состоит из объектов, создающих системы данных, производственных объектов, скважин, систем управления и насыщенной в скважинах и т. д. Обновление модели происходит по объему измерений давления на поверхности и добычи в скважинах и по косвенным данным, таким как сейсморазведочные наблюдения. Данных измерений не просто мало, в них содержится также и помеха. Кроме того, что поступает на вход системы, известно лишь отчасти (например, темпы подачи воды или скорость подъема газа могут быть примерно известны, а напор в водоносном горизонте, как правило, неизвестен). Неизвестные входные данные также можно рассматривать как шум.

Перед началом добычи данных измерений нет, и предлагаемую систему управления, т. е. план разработки месторождения, приходится строить на основе статических и динамических моделей залежи, основанных на геологических данных, данных сейсморазведки и испытательных скважин и т. д. После запуска эксплуатации начинают поступать данные по добыче, которые используются в оперативном управлении. Иначе говоря, данные по добыче и по давлению в забое используются для решения текущих задач нефтегазодобычи, зачастую – без использования

какой-либо формальной модели. Более долгосрочное управление при этом все еще основывается на исходной модели залежи и не учитывает данные по добыче. Таким образом долгосрочное управление осуществляется без обратной связи, иными словами – в *открытом цикле*.

Прежде чем обсуждать как, используя данные по добыче, превратить управление залежью в управляемый процесс с *замкнутым циклом*, рассмотрим различные способы учета данных измерений в классической теории управления. Во многих отраслях, где важно управление процессами, параметры системы, за исключением переменных, известны довольно хорошо. Переменные внутренних процессов нельзя измерить непосредственно; например, давление в приводе руки робота трудно измерить напрямую. В таком случае использование модели системы совместно данными измерений на ее входе и выходе позволяет установить состояние системы. Замеры ускорений конца манипулятора в сочетании с динамической моделью последнего позволяют оценить внутренние напряжения. После этого движением манипулятора можно управлять так, чтобы напряжения не превышали некоторого предела. Это означает, что модель системы с известными параметрами используется как *наблюдатель* за процессом, который нельзя измерить непосредственно, что позволяет управлять системой в замкнутом цикле.

Иная ситуация возникает, если параметры системы известны неточно. В этом случае предлагается использовать данные измерений на входе и выходе иначе, а именно, для определения значений неизвестных параметров системы или их обновления. В крайних проявлениях в такой модели нет ничего, кроме математических связей входа и выхода. Такие модели систем часто называют моделями, управляемыми данными, или «черным ящиком», в противоположность «белому ящику» – модели, изначально основанной на известных соотношениях, таких как законы сохранения. Тем не менее «белые ящики» часто содержат ряд параметров, которые нужно «настраивать», опираясь на данные измерений на входе и выходе.

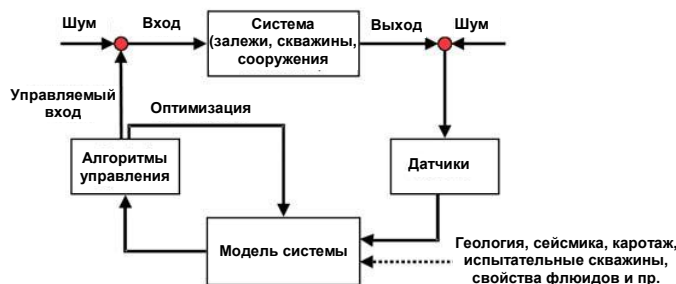


Рис. 1. Управление залежью как основанный на моделировании управляемый процесс в замкнутом цикле.

<sup>\*</sup>Delft University of Technology, The Netherlands, <sup>†</sup>Shell International Exploration and Production, The Netherlands, <sup>RF</sup>Rogaland Research, Norway. E-mail: j.d.jansen@citg.tudelft.nl, roald.brouwer@shell.com, geir.naevdal@rf.no, c.p.j.w.vankruisdijk@citg.tudelft.nl

### Состояние дел на текущий момент

Примером замкнутого цикла управления залежью с моделью «черного ящика» является использование кривых спада для рекомендации мест заложения следующих скважин и прогноза поведения залежи. Модели, основанные на уравнении материального баланса, также можно отнести к «черным ящикам», хотя присутствие в них физических соображений (закон сохранения вещества) позволяет считать их сероватыми. Модели, использующие метод конечных разностей или конечных элементов, основанные на законе сохранения массы, законе Дарси и равновесии жидкой и газообразной фаз относятся, безусловно, к «белым ящикам». Из-за неясности геологической обстановки они обычно дают лишь очень грубое приближение реальности, а параметры модели, такие как проницаемость и пористость, известны лишь с большой степенью неопределенности. Таким образом, предсказательная сила таких моделей ограничена и со временем обычно уменьшается. Иногда это приводит к попыткам «согласования с историей» путем изменения параметров модели так, чтобы прогнозируемые результаты соответствовали данным по добыче. Такое обновление модели позволяет, конечно, увеличить ее предсказательную силу. Управление, основанное на моделях, согласуемых с историей, можно, таким образом, считать управлением в замкнутом цикле.

Обычные способы согласования с историей имеют ряд недостатков: 1) согласование проводится, как кампания, обычно раз в несколько лет; 2) методики согласования часто основаны на гипотезах «ad-hoc» и требуют ручной настройки параметров, и не дают системы обновления параметров; 3) неопределенность значений переменных состояния, параметров модели обычно явным образом не учитываются; 4) итоговые модели, согласованные с историей, часто нарушают базовые геологические ограничения; и 5) хуже всего, что обновленная модель может хорошо воспроизводить историю, но не иметь предсказательной силы, так как «зарегулирована» заданием большого числа неизвестных параметров на основе много меньшего числа измерений.

Для преодоления этих недостатков за последние 20 лет предложен ряд «автоматических» методов согласования с историей, которые позволяют обновлять модели гораздо более системно. Эти методы, как будет показано далее, являются важным элементом для создания замкнутых циклов управления.

### Временные и пространственные масштабы

Управление залежью – один из тех процессов в отрасли разведки и добычи, которые ведутся в замкнутом цикле. На рис. 2 показан условный цикл ценностей, который содержит все элементы, представленные на рис. 1, но несколько иначе организованные, и с включением ряда дополнительных аспектов. Циклы ценностей выделяются на всех стадиях производственного цикла нефтяной отрасли. Одним из способов их классификации является рассмотрение временных и пространственных пределов их действия. На рис. 3 представлено разделение на три пространственно-временных области, но легко можно провести

дальнейшее уточнение, разделив, например, управление добычей на производственные операции и их оптимизацию, или управление залежью – на разведку и планирование добычи. Но в любом случае, каждая (под)область устанавливает цели и ограничения для области более низкого ранга, и дает данные по истории и прогнозы для области более высокого ранга.

В той или иной форме концепция управления залежью и оптимизации добычи в замкнутом цикле уже описана ранее, и в настоящее время привлекает внимание с точки зрения разработки так называемых «управлений залежью в реальном времени», «самообучающихся систем управления залежью», «электронных» или «умных месторождений» (e- или smart fields) (Chierici, 1992; Beamer *et al.* 1998; Nyhavn *et al.* 2000; Rossi *et al.* 2000; Nygard *et al.* 2001; Litvak *et al.* 2002; Kapteijn and Muessig, 2003; Saputelli *et al.* 2003).

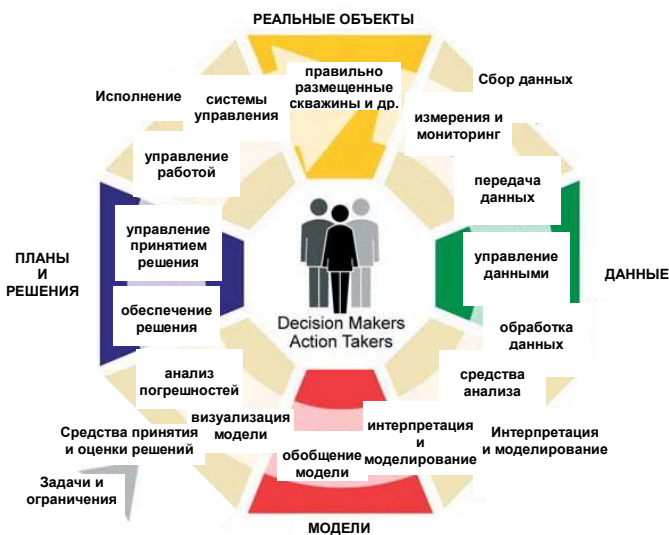


Рис. 2. Цикл ценностей (no Kapteijn and Muessig, 2003)

### Что нового в подходе авторов?

В данном исследовании предполагается совместное использование оптимизации на основе моделирования и методик обновления модели с сосредоточением усилий по моделированию на наблюдаемых и управляемых аспектах модели. Подход основан на теории управления, применяемой при управлении производственными процессами. Эта теория, называемая также теория систем или теория АСУ, предлагает большой набор математических средств решения многопараметрических задач оптимизации и управления как в линейных, так и в нелинейных системах, включающих системный подход к неопределенности данных. Ее единственным недостатком является сосредоточенность главным образом на простых системах низкого порядка, то есть на системах с малым числом переменных состояния, по сравнению с числом переменных (значения давления и содержания флюида в узлах сетки моделирования), возникающим при численном моделировании залежей.

Вторым важным внешним (не из нефтяной отрасли) основанием подхода авторов являются методики учета

новых данных, применяемые в метеорологии и океанографии. К ним относится быстрое обновление моделей на основе данных из разнообразных источников при прогнозировании погоды и климата. Рассчитанные на системы очень высокого порядка (с миллионами переменных состояния), могут быть весьма полезными при моделировании залежей и уже успешно применяются в гидрогеологии при изучении движения подземных вод. Основная проблема состоит в приспособлении их к особенностям движения многофазного флюида в залежи, таким как ударные воздействия и неточная геологическая ситуация. На рис. 4, более детальном варианте рис. 1, показаны различные элементы управления залежью в замкнутом цикле. Далее в работе рассматриваются методики, пришедшие как из самой нефтяной отрасли, так и извне, которые могут применяться на разных стадиях процесса.

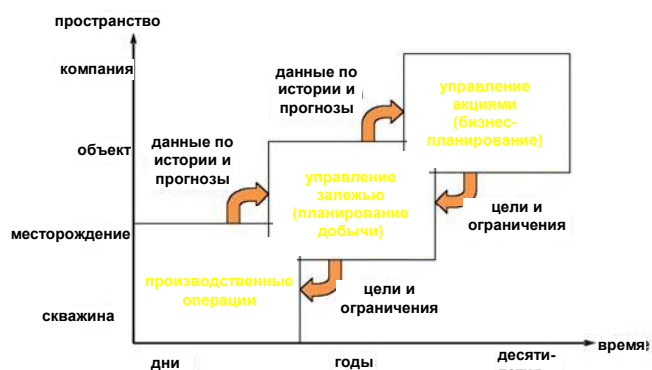


Рис. 3. Области процессов разведки и добычи

### Обновление

Нижняя часть рисунка относится к обновлению модели системы на основе данных из разнообразных источников (расходомерии, повторных сейсморазведочных наблюдений, исследования микросейсм, дистанционных методов). В настоящее время в метеорологии и океанографии для учета новых данных используется два класса методов.

○ **Методы на основе вариационного исчисления.** Эти методы нацелены на минимизацию невязки между результатами измерений и прогнозами модели за определенный период времени путем закономерного изменения параметров системы. Таким образом, задача обновления сводится к задаче оптимизации, для которой имеется много математических решений. Для систем с большим числом переменных состояния наиболее эффективны методы оптимизации, использующие сопряженные системы уравнений. Это позволяет получить необходимую информацию по производным при однократном расчете по динамической модели. Вариационные методы уже давно используются для «автоматизированного согласования с историей» (см. обзор в Li *et al.* 2003).

○ **Методы на основе фильтров Кальмана.**

Разработанные в 1960-х годах для отслеживания воздушных целей на радаре, обычные фильтры Кальмана применимы лишь к линейным системам. Созданные недавно групповые фильтры Кальмана (*ensemble Kalman filtering*) применимы и к большим нелинейным системам.

Такая методика изменяет неопределенность вектора параметров системы каждый раз по мере поступления новых данных измерений. До какой-то степени можно обновлять и неточно известные параметры. Первые попытки применить фильтры Кальмана к инженерным задачам на залежах сделаны лишь недавно (Naevdal *et al.* 2002, 2003, Gu and Oliver, 2004). Преимущества этого подхода перед вариационным исследованы не до конца.

Другие методы обновления моделей, разработанные уже внутри нефтегазового сообщества, используют поточные вычисления для расчета производных или же относятся к «неклассической» оптимизации (генетические алгоритмы, «отжиг» (*simulated annealing*)). Более того, специально для задач, связанных с залежами, созданы методы согласования с историей, учитывающие геостатистические ограничения, например метод возмущения вероятности (*probability perturbation method*, Caers, 2003).

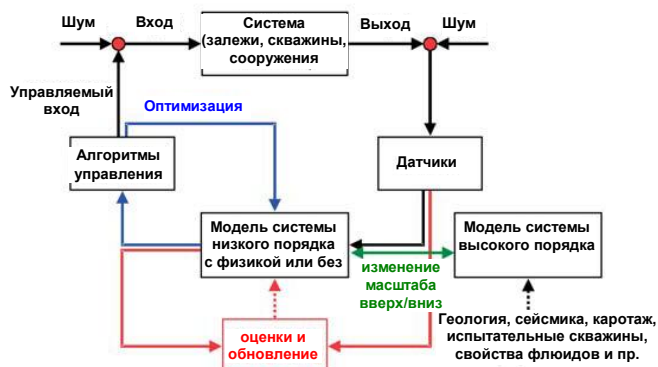


Рис. 4. Элементы процесса управления залежью в замкнутом цикле.

### Оптимизация

Вторым элементом замкнутого цикла управления залежью является постоянная, в рамках системы, **оптимизация** стратегии разработки залежи. Она включает оптимизацию как при заданной конфигурации, т. е. оптимизацию нагнетания и откачки в нужных сегментах скважины, так и при произвольной конфигурации, т. е. определение оптимального положения нагнетательных скважин и мест прострела. В сфере разведки и добычи много усилий тратится на краткосрочную оптимизацию. Авторы же сосредоточены на оптимизации всего периода эксплуатации залежи, чтобы максимизировать извлечение запасов или оптимизировать текущую стоимость. В частности, используется градиентная процедура оптимизации с расчетом производных по сопряженным уравнениям (Brouwer and Jansen, 2004; там же дан обзор более ранних работ по схожим методикам). Альтернативные методы оптимизации периода разработки месторождения, особенно те, что касаются оптимального размещения скважин, используют «неклассические» подходы, такие как генетические алгоритмы (Yeten *et al.* 2003, Guyaguler and Horne, 2004).

### Масштабирование

Третьим элементом является **масштабирование** (вверх и вниз) моделей систем до приемлемого уровня детальности. Во многих случаях пространство



управляемых и наблюдаемых параметров системы мало по сравнению с полным пространством параметров, и в этом случае может потребоваться упрощение модели. Моделирование ненаблюдаемых и неуправляемых деталей, является в лучшем случае пустой тратой сил, а в худшем – может привести к ложным результатам. Авторы исследовали в рамках теории систем ряд способов упрощения, приводящих к физическому или нефизическому снижению порядка модели. В частности, использование «подходящего ортогонального разложения» (известного также, как «разложение Кархунена-Лоэва (Karhunen-Loeve)» или «метод главных компонент») представляется перспективным с точки зрения снижения вычислительных затрат, как альтернатива классическим методам регуляризации при учете новых данных. (Heijl *et al.* 2004, Van Doren *et al.* 2004). Кроме этих способов упрощения, пришедших из теории управления, в замкнутом цикле управления залежью могут применяться эмпирические модели, созданные по экспериментальным данным, и «классические» способы масштабирования, созданные эксплуатационниками. Новые разработки в области методов многомасштабного и адаптивного уточнения сеток пригодны для масштабирования как вверх, так и вниз, и также перспективны.

### Виртуальные модели производственных мощностей

По мере возможности авторы проверяли свои концепции и алгоритмы на реальных объектах, как в случае алгоритмов оптимизации при заданном расположении скважин. Однако большинство аспектов управления залежью имеет характерное время от нескольких лет до десятилетий, и поэтому проверка

новых концепций для них на реальных объектах оказывается невозможной. Вместо этого мы используем виртуальные объекты, т. е. независимые модели, отражающие реальность и включающие неточности, такие как шум в измерениях и даже ошибки оператора. На рис. 5 показано, какие элементы управления залежью покрываются виртуальными объектами.

### Пример

В качестве примера замкнутого цикла управления залежью приведем простой виртуальный объект, который авторы использовали ранее (Brouwer and Jansen, 2004) для иллюстрации возможности оптимизировать темпы нагнетания и откачки в водосодержащих гетерогенных залежах. На рис. 6 изображена двумерная залежь с двумя горизонтальными скважинами – одной нагнетательной и одной эксплуатационной, – каждая из которых разделена на несколько изолированных зон с отдельным управлением притоком (путем переключения клапанов). С другой стороны, можно считать, что это модель залежи, разрабатываемой двумя рядами вертикальных нагнетательных и эксплуатационных скважин.

На рис. 7а представлены нефте- и водонасыщенность после закачки в залежь воды в количестве одного объема пор по обычной схеме при постоянном давлении во всех сегментах нагнетательной и эксплуатационной скважин. Авторы показали, что градиентная методика «оптимального управления» дала бы резкое увеличение извлекаемости (рис. 7б), если бы можно было управлять скважинами с ограничениями по общим темпам, т. е. если бы нагнетание и/или добычу можно было бы переключать с сегмента на сегмент, не считаясь с ограничениями по

В условиях жестких ограничений по давлению прирост извлекаемости был гораздо меньше, но все же удалось резко сократить выход воды и увеличить выход ископаемого. Следует, однако, отметить, что все эти улучшения достигнуты при стартовой модели с известными параметрами, то есть в открытом цикле управления. Впоследствии авторы добились оптимизации в замкнутом цикле, комбинируя оптимальное управление и использование фильтров Кальмана для непрерывного обновления модели залежи (Brouwer *et al.* 2004). Недавно опубликован пример управления залежью в замкнутом цикле (Aitokhuehi *et al.* 2004), где генетический алгоритм оптимизации сочетается с методом возмущений вероятности для согласования с историей.

В данной работе авторы применили групповые фильтры Кальмана для получения оценок «расширенного» набора параметров, т. е. давления,

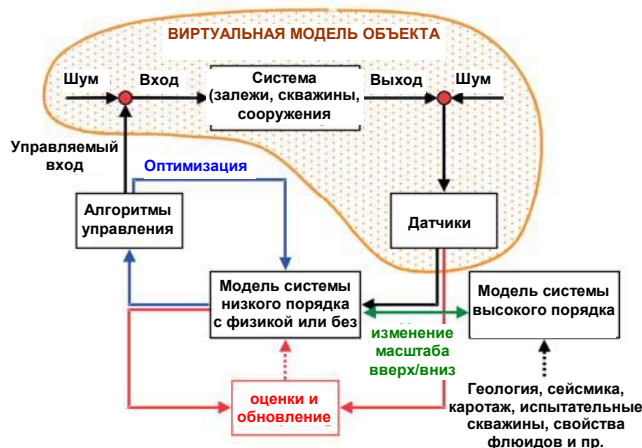


Рис. 5. Роль виртуальной модели объекта при разработке замкнутого цикла управления залежью

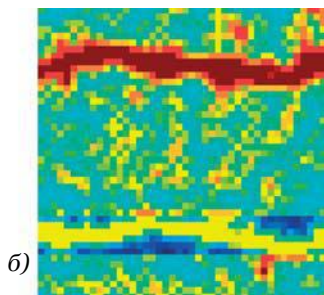
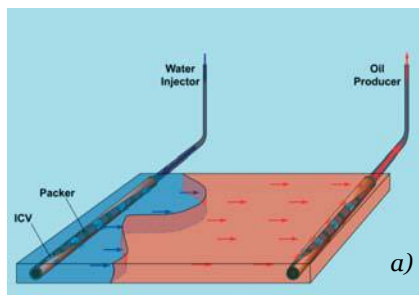


Рис. 6. Гетерогенная залежь с двумя удачно расположенными горизонтальными скважинами: а) общий вид; б) поле проницаемости (по Brouwer and Jansen, 2004).

насыщенности и проницаемости. Группа состояла из 100 случайных геостатистических выборок с заданным радиусом корреляции, каждая из которых представляла почти однородное поле проницаемости. Для улучшения оценок использованы «измеренные» значения (содержащие случайные ошибки) давления и валовой добычи по скважинам за некоторый период времени. На рис. 7в показано насыщение после закачки воды в в количестве одного объема пор с использованием такого замкнутого цикла. Результаты весьма близки к полученным в открытом цикле с точно известными характеристиками потока в залежи. На первый взгляд сходство еще больше, если учесть, что рассматривалось расчетное поле проницаемости (рис. 7г), которое лишь частично напоминает «истинную» картину проницаемости виртуальной модели объекта, показанную на рис. 6. По сути, это показывает, что в ряде случаев улучшения управления залежью можно достичь, применяя упрощенные модели, поскольку для данного положения скважин нужна лишь модель управляемых и наблюдаемых параметров залежи. Позднее то же было показано в работе Overbeek *et al.* 2004, где авторы использовали модель залежи низкого порядка (сетка из 100 узлов) для оптимизации потоков в виртуальном объекте из 12000 узлов. В приведенных примерах не было необходимости применять способы упрощения модели залежи, но в реальных ситуациях с очень большими моделями для регуляризации задачи учета новых данных и увеличения скорости оптимизации. Еще важнее это может быть при

устойчивого управления для оптимизации по всем рассматриваемым элементам групп, а не по среднему, как в приведенном примере.

### Выводы

Авторы понимают, что приведенный пример очень прост, в нем присутствуют лишь две фазы, двумерная модель разреза, нет ограничений по давлению, не учитывается диаметр скважины. В более реалистичной модели придется использовать несколько групп, основанных на различных геологических сценариях. Далее, рассмотрена лишь оптимизация при заданном расположении скважин, хотя более полная оптимизация должна включать улучшение самой конфигурации, то есть затрагивать рассматривать положение боковых выработок и добавочных нагнетательных скважин. Тем не менее, авторы надеются, что смогли донести ту идею, что совместное использование методов оптимизации и учета новых данных в замкнутом цикле является перспективным для улучшения управления залежью.

### Литература

Aitokhuehi, I., Durlofsky, L.J., Artus, V., Yeten, B. and Aziz, K. [2004] Optimization of advanced well type and performance. *9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR IX)*, Cannes, France, August 28 - September 2. Beamer, A., Bryant, I., Denver, L., Saeedi, J., Verma, V., Mead, P., Morgan, C. Rossi, D. and Sharma, S. [1998] From

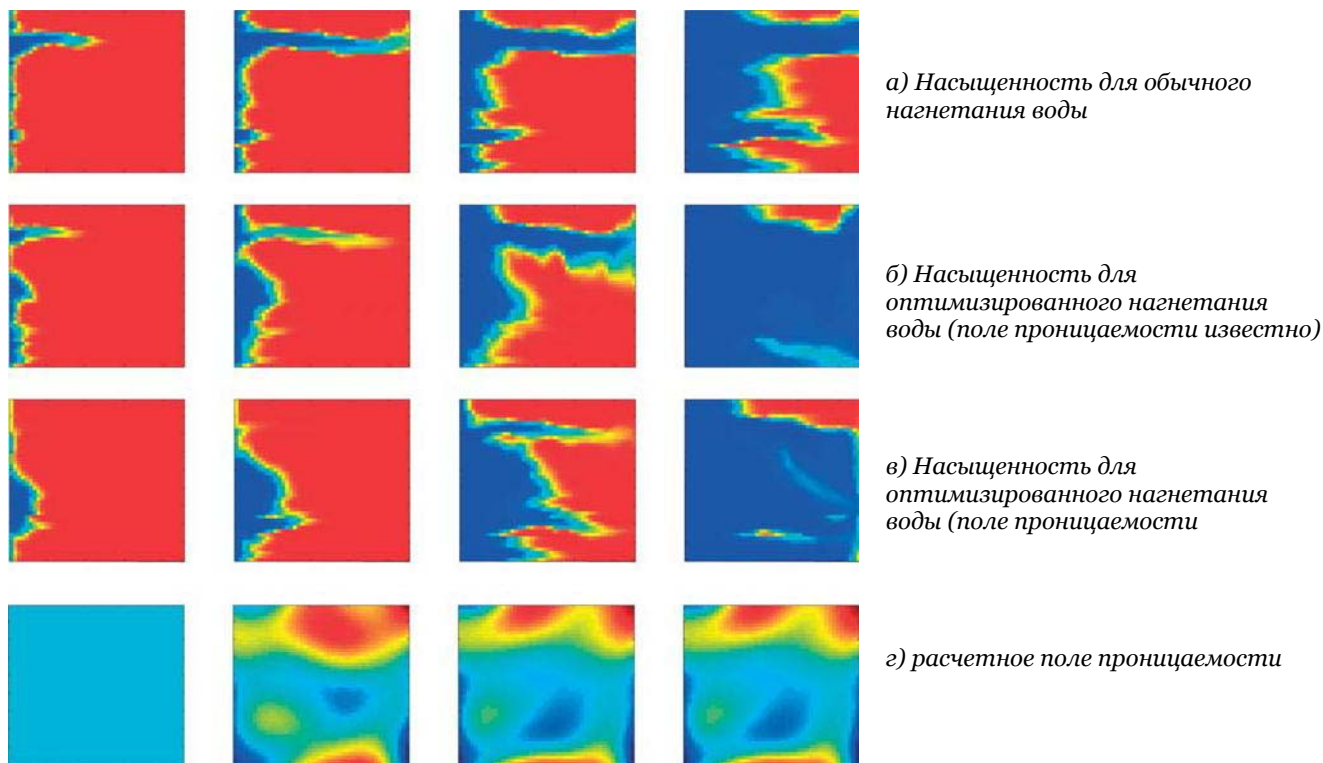


Рис. 7. Насыщенность и проницаемость через 0, 46, 116 и 949 дней. Проницаемость показана как среднее по 100 выборкам

- pore to pipeline, field-scale solutions. *Oilfield Review* Summer, 2-19.
- Brouwer, D.R. and Jansen, J.D. [2004] Dynamic optimisation of water flooding with smart wells using optimal control theory. *SPE Journal*, December.
- Brouwer, D.R., N vdal, G., Jansen, J.D., Vefring, E.H. and van Kruijsdijk, C.P.J.W. [2004] Improved reservoir management through optimal control and continuous model updating. Paper SPE 90149, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, 26-29 September.
- Caers, J. [2003] History matching under training-image-based geological model constraints. *SPE Journal*, September, 218-226.
- Chierici, G.L. [1992] Economically improving oil recovery by advanced reservoir management. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 8, 205-219.
- Gu, Y. and Oliver, D.S. [2004] History matching of the PUNQ-S3 reservoir model using the ensemble Kalman filter. Paper SPE 89942, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, 26-29 September.
- Guyaguler, B. and Horne, R. [2004] Uncertainty assessment of well-placement optimization. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, February, 24-32.
- Heijn, T., Markovinovi c, R. and Jansen, J.D. [2004] Generation of low-order reservoir models using system-theoretical concepts'. *SPE Journal*, June, 202-218.
- Kapteijn, P.K.A. and Muessig, S. [2003] Smart fields: How to generate more value from hydrocarbon resources. *Oil Gas European Magazine*, Nr. 3, OG1-OG6.
- Li, R., Reynolds, A.C., and Oliver, D.S. [2003] History matching of three-phase flow production data. *SPE Journal*, December, 328-340.
- Litvak, M.L., Hutchins, L.A., Skinner, R.C., Darlow, B.L., Wood, R.C. and Kuest, L.J. [2002] Prudhoe bay e-field production optimization system based on integrated reservoir and facility simulation. Paper SPE 77643, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, Texas, USA, 29 September - 2 October.
- N vdal, G., Mannseth, T. and Vefring, E.H. [2002] Near-well reservoir monitoring through ensemble Kalman filter. Paper SPE 75235, *SPE/DOE Thirteenth Symposium on Improved Oil Recovery*, Tulsa, Oklahoma, USA, 13-17 April.
- Novdal, G., Johnsen, L.M., Aanonsen, S.I. and Vefring, E.H. [2003] Reservoir monitoring and continuous model updating using ensemble Kalman filter. Paper SPE 84372, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, 5-8 October.
- Nygard, O., Cramer, C., Kulkarni, R. and Nordtvedt, J.E. [2001] Development of a marginal gas-condensate field using a novel integrated reservoir and production management approach. Paper SPE 68734, *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Jakarta, Indonesia, 17 -19 April.
- Nyhavn, F., Vassenden, F. and Singstad, P. [2000] Reservoir drainage with down hole permanent monitoring and control systems. Paper SPE 62937, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, USA, 1-4 October.
- Overbeek, K.M., Brouwer, D.R., Naevdal, G. and van Kruijsdijk, C.P.J.W. [2004] Closed-loop waterflooding. *9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR IX)*, Cannes, France, August 28 - September 2.
- Rossi, D.J., Gurpinar, O., Nelson, R. and Jacobsen, S. [2000] Discussion on integrating monitoring data into the reservoir management process. Paper SPE 65150, *SPE European Petroleum Conference*, Paris, France, 24-25 October.
- Saputelli, L., Nikolaou, M. and Economides, M.J. [2003] Self-learning reservoir management. Paper SPE 84064, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Denver, Colorado, USA, 5-8 October.
- Van Doren, J., Markovinovic, R. and Jansen, J.D. [2004] Reduced-order optimal control of waterflooding. *9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery (ECMOR IX)*, Cannes, France, August 28 - September 2.
- Yeten, B., Durlowsky, L.J. and Aziz, K. [2003] Optimization of nonconventional well type, location and trajectory. *SPE Journal*, September, 200-210.