

## НОВЫЙ ПОДХОД В МОДЕЛИРОВАНИИ СТРОЕНИЯ ПРИРОДНЫХ НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ РЕЧНОГО ГЕНЕЗИСА

*В.В. Сидоренко, В.Н. Суртаев, М.М. Хасанов*

Обсуждается концепция адаптивного моделирования строения природных нефтяных резервуаров. В основе концепции лежит использование простых математических алгоритмов для имитации физических процессов, определивших строение резервуара. В качестве примера рассматривается возможность моделирования резервуара речного типа с помощью клеточного автомата.

### Введение

Для понимания строения нефтяных резервуаров и достоверного прогноза возможных изменений их коллекторских свойств в процессе разработки нужно располагать надежными геометрическими и структурными моделями этих геологических объектов. Очень часто эти модели являются основой для принятия важных экономических решений.

Строение резервуара определяется условиями его формирования. Природные нефтяные резервуары в большинстве случаев являются результатом нефтенакпления в песчаных образованиях [1]. Возникнув миллионы лет назад вследствие разного рода эрозионных процессов, эти образования – шельфовые и прибрежные морские пески, глубоководные турбидитные отложения и русловые песчаные отложения – со временем были захоронены под толщей земной коры.

Традиционные методы моделирования пластов-коллекторов используют либо чисто статистический подход (вариограммные методы), либо комбинированную стратегию, опирающуюся на известную информацию о строении резервуара (объектно-геометрические методы, многоточечная статистика). Следует отметить, что во многих случаях модель должна лишь качественно воспроизводить строение резервуара и нет необходимости в их полной идентичности.

Мы предлагаем новый подход к моделированию нефтяных резервуаров, использующий простые математические правила для описания физических процессов, определяющих характер осадконакопления и, таким образом, ответственных за строение резервуара. Например, в случае турбидитного типа отложений, характеризующихся переслаиванием песчано-алевролитоглинистых прослоев в пласте, можно

попытаться воспроизвести перемещение масс песчаного материала с шельфа и его перемешивание с глубоководными глинами. Надлежащим выбором правил можно достичь согласования результатов моделирования не только с общими представлениями о строении резервуара, но и с конкретными скважинными данными.

В данной работе в качестве иллюстрации предлагаемого подхода обсуждается моделирование резервуаров аллювиального типа. Для построения реалистичных русловых систем мы используем вероятностный клеточный автомат, генерирующий ветвящиеся сети на прямоугольной решетке. Проведена калибровка параметров автомата, позволяющая генерировать речные системы с разными свойствами.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о продуктивности применения гидрологических моделей для нужд нефтяной отрасли.

## **1. Концепция нового подхода к моделированию природных нефтяных резервуаров**

**1.1. Моделирование природных резервуаров. Общая характеристика проблемы.** Моделирование резервуара предполагает воссоздание его геометрических параметров в каждой точке пространства по скважинным данным, сейсмическим данным и любой другой полезной информации. Четкое представление о строении резервуара и его фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС) необходимо для выбора эффективной схемы разработки и максимального извлечения углеводородов с месторождения.

Моделирование геометрического строения и ФЕС резервуара производится поэтапно – внутри полученных в результате геометрического моделирования тел распределяются коллекторские свойства. Наибольшие трудности возникают с восстановлением сложнопостроенных резервуаров (в частности, отложений речных систем). В дальнейшем под моделированием подразумевается только моделирование геометрии резервуара.

**1.2. Обзор известных методов моделирования.** К настоящему моменту предложено уже достаточно много методов моделирования резервуаров, которые можно разбить на три группы: вариограммные методы моделирования, объектные методы и методы с использованием многоточечной статистики.

Вариограммные методы моделирования – это различные варианты интерполяции, использующие как инструмент вариограмму [2]. Отличительной чертой этих методов является простота реализации: кроме скважинных данных не привлекается никакая дополнительная информация.

Если же какие-то предварительные сведения о строении резервуара имеются, то тогда можно воспользоваться объектными методами [3–5]. В этом случае предполагается известным, что пласт состоит из геологических тел, имеющих определенную характерную форму (например, по данным сейсмического анализа или по результатам уже проведенных бурений). Имеющиеся скважины дают точное значение оцениваемого параметра (тип фации) в нескольких точках пласта. Задача состоит в построении распределения данного параметра по всему пласту.

Объектное моделирование дает более реалистичные модели неоднородного резервуара по сравнению с вариограммным методом и может воссоздать его строение по достаточно скудным скважинным данным. Однако для проведения объектного

моделирования требуется создание объектов, что уже само по себе является проблемой – объекты, созданные природой, сложно описать шаблоном, определяемым несколькими параметрами.

Сложности объектного моделирования привели к созданию более гибкого подхода, основанного на использовании многоточечной статистики [6, 7]. Его ключевым моментом является сбор статистических данных о встречаемости различных комбинаций пород и дальнейшее использование этой информации в процессе моделирования. Сбор статистических данных производится с обучающих карт – карт уже разбуренных участков рассматриваемого месторождения или рисунков, сделанных геологом в соответствии с его представлением о том, что должно находиться под землей (в последнем случае эффективность алгоритма существенно зависит от «личностного» фактора – разные специалисты могут сделать разные выводы на основании одних и тех же геофизических данных).

Метод многоточечной статистики применим при рассмотрении резервуаров любого строения – даже тогда, когда строение резервуара нельзя описать параметрически. Однако обязательное наличие обучающих карт представляет достаточно ограничительное условие для реализации этого подхода. Для того чтобы иметь больше статистических данных, обучающих карт должно быть много, а сами по себе они должны быть относительно разнообразны, сохраняя при этом единую структуру.

**1.3. Концепция нового метода моделирования.** Целью наших исследований является развитие нового подхода к моделированию строения резервуаров, в котором «личностный» фактор менее значим в сравнении с уже используемыми методами. Идея этого подхода состоит в том, что строение любого геологического объекта определяется условиями его формирования. Поэтому в математических алгоритмах, воспроизводящих строение природного нефтяного резервуара, целесообразно учитывать в каком-то виде свойства физических процессов, результатом которых такое строение является.

Такой подход позволяет использовать априорную информацию о типе осадконакопления и особенностях рельефа, влияющих на процесс осадконакопления.

Как уже отмечалось, в большинстве случаев полной идентичности модели и реального резервуара не требуется, важно лишь достичь реалистичности модели. Тем не менее алгоритм должен уметь адаптировать генерируемые структуры под имеющиеся скважинные данные.

## **2. Иллюстрация нового метода моделирования**

**2.1. Характеристика гидрологических моделей.** Продемонстрируем новый метод моделирования на примере построения резервуаров аллювиального (речного) генезиса. Мы ограничимся «первым приближением» – моделированием существовавшей в геологическом прошлом речной системы, ответственной за формирование соответствующего типа осадконакоплений. Следуя принципу актуализма, предполагаем, что геолого-географические характеристики древних и современных речных систем не различаются.

В зависимости от поставленной задачи для моделирования речных систем могут использоваться разные подходы: одна и та же идеология не позволит описать изменение русла отдельной небольшой реки и формирование крупной речной си-

стемы. В первом случае каким-то образом должна быть отражена седиментология прирусловых осадочных пород. Во втором случае важно воспроизвести статистические закономерности по речным системам.

Приведенные примеры иллюстрируют микро- и макроэволюцию речных систем. Микроэволюция – это изменчивость речных русел за небольшое геологическое время (образование стариц, появление новых и развитие существующих речных извилин, накопление песков размыва и др.). Моделирование данного типа эволюции сосредоточено на изменении отдельно взятого русла и не рассматривает речную систему в целом [8, 9].

Макроэволюция состоит в изменении речной сети в целом – зарождение речной системы, выделение главных русел, развитие их приточной системы и конкуренция речных бассейнов. Далее рассматривается именно этот тип эволюции.

После изучения существующих методов моделирования речных систем мы остановились на алгоритме, предложенном R.L. Leheny и S.R. Nagel [10] (далее для краткости именуемом LN-алгоритмом). LN-алгоритм достаточно прост, но тем не менее позволяет генерировать реалистичные изображения разных типов речных систем.

**2.2. Описание алгоритма.** Общая идеология LN-алгоритма изложена в работе [10], где предлагается совокупность правил перехода для вероятностного клеточного автомата [11], позволяющая генерировать ветвящиеся сети на прямоугольной решетке. При его практической реализации возникли некоторые технические проблемы, для преодоления которых нам потребовалось ряд правил доопределить. Кроме того, в алгоритм была введена возможность использования скважинных данных. Ниже приведено описание модифицированного алгоритма, примененного в наших исследованиях.

Участок местности заменяется прямоугольной решеткой, в узлах которой заданы высоты  $h(x, y)$  (рис. 1). Количество узлов решетки на прямых, параллельных осям  $Ox$  и  $Oy$ , предполагается равным  $L_x$  и  $L_y$ , соответственно. Моделирование начинается с простейшего ландшафта, лишенного каких-либо характерных черт

$$h(x, y) = Ix. \quad (1)$$

Здесь

$$I = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{L_x - 1}$$

– параметр, определяющий первоначальный уклон (рис. 2).

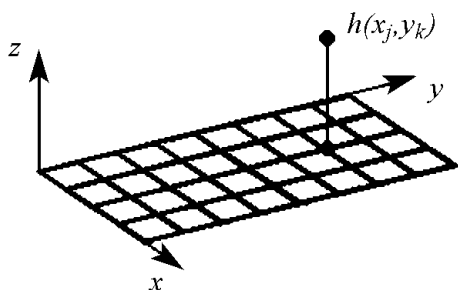


Рис. 1.

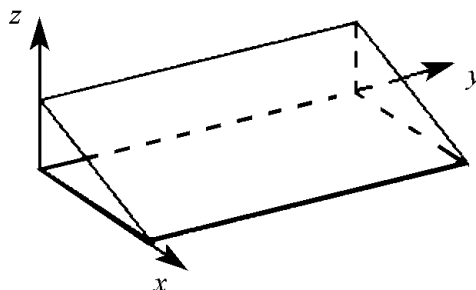


Рис. 2.

Вода поступает в виде дождевых осадков: единица объема жидкости (ниже условно именуемая «каплей») выпадает в случайно выбранном узле решетки (рис. 3). Дальнейшее перетекание капли из узла в узел также носит случайный характер: вероятность выбора одного из ближайших четырех узлов определяется формулой

$$P(\Delta h_i) = \begin{cases} \exp(E\Delta h_i) / \sum_{r=1, \Delta h_r \geq 0}^{r=4} \exp(E\Delta h_r), & \Delta h_i \geq 0, \\ 0, & \Delta h_i < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $\Delta h_i = h_0 - h_i$ ,  $h_0$  – высота местности в рассматриваемом узле,  $h_i$  – высота в соответствующем соседнем узле. Кроме того, капля не может вернуться в узел сразу после того, как она его покинула, за исключением случая, когда это единственное направление с положительной вероятностью перехода.

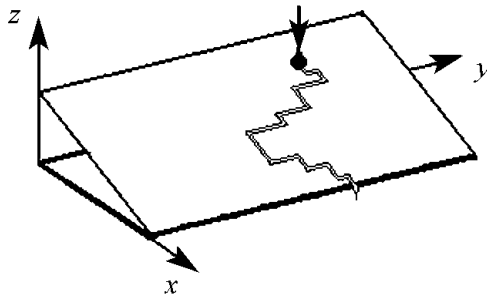


Рис. 3.

Формула (2) является эмпирическим соотношением, достаточно традиционным для задач о неоднородном случайном блуждании на целочисленной решетке. Экспоненциальная зависимость в (2) обеспечивает стекание потоков с крутых склонов и формирование речных извилин в более ровной местности.

Капля движется от узла к узлу в соответствии с законом (2) до тех пор, пока не попадет на нижнюю или верхнюю границу решетки. Если возникает тупиковая ситуация (из внутреннего узла невозможно перетекание в какой-либо другой), то «застрявшая» капля возвращается в ранее пройденные узлы – до тех пор, пока не появится другой вариант траектории.

Капля движется от узла к узлу в соответствии с законом (2) до тех пор, пока не попадет на нижнюю или верхнюю границу решетки. Если возникает тупиковая ситуация (из внутреннего узла невозможно перетекание в какой-либо другой), то «застрявшая» капля возвращается в ранее пройденные узлы – до тех пор, пока не появится другой вариант траектории.

После достижения каплей границы решетки высота каждого узла, через который прошел поток, уменьшается на  $D$  единиц (имитация эрозии)

$$h(x, y) \rightarrow h(x, y) - D. \quad (3)$$

Разности высот в соседних узлах сравниваются с некоторым критическим значением  $M$ . Если в некотором узле нарушено условие

$$\Delta h = \min_{r=1,4} \Delta h_r < M, \quad (4)$$

высота узла уменьшается (имитация склоновых процессов, в частности, осыпания берега при размыве)

$$h(x, y) \rightarrow h(x, y) - \Delta h/4. \quad (5)$$

Осыпавшаяся масса грунта считается унесенной потоком. «Склоновые процессы» прекращаются тогда, когда во всех узлах наклоны удовлетворяют условию (4).

Расчет размывания склонов потоком после выпадения очередной «капли» является шагом LN-алгоритма.

После нескольких шагов можно выделить речную сеть. Рассматривается «контрольный» дождь, капли которого падают на все узлы решетки. Выпавшие осадки перемещаются в направлении наибольшей крутизны спуска до достижения нижней границы участка. Точки, через которые прошло не менее  $R$  единиц объема жидкости, считаются частью реки.

Для визуального представления синтезированной речной системы можно использовать разные приемы. Можно, например, ставить кружки одного и того же радиуса в тех узлах, где поток превышал определенное значение – выделять «структуру» речной системы. Другой прием – рисовать в узлах кружки с радиусами, пропорциональными потоку, прошедшему через эти узлы.

При обсуждении возможной геометрии нефтяного резервуара руслового типа необходимо принимать во внимание скважинные данные как самый достоверный источник информации о том, через какие точки русло проходило и где его не было. Для использования такого рода информации правила LN-алгоритма были несколько изменены. В окрестности узла, через который, в конечном итоге, должно пройти речное русло, вероятности перехода изменялись таким образом, что капля с большей вероятностью двигалась по направлению именно к этому узлу. «Приподняв» рельеф в каком-то узле на начальном этапе, можно заставить речные русла в дальнейшем его обходить.

*Замечание.* LN-алгоритм пренебрегает вкладом силы Кориолиса в формирование геометрии речной системы. Оценки, обосновывающие возможность игнорирования силы Кориолиса при рассмотрении даже умеренно меандрированных русел, приведены в Приложении.

**2.3. Общая характеристика результатов проведенных численных экспериментов.** При проведении численных экспериментов по моделированию речных русел мы выбирали параметры модели, удовлетворяющие условиям

$$EI < 1, \quad D > I, \quad M \gg D. \quad (6)$$

Первое из неравенств (6) обеспечивает слабое влияние уклона на первоначальные потоки и способствует формированию извилистых речных русел. При выполнении второго условия поток, достигший уже существующего русла, далее будет двигаться именно этим руслом. Третье неравенство означает, что интенсивность обусловленной стекающими осадками эрозии мала. Параметр  $R$  в расчетах изменялся от 25 до 150 – как оказалось, это не приводило к существенному различию статистических характеристик получившихся речных систем. Пример синтезированной речной системы приведен на рис. 4.

Численные эксперименты выявили два этапа эволюции речной системы, существенно различающиеся по характерным временам. На начальной стадии осадки выпадают на неразмытый склон и образуют стекающие без взаимных пересечений извилистые потоки. «Первичная» речная сеть напоминает ветвящиеся образования, возникающие при формальном синтезировании речной сети на основе модели случайных блужданий [12]. В дальнейшем

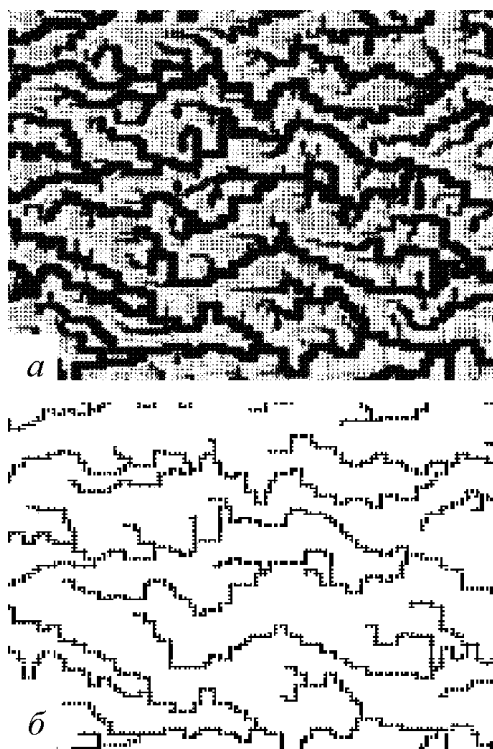


Рис. 4. Пример речной системы (а) и ее структура потока (б). Параметры модели: решетка  $191 \times 191$ ,  $I = 0.0158$ ,  $D = 0.5$ ,  $M = 300$ . Количество итераций равно 2500

происходит медленное углубление русел и наблюдается своеобразная «борьба за выживание» у притоков: выделяются главные и исчезают второстепенные.

Описанные процессы вполне соответствуют положениям классической теории эволюции речных систем, основы которой были заложены американским ученым В.С. Глоком еще в 30-е годы прошлого века [13]. Глок выделил стадии «распространения» и «интеграции» речной сети. На стадии «распространения» речная сеть удлиняется (растут основные притоки) и усложняется (появляются притоки притоков, притоки притоков притоков и т.д.). При последующей интеграции происходит исчезновение второстепенных притоков. Основные водные потоки «оптимизируют» геометрию русел, сокращая путь к морю.

Дополнительным подтверждением реалистичности результатов моделирования служат различные статистические закономерности, воспроизводимые в численных экспериментах. Например, подтверждается закон Хака, связывающий площадь речной системы  $A$  (площадь, на которую выпадают поступающие в речную систему осадки) с длиной главной реки  $L_p$ :  $L_p \sim A^a$ , где  $a$  – некоторая константа [14].

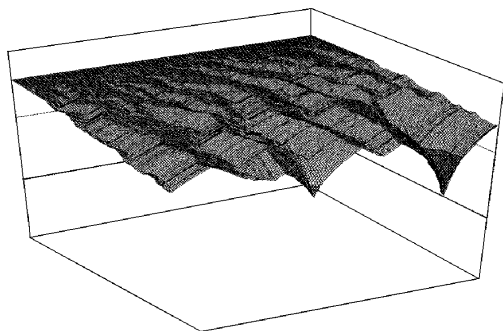


Рис. 5.

Своего рода «побочным» продуктом обсуждаемой методики является возможность синтезировать рельеф местности, в которой располагается речная система. На рис. 5 в качестве примера представлен рельеф, сформировавшийся после 15000 итераций. Хорошо прослеживаются вымываемые речными системами «каньоны» – результат эрозии поверхности за счет стекания капель и обвалов.

Тем не менее, получаемому рельефу не следует придавать большого значения – в большинстве случаев его характер определяется факторами, отсутствующими в нашей модели.

**2.4. Влияние параметров модели на характеристики синтезируемых речных систем.** Начнем с обсуждения параметра обрушения  $M$ . Обвалы играют огромную роль в рассматриваемой модели эволюции речной системы, так как именно они обеспечивают конкурентную борьбу русел друг с другом, приводят к исчезновению мелких ручейков и развитию крупных рек. Параметр  $M$  определяет вид «каньонов» – крутизну их склонов, и в конечном итоге влияет на скорость эволюции речной системы.

Следует отметить, что в численных экспериментах вызванная обвалами и эрозией рельефа конкуренция русел после достаточно большого числа итераций приводит к вырождению синтезируемой речной системы и к утрате ее сходства с реальными речными системами. «Разумное» количество итераций  $N$  можно установить на основе простых оценок. Считаем, что речная система становится вырожденной при слиянии всех русел в одно и при достижении сравнимого с  $L_y$  расстояния меж-

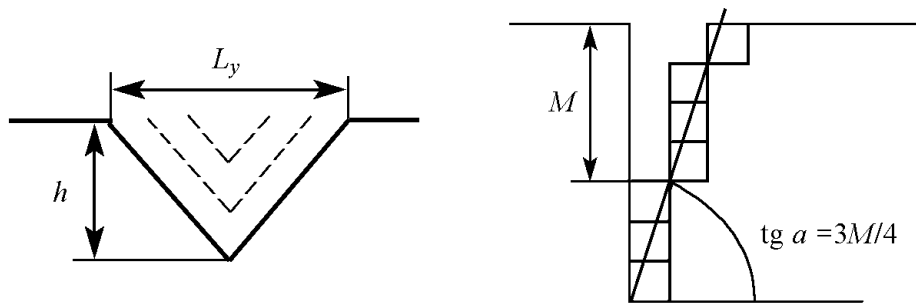


Рис. 6.

ду кромками «каньона»;  $L_y$  – характерный линейный масштаб рассматриваемого участка местности (рис. 6, *a*). Из рис. 6, *б* следует, что угол  $\alpha$ , определяющий максимальную крутизну склона, удовлетворяет уравнению

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{3M}{4}. \quad (7)$$

Соответственно, глубина «каньона» на этапе вырождения

$$h = \frac{L_y \operatorname{tg} \alpha}{2}. \quad (8)$$

Количество итераций, необходимое для достижения такой глубины,

$$N \sim \frac{1}{D} \frac{L_y}{2} \frac{3M}{4}. \quad (9)$$

Исходя из формулы (9), можно сделать вывод, что в экспериментах, промежуточный результат которых изображен на рис. 4, вырождение наступает после 40000 итераций.

Далее мы будем использовать следующие количественные характеристики речных систем: извилистость основного русла  $S$  и сложность речной системы  $C$ . Извилистостью называют отношение расстояния от истока до устья к полной длине русла. Сложность определяется средним расстоянием между притоками.

Параметр  $E$ , фигурирующий в показателе экспоненты в основной для рассматриваемого подхода формуле (2), влияет наиболее заметным образом на эти характеристики синтезируемых речных систем (рис. 7). Понятно, что увеличение этого параметра усиливает корреляцию между направлением движения капли и направлением на узел, обеспечивающий максимальный перепад высот – извилистость русла уменьшается. С другой стороны, численные эксперименты показали, что при значениях параметра  $E < 1$  направление перетекания практически не зависит от перепада высот – генерируются речные системы с извилистостью основного русла  $S \approx 2$ . Это

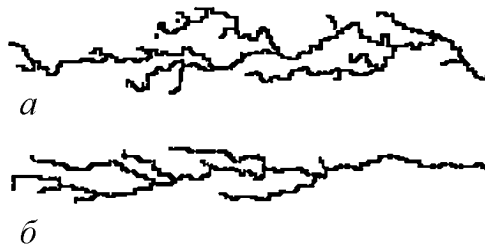


Рис. 7. Геометрия речных систем, возникающих при  $E = 5.0$  (*a*) и при  $E = 25.0$  (*б*)



значение извилистости является предельным для LN-алгоритма – для построения речных систем с большей извилистостью нужно использовать другие алгоритмы.

Результаты численных экспериментов свидетельствуют также о том, что параметр  $E$  является единственным параметром модели, оказывающим влияние на среднее расстояние между притоками – при увеличении  $E$  значение  $C$  увеличивается приблизительно линейным образом.

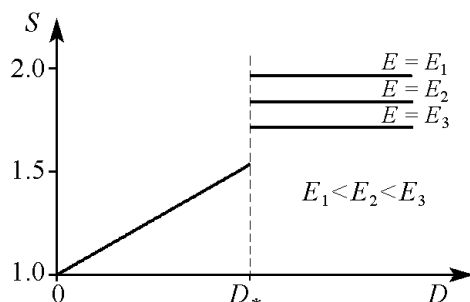


Рис. 8. Зависимость извилистости синтезируемого речного русла от параметра  $D$  при разных значениях  $E$

При  $D < D_*$  направление перемещения капли определяется преимущественно «затравочным» наклоном рельефа. При  $D > D_*$  извилистость практически не зависит от значения параметра эрозии, а уровень характерного «плато» на графиках  $S$  как функции  $D$  определяется значением параметра  $E$  в соответствующих численных экспериментах.

Завершая обсуждение характера влияния различных параметров на свойства синтезируемых речных русел, мы можем отметить, что опыт, приобретаемый после серии экспериментов, позволяет специалисту уверенно «играть» параметрами модели для получения желаемой геометрии речной системы.

### 2.5. Эксперименты по адаптации синтезируемых русел под скважинные данные.

Эксперименты по построению русел, проходящих через узлы из

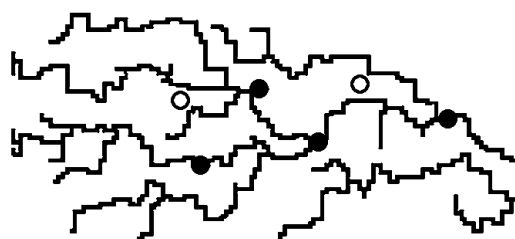


Рис. 9. Синтезированная речная система, удовлетворяющая скважинным данным. Черные кружки соответствуют узлам из множества  $M_A$ , светлые – узлам из множества  $M_R$

множества  $M_A$  и обходящие узлы из множества  $M_R$ , были относительно немногочисленными и предпринимались преимущественно с целью проверки работоспособности модифицированного варианта LN-алгоритма. В качестве примера на рис. 9 представлены результаты численного эксперимента, в котором множества  $M_A$  и  $M_R$  были выбраны из соображений качественного соответствия скважинным данным, относящимся

к Киньяминскому месторождению Угутской группы. Данное месторождение сложно резервуарами речного типа, приуроченными к юрским отложениям. Результаты моделирования хорошо согласуются с общими геолого-геофизическими представлениями о строении месторождения.

### **3. Перспективы использования и дальнейшего развития предлагаемого подхода**

Критически оценивая результаты моделирования, следует признать, что у реальных речных систем есть ряд важных свойств – важных с точки зрения понимания строения нефтяных резервуаров, не воспроизводимых LN-алгоритмом. В условиях аллювиального осадконакопления разным участкам речных русел отвечают разные фациальные типы, например, песчаный материал локализуется в виде наносных тел (баров) вдоль русел рек в зависимости от их извилистости. На синтезируемых изображениях речных систем присутствуют только русловые линии – некий хребет, относительно которого в дальнейшем следует позиционировать речные фации. Если рассматривать речные системы больших рек, обладающих низкой извилистостью, немногочисленными притоками и располагающимися на территориях с характерным масштабом порядка  $10^3$  км, то сходство будет достаточно хорошим. Если же этот масштаб меньше, то геометрия синтезированной речной системы требует корректировки: в верховьях реки русло должно обладать меньшей извилистостью, а по мере продвижения потока к устью меандрирование усиливается, достигая максимума на предустьевой равнине.

Следует также отметить, что большая часть месторождений не превосходит характерного размера в 20–30 км. Месторождения с характерным размером более 30 км являются очень крупными и встречаются достаточно редко. Среднее расстояние между притоками даже маленьких рек больше 30 км и, рассматривая их в таком масштабе, в первую очередь следует сосредоточиться на моделировании эволюции речного канала и связанных с этим седиментологических процессах.

Специального исследования заслуживает и анализ возможности более широкого использования в адаптивном моделировании информации о палеогеоморфологических и литолого-фациальных особенностях изучаемого региона.

### **Заключение**

Концепция адаптивного моделирования демонстрирует продуктивность использования после надлежащей модификации гидрологических моделей для нужд нефтяной отрасли. Главное отличие подхода от уже известных состоит в том, что строение резервуаров рассматривается с позиции их формирования и дальнейшей эволюции. Наряду с уменьшением зависимости от субъективного мнения геолога, это помогает выделить главные факторы, влияющие на строение резервуара и глубже осознать сам процесс его появления.

Достоинствами являются также простота программной реализации и наличие модели, не применявшейся ранее в нефтяных приложениях, но достаточно хорошо изученной гидрологами.

К недостаткам можно отнести сложность подбора правил моделирования. Степень разнообразия генерируемых объектов существенно зависит от сложности задаваемых правил – простые правила приводят к менее гибким моделям.

Дальнейшее развитие данного подхода могло бы состоять в рассмотрении более сложных моделей речных систем и русел, позволяющих дать более аккуратное описание меандрирования. Возможны и другие варианты использования методов гидрологического моделирования. Предположим, например, что по сейсмическим данным установлено наличие холмистой поверхности, являющейся фундаментом для накопления осадочных пород. Для корректного распределения осадочных пород в соответствии с их типом по фундаменту, требуется знать, каким образом они осаждались по поверхности, где наблюдалось их накопление, а в каких участках осадочные породы размывались. Таким образом, в этом случае тоже потребуется моделирование водных потоков, рассматриваемое в данной работе.

Авторы выражают благодарность Д.Ю. Голованову и К.В. Седых за полезные обсуждения возможных подходов к моделированию нефтяных резервуаров.

## Приложение

### Оценка влияния силы Кориолиса

На боковую проградацию речного русла влияют центробежные силы на изгибах дуги, а также сила Кориолиса, которая действует по всему речному руслу. Сравним вклад каждой из этих сил в размывание речного берега.

Сила Кориолиса, действующая на единицу объема жидкости, имеет величину

$$f_{\text{cor}} = 2\rho v\omega \sin \delta. \quad (\text{П1})$$

Здесь  $\rho$  – плотность жидкости,  $v$  – средняя скорость потока,  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\delta$  – угол между направлением скорости потока и вектором угловой скорости.

Центробежная сила вычисляется по формуле

$$f_{\text{cen}} = \frac{\rho v^2}{R}. \quad (\text{П2})$$

Здесь  $R$  – кривизна русла.

Характерную скорость течения равнинной реки можно положить равной 0.5 м/с, угловая скорость вращения Земли  $\omega \approx 7.3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Примем также, что  $\sin \alpha = 1$ .

Легко проверить, что условие

$$\frac{f_{\text{cor}}}{f_{\text{cen}}} \sim \frac{2\omega R}{v} \ll 1 \quad (\text{П3})$$

можно считать выполненным в том случае, когда  $R < R_* = 400$  км (при  $R = R_*$  центробежная сила превосходит силу Кориолиса приблизительно в 10 раз). Так как для русел, послуживших основой для нефтяных резервуаров, условие наличия заметной искривленности обычно выполнено ( $R < R_*$ ), то правомерно пренебрегать влиянием силы Кориолиса  $f_{\text{cor}}$  на процесс их эволюции.

Можно привести еще один довод в пользу того, что в наших расчетах нет необходимости учитывать силу Кориолиса: получаемая система является многоприточной и размывание берегов во многих местах определяется именно впадением притоков.

## Библиографический список

1. Хайн Н.Дж. Геология, разведка, бурение и добыча нефти. М.: Олимп-Бизнес, 2004. 752 с.
2. Krige D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand // Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa. 1951. Vol. 52. P. 119.
3. Wietzerbin L., Mallet J.L. Parametrization of complexe 3D heterogeneities: a new CAD approach // SPE 26423-PA. 1993.
4. Deutsch C.V., Wang L. Hierarchical object-based geostatistical modeling of fluvial reservoirs // SPE 36514. 1996.
5. Shmaryan L.E., Deutsch C.V. Object-based modeling of fluvial/deepwater reservoirs with fast data conditioning: methodology and case studies // SPE 56821-MS. 1999.
6. Strebelle S.B., Journel A.G. Reservoir modeling using multiple-point statistics // SPE 71324. 2001.
7. Strebelle S.B., Payrazyan K. Modeling of a deepwater turbidite reservoir conditional to seismic data using multiple-point statistics // SPE 77425. 2002.
8. Liverpool T.B., Edwards S.F. The dynamics of a meandering river. Preprint cond-mat/9608080 (<http://arXiv.org>).
9. Meakin P., Sun T., Jossang T., Schwarz K. A simulation model for meandering rivers and their associated sedimentary environments // Physica A. 1996. Vol. 233. P. 606.
10. Leheny R.L., Nagel S.R. Model for the evolution of river networks // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71. P. 1470.
11. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику. М.: Наука, 1990. 272 с.
12. Sapozhnikov V.B., Nikora V.I. Simple computer model of a fractal river network with fractal individual watercourses // J. Phys. A: Math. Gen. 1993. Vol. 26. L623.
13. Glock W.S. The development of drainage system: a synoptic view // Geograph. Rev. 1931. Vol. 21. P. 475.
14. Hack J.T. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland // US Geol. Surv. Prof. Paper. 1957. Vol. 294B. P. 45.

Институт прикладной математики  
им. М.В. Келдыша РАН  
Московский физико-технический  
институт,  
ОАО «НК Роснефть»

Поступила в редакцию 25.09.2006  
После доработки 26.03.2007

## NEW APPROACH TO MODELING OF NATURAL FLUVIAL OIL RESERVOIRS

*V.V. Sidorenko, V.N. Surtaev, M.M. Khasanov*

We discuss the conception of the adaptive modeling of the natural oil reservoirs. This conception is based on application of simple mathematical algorithms to imitate the physical processes, defining the reservoir structure. As an example the possibility of fluvial reservoir modeling by a cellular automata is considered.



*Сидоренко Владислав Викторович* – родился в Красноярске (1961), окончил Московский физико-технический институт (1984). Затем становится аспирантом, а после окончания аспирантуры – сотрудником Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Доктор физико-математических наук (1997), профессор МФТИ (по совместительству). Опубликовал 50 научных статей. Основные направления проводимых исследований: теоретическая механика, прикладная математика.



*Суртаев Владимир Николаевич* – родился в Степногорске (Казахстан, 1982). В 2005 году окончил МФТИ и стал сотрудником ООО «Сибнефть-Хантос». В феврале 2007 года перешел в ОАО «НК Роснефть». Заочный аспирант МФТИ, основные научные интересы связаны с нефтяным инжинирингом и прикладной геофизикой.



*Хасанов Марс Магзавиевич* – родился в 1955 г., окончил физический факультет Башкирского государственного университета, затем аспирантуру при Азербайджанском институте нефти и газа. После работы в Институте химии БФАН СССР работал в Уфимском нефтяном институте, затем в Уфимском филиале ООО «ЮганскНИПИнефть», в период с июня 2002 по февраль 2005 г. – Директор по науке ЗАО «ЮКОС ЭП», с февраля 2005 г. – директор по науке ОАО «НК Роснефть». Доктор технических наук, профессор, действительный член РАЕН. Автор 5 монографий, более 140 статей. Член редакционной коллегии журналов «Нефтяное хозяйство», Научно-технический Вестник ОАО «НК Роснефть». Область интересов: механика жидкости и газа, прикладная математика, моделирование и управление сложными системами, нефтяной инжиниринг, проектирование процессов разработки месторождений нефти и газа, компьютерные технологии мониторинга процессов добычи.