

# Повышение достоверности геологической модели объекта со сложной разломной тектоникой на основе привлечения горизонтальных скважин

С.З. Мутаев

главный специалист отдела геологии и разработки  
szmutaev@novatek.ru

ООО «НОВАТЭК Научно-технический центр»,  
Тюмень, Россия

**В настоящее время при разработке залежей углеводородов активно используется бурение горизонтальных скважин по ряду экономических и технологических преимуществ. При построении геологической модели учет горизонтальных скважин может оказаться сложной задачей, поскольку данные по этим скважинам имеют ряд особенностей, а исключение этой информации ведет к существенным неопределенностям. В данной работе описана методика учета всей информации по горизонтальным скважинам, что повышает достоверность геологической модели и, как следствие, повышает обоснованность принятия решений.**

## Материалы и методы

Трехмерное моделирование пласта в программе Petrel, промысловые, геофизические и геолого-технологические исследования.

## Ключевые слова

геологическая модель, горизонтальные скважины, разломы, имидж плотности, геонавигация

В данной работе рассмотрена методика учета горизонтальных скважин в геологической модели для целей уменьшения структурно-тектонических неопределенностей и моделирования свойств. Технология интеграции горизонтальных скважин подготовлена на основе анализа мирового опыта с возможностью использования всей информации по горизонтальным скважинам [1–4]. Технология создания геомодели рассмотрена на примере одного из месторождений ЯНАО. Объект моделирования осложнен сетью тектонических нарушений, отложения характеризуются высокой расчлененностью и латеральной изменчивостью. Разработка залежи ведется рядами горизонтальных скважин.

## Особенности горизонтальных скважин

Информация, получаемая по результатам бурения горизонтальных скважин, имеет свои особенности. Комплекс геофизических исследований в процессе бурения горизонтальных (сильнонаклонных) скважин (LWD — logging while drilling) дает большое количество информации, что позволяет определить не только параметры пласта (литологию, пористость, насыщенность), но и поведение структурной поверхности объекта по интерпретации имиджей плотности (сопротивления), инверсии с прибора картировщика границ и по повторяющимся секциям каротажа [5].

В процессе бурения горизонтальных скважин производится запись имиджа плотности, который регистрирует информацию на 360° вокруг оси скважины, что дает возможность определения взаимного положения слоев относительно друг друга. Кроме того, имидж плотности позволяет определить направление вскрытия пропластка скважиной (сверху вниз или снизу вверх). После записи и обработки данных выполняется их развертка, то есть цилиндрическое сечение скважины разворачивают в прямую плоскость. При вскрытии пропластка сверху вниз на развертке имиджа плотности регистрируются «грустные улыбки», при вскрытии

пропластка снизу вверх, соответственно, «веселые улыбки» (рис. 1).

Стандартный подход к интерпретации ГИС был разработан для вертикальных и наклонно-направленных скважин и хорошо работает для плоско-параллельного напластования. В случае с горизонтальными скважинами сложная геометрия ствола не позволяет использовать коаксиально-цилиндрическую модель для оценки параметров [6]. Таким образом, для интерпретации ГИС в горизонтальных скважинах необходимо использовать индивидуальный подход. Выделение интервалов коллекторов должно быть выполнено с использованием данных имиджей. Прогноз свойств рекомендуется выполнять по методам с низкой глубиной, чтобы показания приборов не были искажены влиянием вмещающих пород при малой толщине пропластков коллектора [7]. Особенно это касается разреза с высокой расчлененностью, каким и является изучаемый объект месторождения.

Помимо информации о свойствах пласта, горизонтальные скважины, ввиду латерального прохождения по пласту, дают информацию об углах поведения структуры и уточнении положения разломов.

## Корреляция горизонтальных скважин

Корреляция является важным этапом в построении структурной модели, особую важность имеет корреляция горизонтальных скважин. Правильное определение стратиграфических границ дает возможность соединения в межскважинном пространстве разновозрастных отложений. Ввиду сложного тектонического строения залежи, горизонтальные скважины часто пересекают одноименные стратиграфические поверхности в разных блоках.

В процессе бурения при прохождении разлома необходимо выполнять позиционирование ствола в разрезе для того, чтобы понимать, в какой части находится текущий забой, и какую стратиграфическую поверхность ствол скважины может пересечь. Таким образом, для корреляции

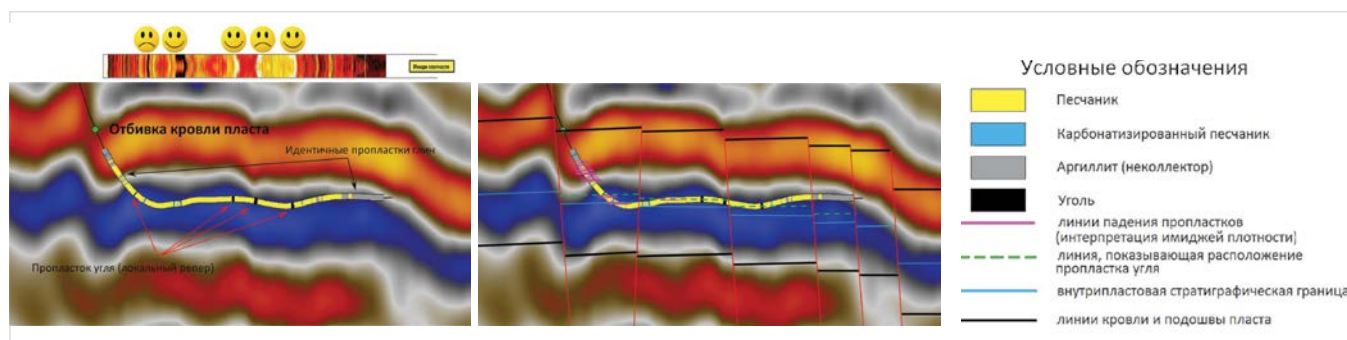


Рис. 1 — Пример корреляции горизонтальной скважины с учетом углов залегания пласта

скважин в обязательном порядке используются сейсмические разрезы в комплексе с результатами структурной интерпретации имиджей плотности (рис. 1). Кроме того, для прослеживания одноименных пропластков в горизонтальной скважине в качестве ориентира привлекаются планшеты, построенные по результатам геонавигации скважин. Прослеженные одноименные пропластки используются в качестве локальных реперов при корреляции горизонтальных скважин, что обеспечивает соединение однотипных слоев в межскважинном пространстве и корректное восстановление расчлененности.

#### Выделение разломов

Для эффективной разработки залежи важно учитывать наличие и положение разломов, поскольку они могут быть тектоническими экранами и оказывать влияние на потоки флюидов, а также влиять на распределение давления в залежи.

При выделении разломов на месторождении был выполнен анализ большого объема информации (сейсмические данные, промыслово-геофизические исследования (ПГИ), геолого-технологические исследования (ГТИ), имиджи плотности, данные ГИС), в том числе, ранжирование разломов.

Основная часть разломов выделена по результатам интерпретации трехмерных сейсмических данных. Данная серия разломов характеризуется амплитудой сдвига более 5–10 м и протяженностью от первых сотен метров. Тектонические нарушения малого масштаба и смещения, по данным одной лишь сейсморазведки, идентифицируются с некоторой неопределенностью. Поэтому по стволу горизонтальных скважин с использованием сейсмических атрибутов, результатов интерпретации имиджей плотности и данных ГТИ выполнялось уточнение положения уже выделенных разломов и выделение дополнительной серии более мелких (локальных) малоамплитудных (амплитудой до 5 м) и безамплитудных разломов. Прослеживание этой группы разломов выполнялось по кубу вероятности разломов, полученному в модуле FaultSpark программного пакета Insight Earth. Данный куб использовался не в качестве альтернативы, а как дополнительный источник информации.

По стволу горизонтальных скважин производилось выявление только тех мелких разломов, наличие которых не вызывало сомнений, то есть разлом подтверждался рядом методов. Выделение таких разломов лишь по одному из методов не является надежным.

Разлом выделяется, если:

- по сейсмическим материалам однозначно идентифицируется по сдвигу фаз на временном разрезе, прослеживается в вертикальном и латеральном направлениях по кубу вероятности разломов (рис. 2);
- по имиджам плотности наблюдается прерывание слоистости четкой субвертикальной границей (рис. 3 а);
- по ГИС видны значительные изменения значений сопротивления и радиоактивных методов (УЭС, ГК, ННК, ГГК-п) при пересечении дизъюнктивной границы (рис. 3 а);
- по материалам ГТИ наблюдается резкое изменение параметров буровой механики (наиболее представительна d-экспонента, характеризующая буримость пород), а также изменение других данных (температура, плотность), поглощение бурового раствора в процессе бурения (рис. 3 б);
- по материалам ПГИ в ряде случаев наблюдается прямая корреляция между аномалиями термометрии и интервалами разломов, что может свидетельствовать о прорывах газа через разломы (рис. 4).

Эти принципы прямо либо косвенно характеризуют наличие разломного нарушения. Таким образом, принимая во внимание важность учета всех тектонических нарушений, было выполнено выделение максимального числа разломов по комплексу данных.

#### Построение структурной модели

Затем выполнялось ранжирование разломов и оценивание необходимости и целесообразности включения разлома в цифровую модель. В качестве критериев ранжирования использовались следующие параметры разломов:

- амплитуда;
- протяженность распространения;
- проводимость.

На основе этих параметров делался вывод о включении/невключении разломов в структурную модель. В итоге в геологическую модель были включены амплитудные (амплитуда смещения более 5 м), протяженные (распространяющиеся на два и более ряда скважин), предположительно проводящие (в процессе бурения в точках пересечения ствола скважины и поверхности разлома получено поглощение бурового раствора) разломы. Таким образом, определены наиболее значимые тектонические нарушения, которые могут влиять на процессы движения флюидов и распределение давления в залежи. В текущей геомодели принято решение о минимальных влияниях на процесс разработки небольших разломов, которыми можно пренебречь. Соответственно, мало- и

безамплитудные разломы были исключены с целью оптимизации гидродинамических расчетов, но, при необходимости, они могут быть привлечены и заданы при гидродинамических расчетах в неявном виде.

Построение структурной поверхности для геологической модели выполнялось с учетом углов поведения структуры, полученных по результатам интерпретации имиджей плотности. Углы, связанные с локальными неоднородностями, были исключены из анализа и не использовались при структурных построениях. При интерпретации имиджей плотности получены элементы залегания (азимут падения и зенитный угол) пропластков вдоль горизонтальных стволов, результаты представлены на рис. 5. График стереонет показывает направление доминирующего падения пропластков (длинные лучи зеленого цвета), результирующее направление падения пропластков показано красной стрелкой. Небольшие красные лучи характеризуют локальные неоднородности и разломы. Азимутальный график проходки показывает значения элементов, полученных при интерпретации имиджей плотности по горизонтальному стволу.

Для уверенности на качественном уровне выполнялось сопоставление значений углов по имиджам с поведением исходной структурной поверхности кровли пласта, построенной по результатам интерпретации трехмерных сейсмических материалов. В большинстве случаев наблюдалось подтверждение направления падения структуры (рис. 6).

Кроме того, для оценки углов поведения структуры использовались данные геонавигации, которые основывались на принципе совмещения диаграмм ГИС в горизонтальном стволе и соседней клаонно-направленной скважине. Однако следует понимать, что расчет углов по такой методике может нести в себе неопределенности, особенно в сильно расчлененном разрезе, каким и является изучаемый объект. Поэтому может быть несколько вариантов такой настройки.

При настройке поведения структурной поверхности и общих толщин объекта применялись фиктивные скважины.

При встраивании разломов в геологическую модель выполнялась оценка амплитуд разломов по сейсмическим данным. В качестве дополнительного инструмента для оценки амплитуды разлома привлекались материалы геонавигации.

#### Построение моделей свойств

Комплекс исследований, выполненных в горизонтальных скважинах, позволяет

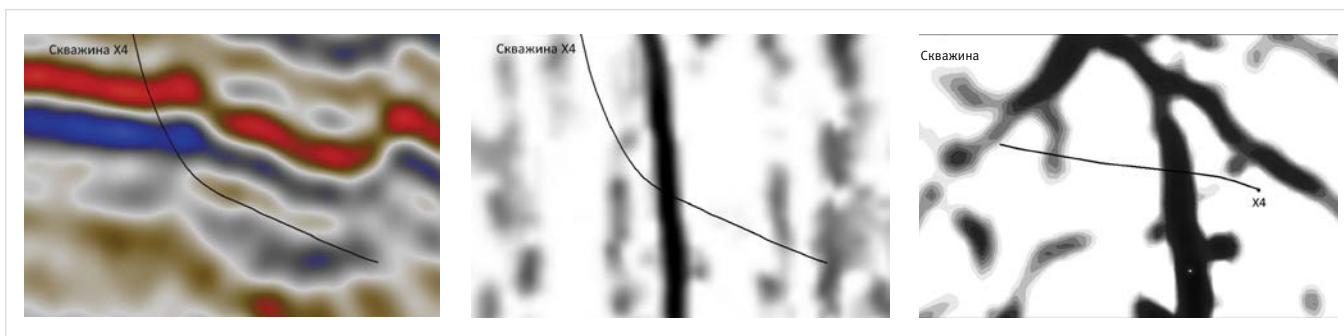


Рис. 2 — Принципы выделения разломов по комплексу сейсмической информации

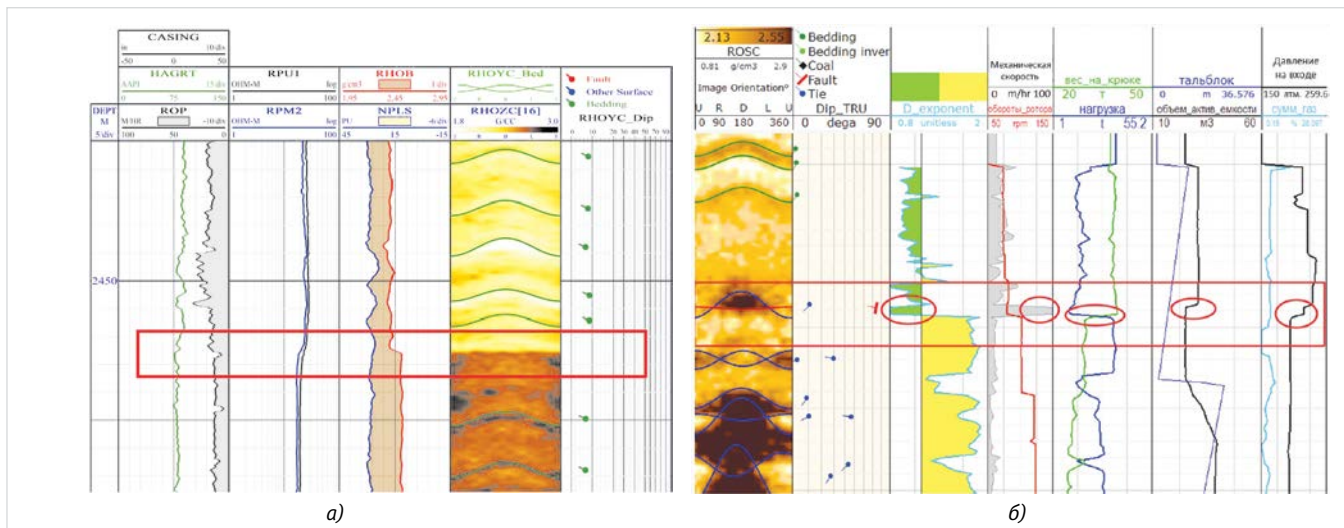


Рис. 3 — Принципы выделения разломов по стволу горизонтальной скважины по комплексу ГИС и ГТИ

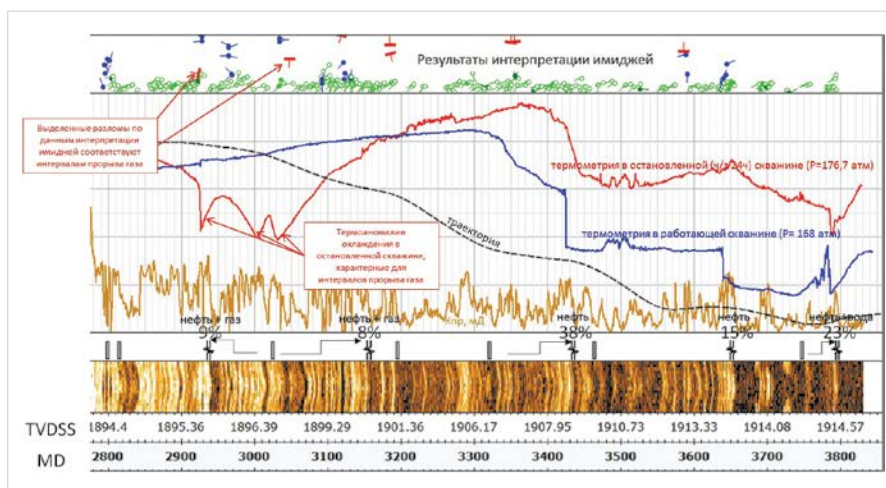


Рис. 4 — Принципы выделения разломов по стволу горизонтальной скважины по комплексу ПГИ

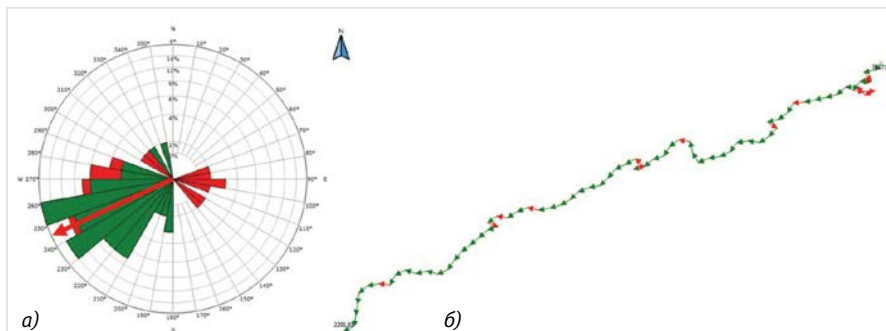


Рис. 5 — Результаты структурной интерпретации на примере скважины X32: а — график стереонет; б — азимутальный график проходки

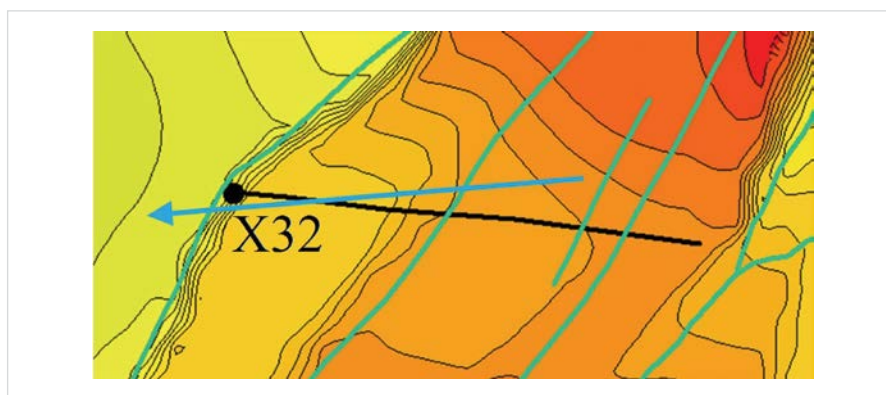


Рис. 6 — Фрагмент структурной кровли пласта в районе скв. X32 (направление падения структурной поверхности показано синей стрелкой)

определить интервалы коллекторов и значения пористости. Определение насыщенности по электрическим методам сопряжено с неопределенностью ввиду значительного влияния вмещающих пород. При моделировании свойств (литология, пористость) в обязательном порядке используются данные по горизонтальным скважинам, поскольку в условиях большого объема горизонтального фонда и изменчивости пласта, неучет этой информации ведет к существенным геологическим неопределенностям.

Ввиду того, что проводку горизонтальных стволов стараются выполнять в пропластках с наилучшими ФЕС и максимальной проходкой по коллектору, статистика по ним не дает реалистичной характеристики разреза. Таким образом, при интерполяции параметров в межскважинном пространстве учитываются все скважины, но из статистики исключается информация по горизонтальным стволам. Данные в интервалах транспортных секций горизонтальных скважин (до башмака) негативного влияния на статистику не оказывают и поэтому включаются в статистическую выборку при моделировании свойств.

При построении модели литологии необходимо выполнять контроль положения кровли коллектора в геологической модели по данным шлама из материалов ГТИ.

#### Итоги

В данной статье рассмотрена методика учета информации горизонтальных скважин при построении геологической модели.

#### Выводы

Подготовлена и опробована методика учета горизонтальных скважин для целей уточнения структурно-тектонического строения и уменьшения неопределенностей распределения свойств объекта:

- детальная корреляция разреза горизонтальных скважин обеспечивает соединение одновозрастных слоев в межскважинном пространстве и восстановление корректной расчлененности,
- интерпретация имиджей плотности в комплексе с дополнительными методами исследований позволила уточнить положение тектонических нарушений и поведение структурной поверхности продуктивного объекта,

- учет результатов интерпретации геофизических исследований горизонтальных скважин с учетом специфики и использование их в распределении свойств увеличивает корректность геологической модели.

Таким образом, использование описанных рекомендаций обеспечивает построение корректной геологической основы для гидродинамических расчетов, что серьезно повышает обоснованность и достоверность принятого решения.

#### Список литературы

1. Omeragic D., Polyakov V., Shetty S., Brot B., Habashy T., Mahesh A., Friedel T., Denichou J.-M. Integration of well logs and reservoir geomodels for formation evaluation in high-angle and horizontal wells. SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, CO, United States, May 14–18, 2011.

2. Polyakov V., Omeragic D., Shetty S., Brot B., Habashy T., Mahesh A., Friedel T., Vik T., Flugsrud L. 3D reservoir characterization workflow integrating high angle and horizontal well log interpretation with geological models. International petroleum technology conference, China, 26–28 March, 2013.
3. Pranata Haruji Muda, Lei Wu, Singh Navpreet, Wu Su, Li Xu, Yatao Yang, Pincheng Wu, Ping Yang. Integrating horizontal wells in 3D geological model using sequence stratigraphic framework in braided channel complex of the Changbei gas field, Ordos Basin, China. International petroleum technology conference, China 26–28 March, 2013.
4. Taoufik Ait-Ettajer, Laurent Fontanelli, Almudena Diaz-Aguado. Integration of horizontal wells in the modeling of

carbonates reservoir. Upscaling and economical assessment challenges. Offshore technology conference. Texas, USA, 5–8 May, 2014.

5. Бондарев Е., Леонтьева О., Шаров М. Новые технологии в геологической проводке на примере Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения. SPE 166917. 2013.
6. Воробьев В.С., Петров А.Н. Использование горизонтальных скважин при построении геологических моделей // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. Москва. ОАО ВНИИОЭНГ. 2014. №12. С. 24–32.
7. Рекомендации к методике построения геологических моделей при подсчете запасов углеводородного сырья. Москва: ФБУ «ГКЗ», 2014.

ENGLISH

GEOLOGY

## Increasing the accuracy of geological model of the object with complicated fault system by horizontal wells engaging

UDC 551

#### Author:

**Salavat Z. Mutaev** — chief specialist; [szmutaev@novatek.ru](mailto:szmutaev@novatek.ru)

“NOVATEK Scientific and Technical Centre” LLC, Tyumen, Russian Federation

#### Abstract

Nowadays drilling horizontal wells for hydrocarbon deposits development is in great request, as it has number of economic and technological advantages.

It should be noted, that correction of horizontal wells in geological modeling can be challenging, because the data from these wells has a number of features and data exception leads to substantial uncertainties. The article describes the methodology for using horizontal wells data, that improves the accuracy of geological model, and thus it increases accuracy of decision-making.

#### Materials and methods

3D modeling of geologic horizon

in Petrel, industrial, geophysical, geological and technological investigations.

#### Results

The methodology for correction horizontal wells data in geological model is described in the article.

#### Conclusions

The methodology for horizontal wells correction is prepared and tested to improve structural model and decrease the uncertainty of property parameters:

- detailed correlation of horizontal wells provides connection of time-equivalent layers in interhole dimension and correct compartmentalization,

- density image log interpretation in conjunction with additional investigation data affords to specify the location of faults and behavior of structure,
- correction of specific well log interpretation and applying it in property distribution increases accuracy of geological model.

As a result, consulting the instructions provides conversion of well-formed geological model and flow assurance, it increases accuracy of decision-making.

#### Keywords

geological model, horizontal wells, faults, azimuthal density image log, geosteering

#### References

1. Omeragic D., Polyakov V., Shetty S., Brot B., Habashy T., Mahesh A., Friedel T., Denichou J.-M. Integration of well logs and reservoir geomodels for formation evaluation in high-angle and horizontal wells. SPWLA 52nd Annual Logging Symposium, CO, United States, May 14–18, 2011.
2. Polyakov V., Omeragic D., Shetty S., Brot B., Habashy T., Mahesh A., Friedel T., Vik T., Flugsrud L. 3D reservoir characterization workflow integrating high angle and horizontal well log interpretation with geological models. International petroleum technology conference, China, 26–28 March 2013.

3. Pranata Haruji Muda, Lei Wu, Singh Navpreet, Wu Su, Li Xu, Yatao Yang, Pincheng Wu, Ping Yang. Integrating horizontal wells in 3D geological model using sequence stratigraphic framework in braided channel complex of the Changbei gas field, Ordos Basin, China. International petroleum technology conference, China 26–28 March, 2013.
4. Taoufik Ait-Ettajer, Laurent Fontanelli, Almudena Diaz-Aguado. Integration of horizontal wells in the modeling of carbonates reservoir. Upscaling and economical assessment challenges. Offshore technology conference. Texas, USA, 5–8 May, 2014.
5. Bondarev E., Leont'eva O., Sharov M. *Novye tekhnologii v geologicheskoy*

*provodke na primere Yuzhno-Tambeyskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Innovative technologies in geosteering by the example of Yuzhno-Tambeiskoye gas condensate field]. SPE 166917, 2013.

6. Vorob'ev V.S., Petrov A.N. *Ispol'zovanie gorizontol'nykh skvazhin pri postroenii geologicheskikh modeley* [Use of horizontal wells while building geological models]. Geology, geophysics and development of oil and gas fields, 2014, issue 12, pp. 24–32.
7. *Rekomendatsii k metodike postroeniya geologicheskikh modeley pri podschete zapasov uglevodородного syr'ya* [Recommendations to the procedure of construction of geological models in the calculation of hydrocarbon reserves]. Moscow: FBU “GKZ”, 2014.