



## Представляем Geosteer Well On Paper™ новый важный этап строительства скважин

Как стадия планирования может предвосхитить ошибку геостиринга

## Introducing Geosteer Well On Paper™ A New Important Step in the Well Delivery Process

How the Planning Phase can Foreshadow Geosteering Failure

Петр Прзыбыло

Piotr Przybylo

Успех любого процесса геостиринга определяется на этапе планирования. Настоящая статья представляет наиболее важные аспекты планирования скважин, которые напрямую влияют на эффективность и рентабельность процесса геостиринга при бурении. Эти критические вопросы, которые часто не замечают или вообще не учитывают при планировании, оказывают существенное воздействие на процесс, поскольку их отрицательное влияние во время бурения нельзя уменьшить или обратить вследствие. Поэтому, если их не учитывать на стадии планирования, они обрекут скважину на аварийную ситуацию еще до начала процесса геостиринга. Статья предлагает введение нового важного этапа в процесс строительства

The success of any geosteering process is determined at the planning stage. This article will present the most crucial aspects of well planning which directly impact the effectiveness and efficiency of the geosteering process while drilling. These critical matters, often overlooked or omitted during planning, have a significant effect on the process as their negative impact cannot be mitigated or reversed while drilling. Thus, if not taken into account during the planning stage, they will condemn the well to failure before the geosteering process has even commenced. The article proposes an introduction of a new crucial step in the well delivery process, a Geosteer Well On Paper™ (GWOP) exercise during which all the required steering activity's due diligence should take place.

скважин — проведение Geosteer Well On Paper™ — геостириринг скважины на бумаге (ГСНБ), во время которого должен проводиться комплексный анализ всех мероприятий, требуемых при сопровождении скважины.

### Геостириринг горизонтальных скважин

При обычном наклонном бурении траектория ствола скважины направляется в соответствии с заранее установленным геометрическим планом, который определяется жесткими границами модели. Цель обычной скважины состоит просто в как можно более близком следовании линии. Геостириринг — это отступление от этого порядка, поскольку он включает использование потоковую регистрацию данных о бурении (РДБ) в реальном времени. Главная цель геостириринга заключается в наиболее оптимальном воздействии на пласт путём сокращения непроизводительных интервалов.

В противоположность обычным скважинам, направление ствола скважины с помощью геостириринга постоянно оценивается и корректируется в процессе бурения. Так как точную траекторию скважины нельзя подтвердить на стадии планирования, геостириринг служит своего рода непредвиденным обстоятельством для всех неопределенностей и возможных отклонений от плана, с которыми скважина может столкнуться во время бурения (Рис. 1)

### Планирование горизонтальных скважин

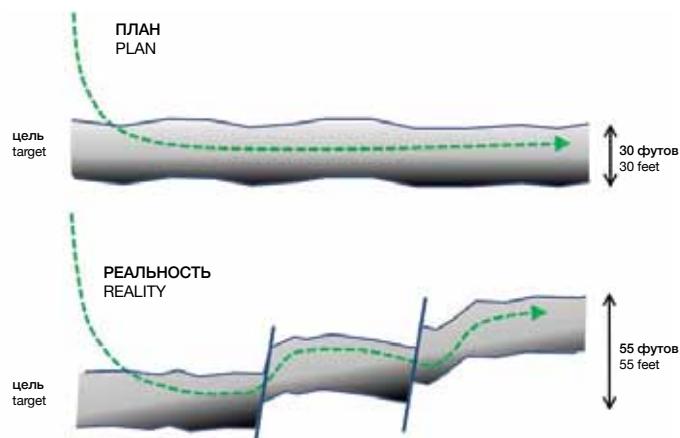
Успех любого процесса геостириринга берет начало от первого этапа планирования. Эксплуатационные группы должны быть более информированы о факторах, которые напрямую воздействуют на процесс геостириринга. Эти факторы, если на них не обращать внимание или пустить их на самотек, могут привести к тому, что цели геостириринга не будут достигнуты. Самыми важными вопросами, на которые следует согласовать перед бурением, являются следующие:

- Порядок работы забойного блока и стабилизаторов
- Порядок планирования расстояния между скважинами в условиях используемой инклинометрии
- Осведомленность об имеющихся неопределенностях относительно цели бурения
- Определение целей и их распределение вдоль траектории ствола скважины
- Ограничения, связанные с интенсивностью отклонения
- Общие величины углов восстания планируемой траектории

### Geosteering Horizontal Wells

In conventional deviated drilling, the well path is steered according to a predetermined geometrical plan defined by rigid boundaries of the model. The objective of a conventional well is simply to follow the line as closely as possible. Geosteering is a departure from this convention as it involves the use of real time streaming of logging while drilling data (LWD) to help placing a horizontal wellbore in the most optimal position. The main objective of geosteering is the most optimal reservoir exposure by minimizing non-productive intervals.

Contrary to conventional wells, the targets of a geosteered wellbore are continuously evaluated and modified while drilling. Since the exact trajectory of the well cannot be verified at the planning stage, geosteering acts as a contingency for all the uncertainties and possible deviations from the plan which the well might encounter during drilling (Fig. 1).



**Рис. 1:** Упрощенный пример сравнения плана перед бурением со случаем после бурения и преимущества геостириринга, при котором направление бурения постоянно переопределяется и изменяется. Обратите внимание на несоответствие между запланированной и реальной толщиной пласта вдоль всего сечения горизонтальной скважины (сечения пласта). Хотя истинно стратиграфическая толщина цели осталась неизменной, сбросообразование создает относительную более толстую цель, в которой должна быть размещена скважина.

**Fig 1:** Simplified example of pre-drill plan versus post-drill case and the advantage of geosteering where drilling direction is constantly re-evaluated and modified. Note the planned versus real-life discrepancy of the reservoir thickness across the entire horizontal well section (reservoir section). Although the true stratigraphical thickness of the target remained unchanged, the faulting created a relative thicker target within which the well must be placed.

### Planning of Horizontal Wells

The success of any geosteering process commences on the first day of the planning stage. The operational teams need to have an increased level of awareness in relation to the factors that will directly impact the geosteering process. These factors, if undecided or left to chance, may result in failure to meet the geosteering objectives.

## Комплект нижней бурильной колонны

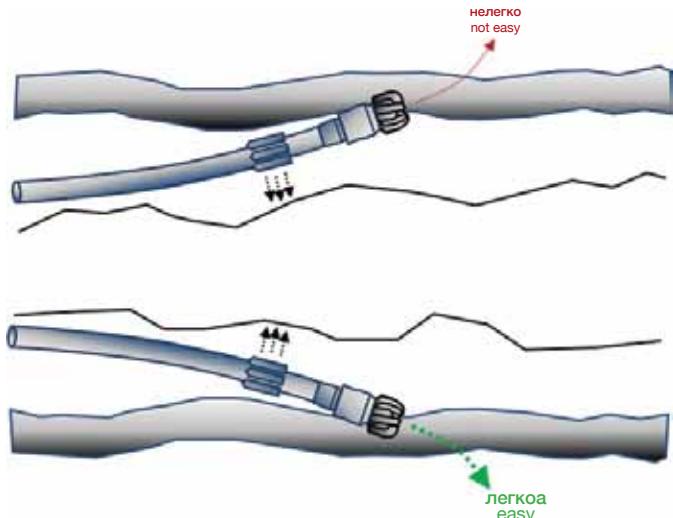
Тип роторной управляемой системы (РУС) влияет на эффективность сопровождения и определяет то, насколько быстро можно достигнуть нужного угла наклона скважины. Обычно в РУС применяются два принципа сопровождения направленного бурения: с направлением долота и с отклонением долота. В общих чертах, РУС с направлением, либо с отклонением долота позволяет достичь максимального угла восстания примерно 6–8 градусов на 100 футов при диаметре долота инструмента КНБК 8½ дюйма (Sugiura et al., 2014) и, вероятно, оба варианта с одинаковой степенью применимы для геостириинга.

При этом важнейшей характеристикой обеих систем является чувствительность к механическим свойствам геологической структуры. В случае системы с отклонением долота требование фиксации противоположной стороны скважины для изменения траектории создает необходимость выдерживания номинального диаметра при таком действии. Вымоины в стволе и неровности стенок скважины могут оказать отрицательное воздействие на выдерживание направления этими системами. Забуривание бокового ствола существующей скважины так же может быть проблематичным для системы с отклонением долота, потому что башмак не может соприкасаться со стенкой скважины из-за расширения ствола, которое происходит в точке отклонения скважины от вертикали. Поэтому систему с отклонением долота не следует выбирать для бурения мягких, легко вымываемых пород (Рис. 2).

Соответственно выбор системы РУС должен основываться на типе породы, которую необходимо бурить. Относительно твердые породы требуют применения РУС не такой, как в случае мягких пород. Для оптимизации проводки направления скважины система с направлением долота окажется наиболее эффективной в мягких породах, тогда как прижимающая сила (система с отклонением долота) даст лучшие результаты в твердых породах (Griffiths, 2009). Эту характеристику следует тщательно определять на основе типа породы, которую предстоит бурить, поскольку она окажет существенное воздействие на ход геостириинга и сможет воспрепятствовать достижению нужной траектории.

## Порядок работы стабилизаторов

Комплект нижней бурильной колонны (КНБК) вместе со стабилизаторами и бурильными трубами, который будет использоваться для бурения, проектируется на стадии планирования. Они помогают направлять долото и играют важную роль в наклонном бурении,



**Рис. 2:** Для систем с отклонением долота проходка твердых слоев, расположенных над КНБК, может стать проблематичной из-за силы тяжести. Таким образом, маневр с бурением вниз через твердый слой более эффективен. Если необходимо бурение через твердый слой, расположенный выше, рекомендуется изменить угол ввода (угол атаки). Повышение осевой нагрузки на долото недопустимо. Есть другие варианты успешного пробивания твердого слоя с помощью системы с отклонением долота:

- Кратковременная попытка медленного бурения
- Долото с рабочей длиной по меньшему калибру
- Долото с активными резцами по калибру
- Применение ограничительного сопла для управления смытом породы и/или его ограничения
- Предварительное планирование с учетом столкновения с горизонтами, содержащими твердые слои/пропластики/кремнистые породы.

**Fig 2:** For push-the-bit systems, cutting through hard layers located above the BHA may be problematic due to gravity. The maneuver of drilling down through a hard layer is consequently more effective. If it is necessary to drill through a hard layer located above, a change of an incident angle (an angle of attack) is recommended. Increasing WOB is not an option. Other options for a successful punch through a hard layer with push-the-bit system are:

- Attempt time drill for shorter duration of time
- Shorter gauge length bit
- Bit with active gauge cutter design
- Application of restrictor nozzle to control/limit formation washout
- Pre-job planning with awareness of encountering hard layers/stringers/chert rich horizons.

The most important points which need to be agreed upon prior drilling include:

- Bottom hole assembly and stabilizers strategy
- Applied survey spacing strategy
- Acknowledgment of structural uncertainties of the drilled target
- Targets definition and their distribution along the well path
- Dog leg severity limitations
- Overall build rate values of the planned trajectory

так как способствуют определению трассы скважины и угла бурения.

В наклонно направленной или горизонтальной скважине гравитационные и изгибающие силы сгибают любую секцию КНБК, оставленную без опоры (Mantle, 2013/2014). Правильно сконструированный центратор — это главный элемент, предотвращающий такие явления. С другой стороны, можно использовать эти силы при работе для получения нужного результата, а не против него.

Есть некоторые базовые принципы сопровождения (тенденции), которые можно встроить в технологический инструмент для бурения. Это хорошо, если сделано преднамеренно, но если определенная тенденция встроена в КНБК случайно, это может создать существенные препятствия для геостриинга. Можно спроектировать стабилизированный КНБК для создания, удержания или отмены угла, зависящего от расположения стабилизаторов, которые действуют в качестве точек контакта между КНБК и породой (Mantle, 2013/2014).

Если расстояние между двумя стабилизаторами велико, причем один из них расположен относительно близко к долоту, КНБК изгибаются между ними, что приводит к отклонению долота вверх. В результате

## Bottom Hole Assembly

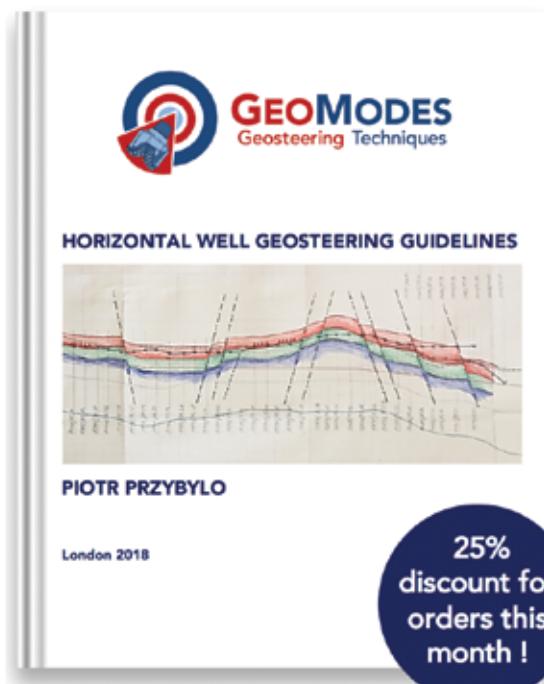
The type of rotary steerable system (RSS) affects the effectiveness of steering and defines how quickly a desired angle of inclination can be achieved. Commonly, there are two steering concepts in the RSS: point-the-bit and push-the-bit. In general, either a point-the-bit or a push-the-bit RSS allows achieving a maximum build rate of approximately 6 to 8 degrees per 100 ft for the 8-1/2-inch hole size BHA tool (Sugiura et al., 2014) and seemingly both are equally applicable for geosteering purposes.

Yet a vital characteristic of each of the system is their sensitivity to the mechanical properties of a formation. In the case of push-the-bit system, the requirement to push off the opposite side of the borehole to cause a change in the trajectory makes in-gauge holes a necessity for such action. Hole washouts and borehole rugosity can negatively impact the directional performance of these systems. Kicking off a sidetrack in an existing well can also be problematic for a push-the-bit system because the pads become unable to contact the borehole wall due to the hole enlargement that occurs at the kickoff point. Therefore, the push-the-bit system should never be chosen for drilling soft, easily washed out formations (Fig. 2).

Consequently, the choice of RSS system should be based on a type of formation to be drilled. Relatively hard formations will require different RSS type to soft ones. For

# THE SCIENCE OF GEOSTEERING AS NEVER PUBLISHED BEFORE

## Horizontal Well Geosteering Guidelines by Piotr Przybylo



To "steer up or to steer down" is the most crucial question for all geosteering specialist. In this first ever published comprehensive technical guide, this question is answered as the author takes the reader through the geosteering decision-making process in clear and simple terms.



**THE FIRST  
GEOSTEERING BOOK  
AVAILABLE NOW**

PURCHASE NOW ON:

blurb [BLURB.CO.UK](http://BLURB.CO.UK)  
amazon [AMAZON.COM](http://AMAZON.COM)  
GEOMODES.COM

КНБК будет стремиться к постоянному повышению наклона скважины и одновременно стараться производить резкие уменьшения наклонов. Для поднятия профилей скважин, в которых сразу после спуска в нефтеносный пласт траектория будет постепенно понижать величины абсолютной глубины (менее глубокие абсолютные глубины), восходящие к проектной глубине, следует применять узел для набора кривизны вверх (Рис. 3)



Рис. 3: Узел для набора кривизны вверх

Fig 3: Build assembly

Если стабилизаторы расположены на значительном расстоянии от долота, часть КНБК между самыми нижними стабилизаторами и долотом слегка изгибается под воздействием силы тяжести, в результате чего долото стремится повернуться вниз и уменьшить наклон скважины (Mantle, 2013/2014). Для опускания профилей скважин, в которых сразу после спуска в нефтеносный пласт траектория будет постепенно повышать величины абсолютной глубины (более глубокие абсолютные глубины), сходящие к проектной глубине, следует применять узел для набора кривизны вниз (Рис. 4)



Рис. 4: Узел для набора кривизны вниз

Fig 4: Drop assembly

Если стабилизаторы расположены относительно равномерно вдоль длины КНБК, долото не будет ни подниматься, ни опускаться (Рис. 5). Этот узел стремится удерживать наклон скважины и называется узлом для удержания (Mantle, 2013/2014). Соответственно, его следует использовать для относительно плоских профилей скважины.



Рис. 5: Узел для удержания

Fig 5: Hold assembly

На тенденцию к резкому изгибу КНБК также влияют и различные другие факторы. Например, больший диаметр стабилизаторов и/или бурильных труб увеличивает жесткость узла. Поэтому узел не будет так легко гнуться, как в случае установки с

optimized directional control, a point-the-bit system will have a major effect in soft formations, whereas the side force (push-the-bit system) will have a better result in hard formations (Griffiths, 2009). This characteristic should be evaluated thoroughly based on the type of formation that will be drilled as it will significantly impact the geosteering performance and may hinder achieving required trajectory shape.

### Stabilizers Strategy

The bottom hole assembly (BHA) together with stabilizers and drilling collars to be used for drilling are designed during the planning stage. They help to guide the bit in the borehole and play a major part in directional drilling as they help determine the well-bore path and drilling angle.

In a deviated or horizontal hole, gravitational and buckling forces bend any unsupported section of the BHA (Mantle, 2013/2014). Properly designed stabilization therefore, is paramount to prevent these phenomena. On the other hand, one can use this force to work for the desired outcome rather than against it.

There are certain default steering directions (tendencies) that can be built into the drill string. This is fine if done purposely; but if a certain tendency is built into the BHA coincidentally it will significantly hinder manoeuvrability when geosteering. A stabilized BHA can be designed to build, hold or drop angle depending on the location of stabilizers which act as contact points between the BHA and the formation (Mantle, 2013/2014).

If two stabilizers are widely spaced with one being relatively close to the bit, then the BHA bends between them resulting in the bit deflecting upwards. As a result, the BHA will have a tendency to continuously increase the inclination and simultaneously struggle to perform sharp drops of inclinations. The build assembly (Fig.3) should be used for climbing well profiles where right after landing in the reservoir the trajectory will gradually decrease the TVD values (shallower TVDs) ascending to the well TD.

If stabilizers are positioned a significant distance from the bit, the length of BHA between the bottommost stabilizers and the bit bends slightly under gravity, resulting in a tendency for the bit to point down and decrease the well inclination (Mantle, 2013/2014). The drop assembly (Fig. 4) should be used for drooping well profiles where right after landing in the reservoir the trajectory will gradually increase the TVD values (deeper TVDs) descending to the well TD.

If stabilizers are distributed relatively evenly along the length of the BHA, the bit will neither build or drop (Fig.5). This assembly tends to hold the well inclination and is called a hold assembly (Mantle, 2013/2014). Consequently, it should be used for relatively flat well profiles.

# Derrick® предлагает эксклюзивную технологию компрессионной фиксации ситовой панели



Быстрая и надежная фиксация ситовых панелей

## Вибросито Derrick® Hyperpool® с технологией компрессионной фиксации ситовой панели

Derrick является единственным производителем оборудования контроля твердой фазы, предлагающий своим заказчикам технологию компрессии ситовой панели. Исключительные преимущества, обеспечиваемые технологией компрессии доступны при использовании вибросита Hyperpool®:

- Плотное прилегание сетки к раме, обеспечивающее герметичность
- Повышенная производительность вибросита
- Сброс более сухого шлама с пониженным содержанием жидкой фазы
- Снижение общих затрат при бурении



Hyperpool

Переходите на новые технологии Derrick, узнайте больше о технологии компрессионной фиксации панели посетив наш сайт [www.Derrick.com](http://www.Derrick.com) или отправив запрос на [info@Derrick.com](mailto:info@Derrick.com) или (866) DERRICK.

меньшим диаметром стабилизаторов и/или более тонкими бурильными трубами. Более высокая гибкость меньших по размеру КНБК (например, для бурения 6-дюймовой скважины) по сравнению с КНБК большого размера (например, для бурения 8½-дюймовой скважины) позволяет им получить более резкий изгиб, но создают дополнительные проблемы для контроля направления скважины.

### Порядок измерения расстояния между скважинами

Неточности, которые накапливаются в связи с расстоянием по результатам статических измерений, могут приводить к неправильной интерпретации положения траектории скважины в подповерхностном пространстве. Величина такой ошибки или неопределенности зависит от того, насколько часто производится каротаж скважины (Griffiths, 2009). Методы расчета траектории ствола скважины включают некоторые допущения. Например, метод радиуса кривизны предполагает гладкость скважины между двумя точками замера, но фактическая траектория между точками может быть не такой. Поэтому, чем реже скважину измеряют, тем дальше точки измерения и допущения отстоят вдоль всей длинной траектории, что означает более значительную ошибку на протяжении всего ствола скважины. Следовательно, более частое измерение скважины приводит к размещению точек замера близко друг к другу и снижает неопределенность.

Пренебрежение этим явлением может привести к критическому недооценке направления геостриинга, особенно в горизонтально разрабатываемых целевых пластах, и соответственно приводит к отходу от цели в пласте (Рис. 6). Отрицательное влияние особо усиливается в трехмерных профилях скважины, в которых траектория ствола требует не только изменения наклона скважины, но и перемен в азимутальном направлении. Понимание и осознание всех областей неопределенности, а также порядок измерения расстояния между скважинами должны быть выработаны для каждого ствола скважины для того, чтобы уменьшить эти риски.

### Структурная неопределенность

Наряду с неопределенностью измерений, которая относится к положению ствола скважины в подповерхностном пространстве, имеется ещё и неопределенность, связанная с пространственным положением геологической модели в трехмерном подповерхностном окружении, т.е. структурная неопределенность.

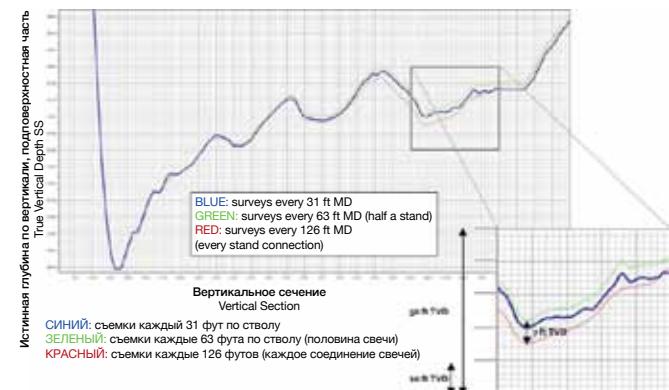
Структурная неопределенность редко встречает правильное отношение и противопоставление ей

Various other factors also influence the dogleg tendencies of BHA. For example, larger diameter stabilizers and/or drilling collars will constitute a stiffer assembly. Hence the assembly will not bend as easily as if mounted with smaller diameter stabilizers and/or thinner collars. A greater flexibility of smaller BHA size (e.g. for drilling a 6-inch hole) compared to the larger BHA size (e.g. for drilling an 8-1/2-inch hole) allows them to deliver greater doglegs delivery but makes maintaining directional control more challenging.

### Survey Spacing Strategy

The inaccuracies that accumulate due to the static survey spacing can create misleading interpretation of the well trajectory position in the subsurface space. The magnitude of the error or the uncertainty depends on how frequently the well is surveyed (Griffiths, 2009). The methods used for calculating the wellbore trajectory include certain assumptions. For instance, the radius of curvature method assumes a smooth wellbore path between the two survey stations; however, the actual trajectory between the two stations may not be such. Therefore, the less frequently the well is surveyed the farther the survey stations and assumptions are made over a longer course of the trajectory, which means a larger error over the entire well path. Consequently, surveying the well more frequently places the stations close to each other and reduces this uncertainty.

Oversight of this phenomenon can lead to critical misjudgement of the geosteering direction, especially



**Рис. 6:** Пример скважины, измерения которой проводились с разной частотой. Синяя траектория представляет ствол скважины с расстоянием между точками измерения 31 фут по стволу, зеленая — 63 фута по стволу, а красная — с расстоянием 126 футов по стволу. Расхождения между положениями траекторий составляют для данного примера до 7 футов абсолютной глубины, но в сумме может достигать десятков футов.

**Fig 6:** Example of a well surveyed at different frequencies. Blue trajectory represents the well path with survey spacing of every 31 ft MD, green trajectory with survey spacing of every 63 ft MD and red trajectory with survey spacing of every 126 ft MD. The differences between the trajectories' positions are up to 7 ft TVD for this particular example but overall can reach tens of feet of difference.

# ECKEL®

# 5 1/2 HSVS

БЕЗОТКАЗНЫЙ, НАДЕЖНЫЙ И ПРОВЕРЕННЫЙ

Особенности гидравлического ключа 5-1/2 HSVS Эккель:

- Крутящий момент 22000 футо-фунтов (29828 Нм)
- Гибкий выбор значений крутящего момента и скорости вращения при использовании гидравлического мотора с технологией Hydra-Shift в сочетании с механической двухскоростной передачей, четыре диапазона крутящего момента/скорости вращения.
- Быстрая смена скользящих головок
- Работает с бурильными трубами
- Hydra-Shift (гидравлическое переключение частоты вращения)
- Гидравлическое стопорное устройство Tri-Grip.
- Радиальный замок дверки



Гидравлические ключи Эккель защищают ваши трубные соединения от дорогостоящих повреждений. Проверено по всему миру.

Уже более 60 лет Эккель является мировым лидером в поставке высокопроизводительных гидравлических ключей. Эккель предлагает разнообразные модели гидравлических ключей для работы с бурильными, обсадными и насосно-компрессорными трубами, гидравлические стопорные устройства и силовые гидравлические станции. Предложение ключей для работы с размерами труб от  $2\frac{1}{16}$  до 36 дюймов (52,4 до 914,4 mm) и крутящим моментом до 135000 футо-фунтов (183035 Нм) для самых востребованных условий на суше и на море.

В чем ваша основная проблема с трубным соединением?  
Узнайте больше на [WWW.ECKEL.COM/RU](http://WWW.ECKEL.COM/RU)



Гидравлические станции дизельные и электрические



Explorer II - Компьютеризированная система контроля и регистрации крутящего момента и скорости вращения

Разнообразные типы вкладышей для каждого применения

**ECKEL®**  
HYDRAULIC POWER TONGS

**PREMIUM**  
SOLUTIONS  
*high performance power tongs*

eckel.com | sales@eckel.com

Эксклюзивный региональный представитель:  
Коралайна Инжиниринг:



Coralina Engineering:  
[coralina.ru](http://coralina.ru) | [oil-gas@coralina.ru](mailto:oil-gas@coralina.ru)

плана прохождения намеченной траектории. И это при том, что она оказывает большое и иногда доминирующее воздействие на надежность проектирования скважины, результатов геостиринга (размещения скважины) и, наконец, на производительность пласта. В конце концов, без оценки пространственной неопределенности на стадии планирования повышается риск ошибочных прогнозов и неправильных решений по геостирингу (Seiler et al., 2009).

Явление структурной неопределенности — это непосредственный результат сейсмической неопределенности и ее интерпретации. Возможно, очень правдоподобная сейсмическая интерпретация может представить несколько весьма различных геологических моделей, одна из которых сможет быть уверенно и точно быть определена в количественном выражении (Soleng et al., 2004).

Сейсмическая неопределенность — это функция многих неопределенностей, которые могут иметь широкий интервал значений:

- **Неопределенность, связанная со сбором и обработкой данных (переносом)**

Диапазон неопределенности, связанной с сейморазведочными работами и сейсмической миграцией, зависит от точности измерений и частоты сбора данных (разрешения данных). Сейсмические данные, как правило, засорены продуктами сбора или обработки и шумом, что может оказать сильное воздействие на последующую сейсмическую интерпретацию. Во время процесса переноса сейсмические события, зафиксированные на поверхности, геометрически перемещаются и в пространстве, и во времени в то место под поверхностью земли, где событие фактически произошло. Этот процесс должен преодолеть ограничения геофизических методов, налагаемые зонами со сложным геометрическим строением, например, разломами, соляными телами и складчатостью, которые впоследствии вводят некие неопределенности в систему. Сбор и обработка также подвержены влиянию геологической и сейсмической анизотропии, которая, если ей пренебречь, может привести к некачественной сейсмической картине, неточным привязкам к скважинам и неправильной интерпретации данных (Bond et al., 2007).

- **Неопределенность, связанная с интерпретацией данных**

Ошибок, введенных человеческой интерпретацией, не избежать. Неправильно интерпретированные

in thin horizontally developed reservoir targets, and subsequently result in exiting the reservoir target (Fig.6). The negative effect is enhanced especially for three-dimensional well profiles where the well path requires not only the inclination changes but also the azimuthal direction alterations. The understanding and awareness of all the uncertainty ranges, therefore survey spacing strategy, must be developed for every well path to adequately mitigate these risks.

### Structural Uncertainty

On top of the survey uncertainty, which is related to the position of the wellbore in the subsurface space, there is an uncertainty related to the spatial position of the geological model within the three-dimensional subsurface setting, a structural uncertainty.

Structural uncertainty is seldom properly addressed and confronted with the intended trajectory plan. Nevertheless, it has a large and sometimes dominating effect on the reliability of well planning, results of the geosteering (well placement) and ultimately of a reservoir's production. In the end, without a spatial uncertainty assessment at the planning stage, the risk of erroneous predictions and wrong geosteering decisions is increased (Seiler et al., 2009).

A structural uncertainty phenomenon is a direct result of the seismic uncertainty and its interpretation. Potentially, a very reasonable seismic interpretation can represent several significantly different geological models, any one of which by itself can be confidently and precisely determined in quantitative terms (Soleng et al., 2004).

The seismic uncertainty is a function of various uncertainties, which can have a range of values:

- **Uncertainty related to data acquisition and processing (migration)**

The range of uncertainty related to seismic acquisition and migration depends on the precision of the measurement and acquisition frequency (data resolution). Seismic data are commonly polluted by acquisition or processing artifacts and noise which may have a strong impact on subsequent seismic interpretation. During the migration process, seismic events recorded on the surface are geometrically re-located in either space or time to the location where the event actually occurred in the subsurface. This process needs to overcome the limitations of geophysical methods imposed by areas of complex geology such as faults, salt bodies and folding which subsequently introduce certain uncertainties into the system. The acquisition and processing are also affected by geological and seismic anisotropies which if ignored may lead to poor seismic imaging, inaccurate well-ties



**Caspian Oil & Gas**  
Azerbaijan  
Conference

# Caspian Oil & Gas

26-я Международная  
Конференция  
«Нефть и Газ Каспия»

30-31 мая 2019  
Баку, Азербайджан

Для дополнительной информации  
[www.oilgasconference.az](http://www.oilgasconference.az)

 CaspianOilGasConference  
#COGConference

сейсмические горизонты влияют на оценку толщины и глубины пластов. В свою очередь, высокое разрешение сейсмических данных повышает вероятность правильной идентификации сбросов и других сейсмических элементов. Неопределенность интерпретации данных нельзя разрешить простым контролем качества, поскольку часто невозможно произвести съемку некоторых горизонтов/плоскостей сброса с большой точностью. Тем самым вводится еще одна неопределенность положения горизонта.

- **Неопределенность, связанная с преобразованием временного разреза в глубинный**

Съемку сейсмических горизонтов обычно производят на сейсмически отражающих границах во временном интервале. Таким образом, самая большая неопределенность возникает в результате сейсмического преобразования временного разреза в глубинный и зависит от точности определения скоростей, используемого при таком преобразовании. Обычно разрабатывают модели для нескольких скоростей для того, чтобы определить вероятный диапазон глубин для данного горизонта (Bond et al., 2007).

- **Неопределенность, связанная с зависимостью скважины от сейсмической ситуации**

Несомненно, одним из самых важных аспектов работы с сейсмическими данными, является корреляция характеристик скважины с сейсмическими данными, например, зависимость скважины от сейсмической ситуации, которая связывает геологию и сейсмическую реакцию. Некоторые интерпретаторы связывают скважины с данными о сейсмической обстановке, предполагая, что в сейсмических данных содержится гораздо больше неопределенностей, а параметры скважины всегда или почти всегда правильны. Другие стремятся выявить ограничения параметров скважины и распределить неопределенность более равномерно между скважиной и сейсмическими данными (Seiler et al., 2009).

Главный вывод из вышесказанного заключается в том, что все интерпретируемые результаты следует поместить в установленный количественный реестр неопределенностей. Необходимо удостовериться, что смысл и пределы этого реестра отчетливо понимают и разделяют все те, кто вовлечен работы по геостриингу.

Наиболее распространенной мерой неопределенности является выделение планки

and incorrect interpretation of the data (Bond et al., 2007).

- **Uncertainty related to data interpretation**

Errors introduced by human interpretation cannot be omitted. Incorrectly interpreted seismic horizons affect the estimated thickness and depth of the reservoirs. In turn high resolution of the seismic data enhances the ability for proper faults and other seismic features identified. Data interpretation uncertainty cannot be resolved by a simple quality control check as it is often not possible for certain horizons/fault planes to be picked up with high accuracy, thus introducing yet another uncertainty on the position of the horizon.

- **Uncertainty related to time to depth conversion**

Seismic horizons are usually picked on seismic reflectors in time domain. Thus, the biggest uncertainty comes from the time to depth seismic conversion, depending on the accuracy of the velocities used in the conversion. It is common to generate multiple velocity models to understand the likely range of depths for a given horizon (Bond et al., 2007).

- **Uncertainty related to well-to-seismic ties**

Undoubtedly, one of the most important aspects of working with seismic data is the correlation of well data to seismic data, e.g. the well-to-seismic tie that links geology and seismic response. Some interpreters tie wells to seismic data assuming that the greater amount of uncertainty resides in the seismic data and that the well data are always or almost always correct. Others tend to recognize the limitations of well data and spread uncertainty more evenly between the well and seismic data (Seiler et al., 2009).

The crucial output of the above, is the idea that all the interpretive results should be placed within an established quantitative range of uncertainty. It must be ascertained that the meaning and limits of that range are clearly understood and communicated to all involved in geosteering parties.

The most common measure of uncertainty is specifying an error bar (uncertainty range) or plus-minus value, e.g. the predicted depth of the formation X is 8500 ft TVDSS  $\pm 2\%$  or  $\pm 30$  ft TVD) for horizons. Fault locations are also inherently uncertain and come with lateral uncertainties related to the position of the fault planes and the plane dips.

Apart from vertical uncertainty especially affecting prognosed formation tops, lateral uncertainty plays a significant role in planning for any horizontally distributed geological features



**Caspian Oil&Gas**  
Azerbaijan

# Caspian Oil&Gas

ufi  
Approved  
Event

26-я Международная  
Выставка  
Нефть и Газ Каспия

29 мая - 1 июня 2019

Баку Экспо Центр  
Баку, Азербайджан

Для дополнительной информации  
[www.cog.az](http://www.cog.az)

ВЕДУЩЕЕ СОБЫТИЕ  
НЕФТЕГАЗОВОЙ  
ИНДУСТРИИ  
КАСПИЙСКОГО  
РЕГИОНА

#CaspianOilandGas

[www.facebook.com/CaspianOilGas](https://www.facebook.com/CaspianOilGas)

Организатор



Тел. +994 12 404 10 00  
E-mail: [oilgas@iteca.az](mailto:oilgas@iteca.az)

погрешностей (диапазона неопределенностей) или величины плюс-минус, например, прогнозируемая глубина породы X составляет 8500 футов абсолютной глубины от уровня моря  $\pm 2\%$  или  $\pm 30$  футов абсолютной глубины для горизонтов. Расположения сбросов также изначально неопределенны и данные о них поступают с горизонтальными неопределенностями, связанными с положениями плоскостей сброса и их падением.

Кроме вертикальной неопределенности, особо влияющей на кровлю пласта, горизонтальная неопределенность играет существенную роль в планировании для любых горизонтально распределенных геологических образований, подобных синформам и антиформам (Soleng et al., 2004), и соответственно напрямую влияет на ход геостиринга.

Другим следствием пространственной неопределенности является воздействие на угол падения/положения планарных элементов, например, сбросов (Рис. 7 и 8). Падения значительной величины (около 90 градусов) дадут особо значительные искажения.

Оценка неопределенности не обязательно должна быть симметричной, потому что в сейсмическую неопределенность вносят свой вклад отдельные факторы, особенно те, что относятся к геологии и не обязательно распределены симметрично (Soleng et al., 2004).

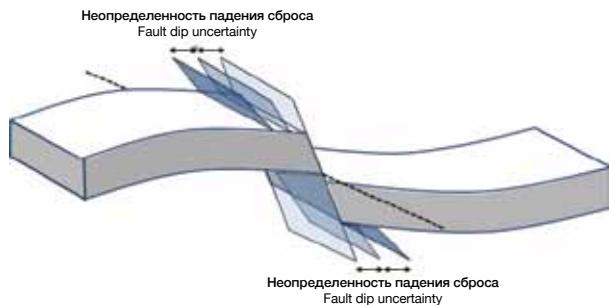
Рис. 8. Неопределенность в определении положения сброса определяется зоной неопределенности вокруг базового случая, где допускается, что сброс находится внутри. Кроме того, неопределенность в определении цели обуславливается целевой зоной вокруг базового случая, где допускается, что цель находится внутри.

Все факторы, которые управляют величиной пространственных (горизонтальных и вертикальных) неопределенностей, должны проверяться, а их величины должны быть должным образом оценены. Это окажет существенное воздействие на определении геологических целей и того пути, по которому траектория будет входить в эти цели в процессе геостиринга (Рис. 9).

Геостиринг скважины в соответствии с наблюдаемой геологией гарантирует оптимальное размещение скважины и добавляет существенную величину по сравнению с ее геометрическим бурением на основе съемок, с которыми связана неопределенность, которую вносит запланированная до бурения траектория.

like synforms and antiforms (Soleng et al., 2004) and consequently directly affect the geosteering process.

Another consequence of the spatial uncertainty is the effect on dip/position angle of the planar features e.g. faults (Figs. 7 and 8). Dips of high values (close to 90 degrees) will be especially distorted.



**Рис. 7:** Неопределенность в определении положения сброса определяется зоной неопределенности вокруг базового случая, где допускается, что сброс находится внутри. Сюда будет входить положение сброса, а также падение плоскости сброса

**Fig 7:** An uncertainty in fault location is specified by a fault uncertainty envelope around a base case, where the fault is allowed to reside within. This will include the position of the fault as well as the dip of the fault plane

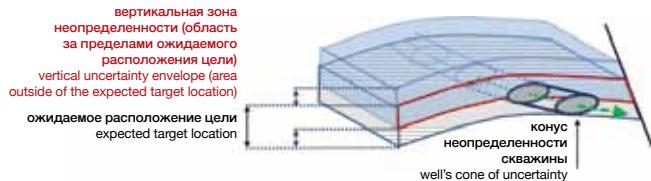


**Рис. 8:** Неопределенность в определении положения сброса определяется зоной неопределенности вокруг базового случая, где допускается, что сброс находится внутри. Кроме того, неопределенность в определении цели обуславливается целевой зоной вокруг базового случая, где допускается, что цель находится внутри.

**Fig 8:** An uncertainty in fault location is specified by a fault uncertainty envelope around a base case, where the fault is allowed to reside within. Additionally, an uncertainty in target location is specified by a target envelope around a base case where the target is allowed to reside within.

An estimation of uncertainty does not need to be symmetric because the individual factors contributing to seismic uncertainty, especially those that are geologically related, are not necessarily symmetrically distributed (Soleng et al., 2004).

All the factors that control the magnitude of the spatial (vertical and lateral) uncertainties should be examined and their values should be properly estimated. This will impact significantly on the definition of the geological targets and the way a trajectory will penetrate those targets during the geosteering process (Fig.9).



**Рис. 9:** Скважина может находиться и вне целевого пласта, если ее конус неопределенности лишь частично входит в расположение цели. Более того, скважина должна быть полностью введена не только в пласт цели, но и во все возможные зоны неопределенности этой цели. В примере выше скважина номинально расположена вместе с конусом неопределенности лишь частично в пределах рынка в зоне красного многоугольника. Эта зона — результат наложения ожидаемого расположения цели и ее вертикальной зоны неопределенности. В этом случае только размещение скважины в области красного многоугольника гарантирует, что она проникнет в целевой пласт. Красный многоугольник можно также назвать геологической целью.

**Fig 9:** A well might be located outside of the reservoir target if its cone of uncertainty is only partially incorporated in the target location. Furthermore, the well must be fully incorporated not only in the reservoir target but also in all the possible uncertainty envelopes of that target. In the example above a nominal well location with its cone of uncertainty is only partially located within the market in red polygon area. The red polygon area is the result of overlap of expected target location and its vertical uncertainty envelope. In this case, only placing the well within the red polygon area guarantees that the well will penetrate the reservoir target. Red polygon can be also called a geological target.

## Определение целей

На стадии планирования необходимо определить, согласовать и все вместе наложить друг на друга геологическую цель, цель бурения, а также размер и форму конуса неопределенности. Геологическая цель обычно оговаривается на основе ожидаемых размеров пласта в данной местности. Геологической цели нужно быть, как минимум, того же размера, что и круг допуска, но не меньше, чтобы дать возможность скважине проникнуть в геологическую цель со всеми неопределенностями (включая конус неопределенности в данной местности).

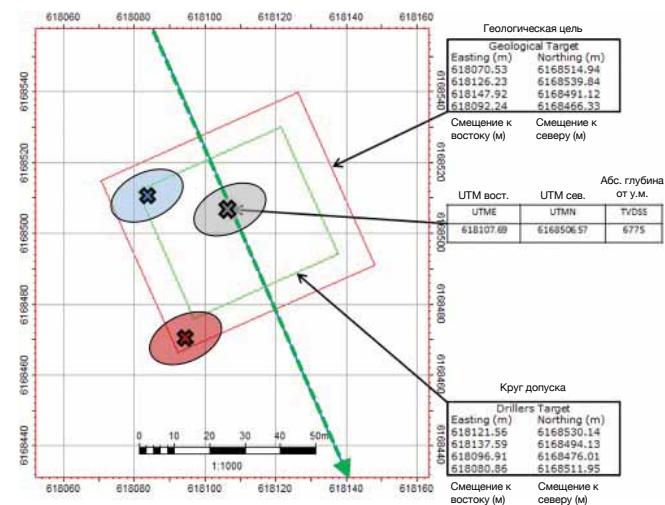
Для обеспечения того, что скважина будет фактически проникать в геологическую цель, круг допуска должен быть скорректирован (т.е. уменьшен) так, чтобы весь эллипс неопределенности помещался в пределах как геологической цели, так и круга допуска (даже если шахта проникает в цель на краю круга допуска и на краю эллипса неопределенности). Для того, чтобы наглядно понять этот принцип, см. Рис. 10, 11 и 12 ниже.

Таким образом, неопределенности целей и неопределенности расположения скважины необходимо совместить и синхронизировать, однажды наложив их друг на друга (Рис. 10, 11 и 12). Иначе будет возрастать риск того, что скважина окажется вне цели.

Geosteering the well according to the observed geology assures optimal well placement and adds significant value compared to drilling it geometrically based on surveys with their associated uncertainty following pre-drill planned trajectory.

## Targets Definition

During the planning stage, the geological target, the drilling target and the size and shape of the cone of uncertainty need to be defined, agreed upon and superimposed all together. A geological target is usually specified, based on the expected reservoir dimensions at a given location. The geological target needs to be at least the same size as the drillers' target, but not smaller, to allow the well to penetrate the geological target with all the uncertainties (including the cone of uncertainty at the given location).



**Рис. 10:** Пример правильно определенной и согласованной геологической цели, круга допуска и конуса неопределенности в данной местности. Серый крест (номинальное расположение скважины) с серым конусом неопределенности в данном расположении полностью помещается в круг допуска (зеленый прямоугольник). Соответственно круг допуска также помещается в пределах геологической цели (красный прямоугольник). В случае синего креста (номинальное расположение скважины) с синим конусом неопределенности есть возможность того, что скважина проникнет в геологическую цель, но не в круг допуска. В случае красного креста (номинальное расположение скважины) с красным конусом неопределенности есть возможность того, что скважина не проникнет ни в геологическую цель, ни в круг допуска.

**Fig 10:** An example of a properly defined and agreed geological target, drillers' target and the cone of uncertainty at the given location. The grey cross (nominal location of the well) with the grey cone of uncertainty at this particular location fits entirely into the drillers' target (green rectangle). Subsequently, the drillers' target also fits into the geological target (red rectangle). In the case of the blue cross (nominal location of the well) and the blue cone of uncertainty, there is a possibility that the well will penetrate the geological target, but not the drillers' target. In the case of the red cross (nominal location of the well) and the red cone of uncertainty, there is a possibility that the well will neither penetrate the geological target nor the drillers' target.

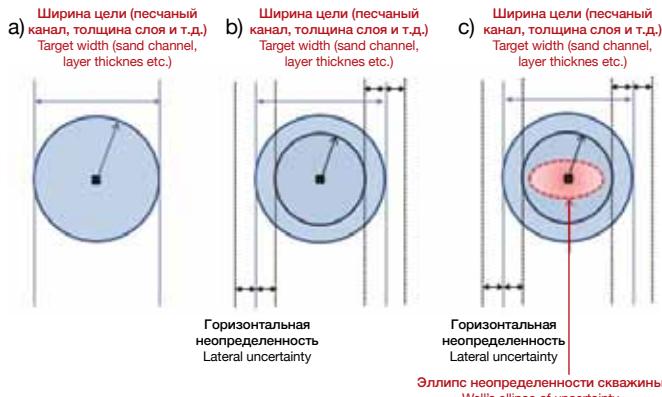


Рис. 11: а-с Планарные двухмерные цели

- Координаты геологической цели и радиус цели.
- Геологическая цель после приложения горизонтальной неопределенности (с меньшим радиусом цели). Бурильщикам требуется геологическая цель со всеми зонами неопределенности (горизонтальной и вертикальной в случае планарной геологической цели, например, круглой, прямоугольной или квадратной формы).
- Эллипс неопределенности скважины. Бурильщики будут пытаться вместить эллипс неопределенности внутрь определенной геологической цели со всеми геологическими и бурильными неопределенностями.

Fig 11: a-c Planar two-dimensional targets

- Geological target coordinates and the radius of the target.
- Geological target after applied lateral uncertainty (with shorter radius of the target). Drillers require a geological target with all the uncertainty envelopes (horizontal and vertical in case of a planar geological target e.g. circle, rectangle or square shape).
- Well's ellipse of uncertainty. Drillers will try to fit the ellipse of uncertainty within defined geological target with all the geological and drilling uncertainties.

## Ограничения интенсивности отклонения (ИО)

Интенсивность отклонения (ИО) — это мера величины изменения наклона и/или азимута скважины, обычно выражаемая в градусах двухмерного угла на 100 футов длины интервала профиля ствола. Примечательно, что это изменение измеряется в трехмерном пространстве, поэтому отклонения вправо-влево оказывают одинаково вредные побочные явления.

Два показателя определяют измерение ИО: угол восстания, который является мерой изменения отклонения вдоль вертикальной плоскости, и угол поворота, которая является мерой азимутальных изменений в горизонтальной плоскости. Следует отметить, что ИО — это не просто сумма этих двух показателей. В горизонтальных скважинах и скважинах со значительным наклоном величины этих углов намного меньше, чтобы получить одинаковую степень изменения азимутального изменения по сравнению с величинами поворота в почти вертикальных скважинах. Аналогичное явление будет наблюдаться в горизонтальных секциях, где величины углов поворота сильно зависят от наклона.

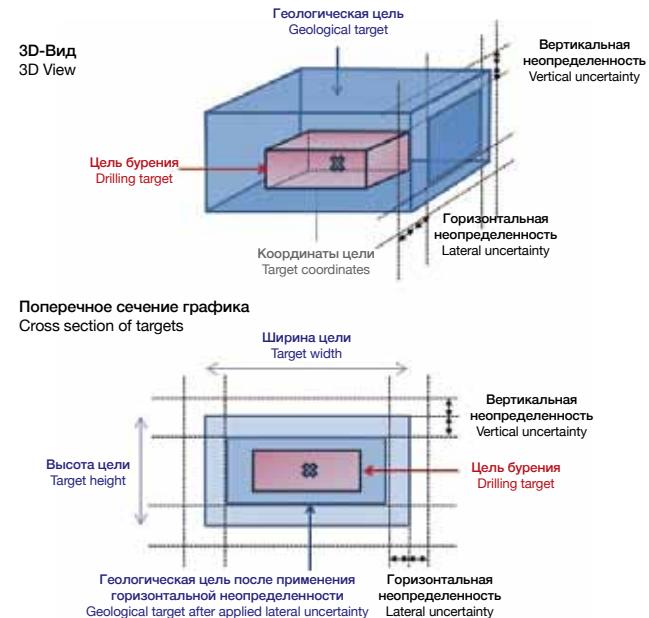


Рис. 12: Трехмерная геологическая цель и объект бурения. Геологическая цель должна учитывать горизонтальную и вертикальную неопределенность. Однако геологическая цель не отвечает за технологические неопределенности бурения, поскольку круг допуска всегда должен быть меньше размера цели, обусловленного геологическими неопределенностями.

Fig 12: Three-dimensional geological and drilling targets. A geological target should take lateral and vertical uncertainties into account. The geological target, however, does not account for technological drilling uncertainties, hence the drillers target should always be smaller than target size specified by geological uncertainties.

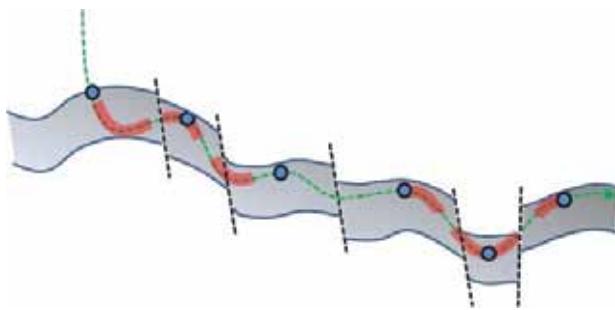
To ensure that the well will actually penetrate the geological target, the drillers' target must be adjusted (e.g. reduced) so the entire ellipse of uncertainty fits within both the geological and the drillers' targets (even if a well penetrates the target on the edge of the drillers' target and on the edge of the ellipse of uncertainty). To visualize this concept, see figure 10, 11 and 12 below.

Thus, the uncertainty of the targets and the uncertainty of the position of the well needs to be aligned and synced once superimposed on each other (Figs 10, 11 and 12). Otherwise, there is an increased risk of placing the well outside the target.

## Dog Leg severity (DLS) Limitations

Dogleg severity (DLS) is a measure of the amount of change in the inclination and/or azimuth of a borehole, usually expressed in two-dimensional degrees per 100 feet of course length. Notably, this change is measured in three-dimensional space therefore left – right doglegs cause equally harmful side effects.

There are two factors that constitute the DLS measurement, a build rate that measures inclination changes along the vertical plane and a turn rate that



**Рис. 13:** Запланированная траектория на основе заданных целей (шесть синих кружков). Красные участки показывают части траектории, вдоль которых ИО превышает 3,0 градуса (3,0 градуса или более). При диапазоне ограничений ИО перед бурением, составляющем 3,0 градуса, геостириинг будет практически невозможен вдоль этих участков из-за достижения ограничений ИО уже на этапе планирования. Любые корректировки траектории вдоль красных участков при бурении приведут либо к ещё большим величинам ИО, либо к непопаданию в следующую цель.

**Fig 13:** Planned trajectory based on given targets (six blue circles). Reddish sections indicate parts of the trajectory along which DLS exceeds 3.0 degrees (3.0 degrees or more). With the pre-drill DLS limitation range of 3.0 degrees, geosteering will be virtually impossible along these sections due to reaching the DLS limits already at the planning stage. Any adjustment of the trajectory along the reddish sections while drilling will result either in even higher DLS values or missing the next target.

В то время, как некоторые резкие изгибы созданы умышленно специалистами по бурению, нежданые повороты имеют пагубные последствия. Большие повороты усиливают общее трение, приводящее к усталостному и абразивному износу бурильной колонны, обсадной колонны и колонны заканчивания, а также к повышению вероятности прихвата в скважине или к невозможности достижения запланированной общей глубины (ОД). В связи с этим необходимо обязательно соблюдать диапазоны ИО, согласованные и введенные перед бурением. Обратите внимание, что необходимо «проводить геостириинг скважины на бумаге» (производить ГСНБ) и проверять, не предотвращают ли ограничения ИО проникновение во все запланированные цели (Рис. 13).

По этой причине ИО будет часто ограничивать выбор траектории стволов скважин. Следовательно, ограничения ИО существенно воздействуют на процесс выхода скважины на горизонтальный участок в цели, поднятия через колодцы, пробивания через кремнистые породы и ограничивает возможное пространство для геостириинга в случае, когда требуется резкое изменение наклона. В экстремальных ситуациях, когда избыточное отклонение уменьшает шансы на успех скважины, можно предпринять меры по исправлению ситуации, например, расширение или разбуривание ствола скважины через резкое отклонение или даже бурение вторых стволов.

measures azimuthal changes in a horizontal plane. It should be noted that DLS is not a simple sum of these two factors. In horizontal and highly deviated wells turn rate values are much smaller in order to obtain similar degree of azimuth change compared to turn values in close to vertical wells. A similar effect will be observed in horizontal sections where the turn rate values are highly inclination dependent.

While some of the doglegs are created intentionally by directional drillers, unanticipated ones have destructive tendencies. High doglegs intensify the overall friction creating fatigue wear and abrasion of drill pipe, casing and completion string and increase the likelihood of getting stuck or not reaching the planned total depth (TD). Consequently, the DLS ranges agreed and imposed prior to drilling operations must be obeyed. Note that it is imperative to “geosteer well on paper” (to conduct GWOP exercise) and verify whether the DLS limitations prevent penetration of all the planned targets (Fig. 13).

For this reason, the DLS will often limit the choice of well paths. Consequently, the DLS limitations significantly impact the process of well landing in a target, building up through the sumps, punching through chert horizons and restrict the possible room for geosteering if a sharp change of inclination is required. In extreme situations, if an excessive dogleg impairs the success of a well, remedial action can be taken, such as reaming or underreaming through the dogleg location, or even sidetracking.

It must be remembered that the measurement of DLS values obtained by stationary surveys (usually every 100 ft) do not represent a real degree of borehole inclination or azimuthal change. This can only be acquired by instantaneous (continuous) azimuthal and inclination measurement. Therefore, the stationary surveys might not capture some of high doglegs created while drilling and provide only averaged values of the given interval. All possible micro-doglegs that occur in between the stationary surveys are masked.

### Planning a Trajectory

Most reservoir sections require simple designs where a well profile of a two-dimensional horizontal section maintains the constant azimuth with only changes of inclination (steering up and down). In other cases, azimuthal changes are planned prior drilling (azimuthal geometrical drilling, semi-three-dimensional geosteering) and are not part of the geosteering strategy. In some extreme cases complex geological settings require full three-dimensional geosteering (steering up, down, left and right). As it is impossible to predict every steering decision at the planning stage, these three-dimensional deviations must be reflected accordingly in the planned trajectory leaving leeway for geosteering decisions (Liu et al., 2004).

Необходимо помнить, что измерение величин ИО, полученные по результатам стационарных съемок (обычно каждые 100 футов), не представляют реальную степень наклонения ствола скважины или азимутального изменения. Ее можно получить только путем мгновенных (непрерывных) измерений азимута и наклонения. Поэтому стационарные съемки могут не уловить некоторые резкие отклонения, полученные в ходе бурения, и дают только усредненные величины данного интервала. Все возможные микроотклонения, которые возникают в промежутке между стационарными съемками, маскируются.

### Планирование траектории

Большинство частей пласта требуют простых конструкций, при которой профиль скважины с двухмерным горизонтальным разрезом поддерживает постоянный азимут, меняя только наклонение (сопровождение вверх и вниз). В других случаях азимутальные изменения планируются до бурения (азимутальное геометрическое бурение, наполовину трехмерный геостирилинг) и не являются частью стратегии геостирилинга. В некоторых крайних случаях сложные геологические условия требуют полного трехмерного геостирилинга (сопровождение вверх, вниз, влево и вправо). Поскольку невозможно на этапе планирования предсказать каждое решение при сопровождении, эти трехмерные отклонения должны быть соответствующим образом отражены в планируемой траектории, оставляя допуск на геостирилинговые решения (Liu et al., 2004).

Вне зависимости от сложности планируемой траектории все возможные решения по сопровождению и изменениям траектории могут повлиять на ее форму. Так как направление бурения нельзя контролировать на этапе планирования, геостирилинг должен действовать в качестве непредвиденного фактора для неопределенностей всех возможных траекторий, по которым может быть пробурена скважина. Поэтому во время проведения ГСНБ перед бурением требуется испытать все возможные решения про сопровождению, которые могли бы негативно сказаться на достижении нужной траектории ствола скважины.

Траектория в отрезке пласта основывается, как правило, на предусмотренных геологических целях с координатами x, y, z. Поскольку фактическая подповерхностная структура (расположение целевого пласта в трехмерном пространстве) и петрофизические условия этих целей (пластовые жидкости, пористость и проницаемость) часто отличаются от моделирования перед бурением, в траектории должна быть предусмотрена достаточная гибкость, чтобы создать возможность для изменения

Irrespective of the complexity of the planned trajectory, all possible steering decisions and trajectory changes may affect the shape of the trajectory. Since the direction of drilling cannot be verified at the planning stage, the geosteering must act as a contingency for uncertainties of all possible trajectories in which the well might be drilled. Therefore, testing all the possible steering decisions that might jeopardize achieving the desired well path, is required prior to drilling during the GWOP exercise.

A trajectory in the reservoir section is based mainly on provided geological targets with x, y, z coordinates. Since the actual subsurface structure (targeted reservoir location in three-dimensional space) and petrophysical properties of these targets (reservoir fluids, porosity, and permeability) are often different from those indicated by the predrill model, sufficient flexibility must be built into a trajectory to allow for the possibility that the targets could require modification during drilling. This is where active geosteering takes place to adjust the plan to the actual setting.

The worst-case scenario includes a design of a trajectory that is not feasible for geosteering due to directional drilling limitations (e.g. DLS ranges imposed prior to drilling operations and BHA steering limitations). This happens when planned DLS of a trajectory between the targets is on its borderline of achievability (e.g. trajectory with too high DLS between too many targets). In such situations, there is little room to adjust the trajectory and to hit all the targets if their position requires alteration. It is self-evident to adjust trajectory while geosteering, but a significant unforeseen discrepancy from the planned one (azimuthal and inclination, DLS, length, total depth) may put achieving all the objectives and hitting all the targets at risk (Fig. 13).

### Three-Dimensional Geosteering

In some directional drilling operations, a target in the reservoir cannot be reached by drilling along a planar two-dimensional well path because of underground obstructions, such as faults or existing well bores. In such extreme conditions, a three-dimensional well trajectory is usually designed. Special care should be taken during due diligence (and GWOP) since changes of azimuth will restrict possibilities of inclination build/drop for any steering BHA (Fig. 14). A balance between these parameters should always be maintained. Depending on a geological environment for which the trajectory is designed, certain confinements are always built into the design (e.g. 3.0 degrees per 100 ft DLS restriction, cumulative azimuthal change along the wellbore not exceeding 90 degrees etc.).

From the geosteering perspective, two-dimensional or close to two-dimensional trajectories with minimal

целей, которое может потребоваться при бурении. Именно здесь применяется активный геостириинг, чтобы скорректировать план для фактических условий.

Сценарий наихудшего случая включает траекторию, которая непригодна для геостиринга из-за ограничений наклонного бурения (например, диапазоны ИО, заданные перед бурением, и ограничения сопровождения КНБК). Это происходит тогда, когда запланированная ИО траектории между целями находится на грани достижения (например, траектория со слишком высокой ИО между слишком большим числом целей). В таких ситуациях остается мало возможностей корректировать траекторию и попадать во все цели, если их положение требует изменения. Бессспорно, при геостиринге необходимо корректировать траекторию, но существенное непредвиденное расхождение с запланированным значением (азимутальным и наклонения, ИО, длины, общей глубины) может подвергнуть риску решение всех задач и попадание во все цели (Рис. 13).

### Трехмерный геостириинг

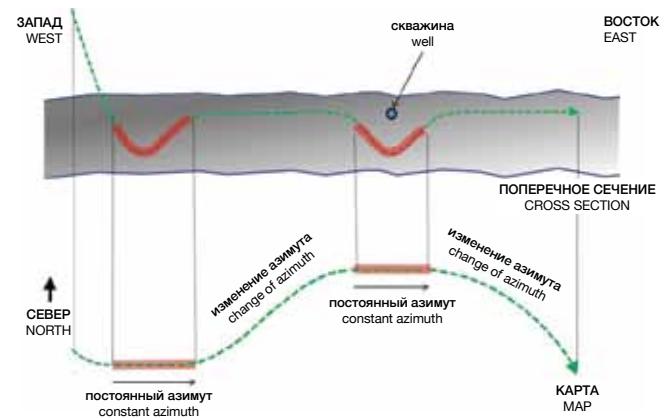
При некоторых операциях наклонного бурения цель в пласте не может быть достигнута путем бурения вдоль планарной двумерной траектории ствола скважины из-за подземных препятствий, например, сбросов или имеющихся скважин. В таких крайних обстоятельствах обычно проектируют трехмерную траекторию скважины. Во время комплексного анализа (и ГСНБ) необходимо быть крайне осторожным, так как изменения азимута ограничивают возможности наклона вверх/вниз при любом сопровождении КНБК (Fig. 14). Необходимо всегда поддерживать баланс между этими параметрами. В зависимости от геологической обстановки, для которой проектируется траектория, некоторые меры предосторожности всегда встраиваются в проект (например, ограничение ИО 3,0 градусов на 100 футов, общее изменение азимута вдоль ствола скважины не превышает 90 градусов и т.д.).

С точки зрения геостиринга двухмерные или близкие к двухмерным траектории с минимальными азимутальными изменениями легче всего бурятся. Самое большое преимущество геостиринга при таком двухмерном проектировании будет получено за счет сведения к минимуму или отсутствия искажений представления траекторий в разрезе. Это оказывает существенное влияние на расчеты наклонений при понижении и на более точные величины горизонтальных и вертикальных расстояний.

### Выводы

Все вышеупомянутые аспекты взаимосвязаны и влияют друг на друга на различных этапах процесса

azimuthal changes, are less challenging to drill. The biggest geosteering benefit from such two-dimensional design will be obtained through minimal or no distortion to the projected trajectories represented on cross-sections. This will impact significantly on dip inclination calculations and horizontal and vertical distances resulting in more accurate numbers.



**Рис. 14:** Образец должным образом построенной траектории, которая уравновешивает угол восстания и угол поворота (изменения наклонения и азимута). Красные отрезки траектории — это ее части, вдоль которых достигаются пределы ограничений наклонного бурения (например, 3,0 градуса ИО) из-за требующегося резких изменений наклона. Для достижения таких резких изгибов все возможности инструментов сопровождения должны быть направлены на изменения наклонений. Свыше этого расстояния никакие азимутальные изменения не будут возможны.

**Fig 14:** An example of a properly designed trajectory that balanced the build and turn rate (inclination and azimuthal changes). Reddish sections of the trajectory are parts of the trajectory along which directional drilling limitations are reached (e.g. 3.0 degrees DLS) due to sharp inclination changes required. To achieve such doglegs all steering tool capabilities should be directed towards changes of inclination. Over that distance no azimuthal changes will be possible.

### Conclusions

All of the above-mentioned aspects are interconnected and influence one another at different stages of the geosteering process. For instance, a correctly chosen RSS system will allow drilling a required well path and the tool responsiveness to the geosteerers' command will not be jeopardized by the type of drilled formation. The BHA and its ability to deliver specific dogleg range will directly affect the geosteering performance while drilling, producing desirable on-target trajectories. The actual well trajectory and its deviation from the plan will also be directly affected by well-defined uncertainty envelope ranges for the geological target. Even if the range of uncertainties cannot be minimized, a knowledge of such range can provide mitigating options that prepare for this eventuality. Prior drilling awareness of all the sections where azimuthal changes (turn rate values) will reach the maximum allowed values for DLS, prevent planning an unrealistic BHA performance and reduce the possibility of missing a target. Finally, more robust planning, due

геостиринга. Например, правильно выбранная система РУС позволит бурить требуемый ствол скважины, и чувствительность инструмента к командам ведущего геостиринга, не окажется подверженной негативной зависимости от типа породы, которую нужно бурить. КНБК и ее способность получать конкретный диапазон угла отклонения будет напрямую влиять на качество геостиринга при бурении, получая нужные и точные траектории. Фактическая траектория скважины и ее отклонения от плана будет также подвергаться непосредственному влиянию хорошо просчитанных диапазонов зон неопределенности для геологической цели. Даже если диапазон неопределенностей не может быть сведен к минимуму, осведомленность о нем может обеспечить возможности его уменьшения, которые пригодны для данного случая. До бурения знание обо всех отрезках, где азимутальный изменения (величины угла поворота) достигнут максимально допустимых величин для ИО, предотвратят планирование нереалистичных параметров КНБК и снизят вероятность промахнуться мимо цели. И наконец, более надежное планирование, комплексный анализ и проведение ГСНБ сведет к минимуму необходимость неожиданного резкого наклонения или азимутальных изменений для гарантии проникновения во все запланированные цели.

Поэтому, если рассмотреть все вышеприведенные аспекты на этапе планирования, они поспособствуют процессу принятия решений при геостиринге во время бурения и позволяют получать ровные, предсказуемые и оптимально расположенные стволы скважин.

Такова конечная цель любого процесса геостиринга.

## Литература

- Bond, C.E., Gibbs, A.D., Shipton, Z.K., Jones, S., 2007, "What do you think this is? Conceptual uncertainty in geoscience interpretation", GSA Today: v. 17, no. 11, 2007
- Griffiths, R. 2009, Well Placement Fundamentals, Schlumberger, ISBN 978-097885304-4
- Liu, X., Liu., R., Sun, M., 2004, "New Techniques Improve Well Planning and Survey Calculation for Rotary-Steerable Drilling", Presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition held in Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 September 2004 – IADC/SPE 87976
- Mantle, K., 2013/2014, "The Art of Controlling Wellbore Trajectory" Oilfield Review Winter 2013/2014: 25, no.4.
- Seiler, A., Rivenæs, J.C., Aanonsen S.I., Evensen, G., 2009, "Structural Uncertainty Modelling and Updating by Production Data Integration" Copyright 2009, Society of Petroleum Engineers (prepared for presentation at the 2009 SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference held in Abu Dhabi, UAE, 19-21 October 2009) - SPE 125352
- Soleng, H. H., Rivenaes, J.C., Gjerde, J., Hollund, K., Holden, L., 2004, "Structural uncertainty modelling and the representation of faults as staircases", 9th European Conference of the Mathematics of Oil Recovery — Cannes, France, 30 August – 2 September 2004
- Sugiura, J., Hornblower, P., Hawkins, R., Lowdon, R., Olokpo, A., Figueiredo, C., 2014, "Continuous inclination, azimuth measurement optimizes RSS control", May/June issue of Drilling Contractor, 2014

diligence and conducting a GWOP exercise will minimize the need for unanticipated sharp inclination or azimuthal changes assuring penetration of all the planned targets.

Therefore, once all the aspects above are considered during the planning stage, they will support the steering decision-making process while drilling and allow for delivering smooth, predictable, optimally placed wellbores. This is the ultimate objective of any geosteering process.

## References

- Bond, C.E., Gibbs, A.D., Shipton, Z.K., Jones, S., 2007, "What do you think this is? Conceptual uncertainty in geoscience interpretation", GSA Today: v. 17, no. 11, 2007
- Griffiths, R. 2009, Well Placement Fundamentals, Schlumberger, ISBN 978-097885304-4
- Liu, X., Liu., R., Sun, M., 2004, "New Techniques Improve Well Planning and Survey Calculation for Rotary-Steerable Drilling", Presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition held in Kuala Lumpur, Malaysia, 13-15 September 2004 – IADC/SPE 87976
- Mantle, K., 2013/2014, "The Art of Controlling Wellbore Trajectory" Oilfield Review Winter 2013/2014: 25, no.4.
- Seiler, A., Rivenæs, J.C., Aanonsen S.I., Evensen, G., 2009, "Structural Uncertainty Modelling and Updating by Production Data Integration" Copyright 2009, Society of Petroleum Engineers (prepared for presentation at the 2009 SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference held in Abu Dhabi, UAE, 19-21 October 2009) - SPE 125352
- Soleng, H. H., Rivenaes, J.C., Gjerde, J., Hollund, K., Holden, L., 2004, "Structural uncertainty modelling and the representation of faults as staircases", 9th European Conference of the Mathematics of Oil Recovery — Cannes, France, 30 August – 2 September 2004
- Sugiura, J., Hornblower, P., Hawkins, R., Lowdon, R., Olokpo, A., Figueiredo, C., 2014, "Continuous inclination, azimuth measurement optimizes RSS control", May/June issue of Drilling Contractor, 2014

October 2009) - SPE 125352

- Soleng, H. H., Rivenaes, J.C., Gjerde, J., Hollund, K., Holden, L., 2004, "Structural uncertainty modelling and the representation of faults as staircases", 9th European Conference of the Mathematics of Oil Recovery — Cannes, France, 30 August – 2 September 2004
- Sugiura, J., Hornblower, P., Hawkins, R., Lowdon, R., Olokpo, A., Figueiredo, C., 2014, "Continuous inclination, azimuth measurement optimizes RSS control", May/June issue of Drilling Contractor, 2014