

Коррекция азимута скважин в наклонно-направленном бурении

Б. Н. Бухтояров^{1✉}, О. Р. Старикова¹, А. А. Виноградова²

¹ООО «Газпром нефть шельф», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ФГБУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ z9851275712@gmail.com

Аннотация: Продуктивность нефтегазовых скважин обеспечивается достижением геологических целей бурения и оптимальным размещением продуктивной части ствола в коллекторе. Соответственно, повышение точности проводки скважин и определение их фактических траекторий является одной из фундаментальных задач при бурении на нефть и газ. Магнитные элементы бурильной колонны могут вносить существенные искажения в показания магнитометра оси Z телесистемы MWD и являются одной из основных причин азимутальных ошибок. В статье сделан акцент на способах компенсации влияния магнитных помех бурильной колонны, рассмотрены основные методы устранения внешнего магнитного влияния на замеры телесистемы: аппаратные меры, одностанционная коррекция, многостанционный анализ и их ограничения. Показано, что в ряде случаев применение описанных методов позволяет существенно скорректировать траекторию и приблизить магнитную съемку к точности гироскопических исследований. Приведены данные о результатах MSA-коррекции траекторий скважин с оценкой отклонения «сырых» и скорректированных траекторий относительно гироскопических замеров. Статья является продолжением публикаций в журнале «Маркшейдерия и недропользование» (2025. № 3 и 4), посвященных общему описанию маркшейдерского контроля положения скважин и использованию геомагнитных данных в нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: бурильная колонна, осевая интерференция, кросс-осевая интерференция (DSI), немагнитные утяжеленные бурильные трубы (НУБТ), метод короткого НУБТ, многостанционный анализ (MSA)

Для цитирования: Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Виноградова А.А. Коррекция азимута скважин в наклонно-направленном бурении. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(5):55-67. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-5-55-67>.

Correction of well azimuth in directional drilling

B. N. Bukhtoyarov^{1✉}, O. R. Starikova¹,
A. A. Vinogradova²

¹Gazprom Neft Shelf LLC, St. Petersburg, Russian Federation

²St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z9851275712@gmail.com

Abstract: The productivity of oil and gas wells is ensured by achieving geological drilling objectives and the optimal placement of the productive wellbore section within the reservoir. Accordingly, improving the accuracy of well placement and determining their actual trajectories is a fundamental task in oil and gas drilling. Magnetic elements of the drill string can introduce significant distortions into the readings of the Z-axis magnetometer of the MWD (Measurement While Drilling) telemetry system and are one of the primary causes of azimuth errors. The article focuses on compensating for the magnetic interference from the drill string. It reviews the main methods for eliminating external magnetic influence on telemetry system measurements—hardware measures, single-station correction, multi-station analysis (MSA)—and their limitations. It is shown that in a number of cases, the application of these correction methods allows for significant trajectory adjustment and brings the accuracy of the magnetic survey closer to that of gyroscopic surveys. Data on the results of MSA correction of well trajectories are provided, with an assessment of the ‘raw’ and corrected trajectories relative to gyroscopic surveys. This article is a continuation of publications in issues No. 3 and No. 4, 2025, of the journal “Mine Surveying and Subsurface Use”, dedicated to the general description of mine surveying well position control and the use of geomagnetic data in the oil and gas industry.

Keywords: axial interference of the drill string, cross-axial drill string interference (DSI), non-magnetic drill collars (NDC), Short Collar Correction (SSC), short NDC method, multi-station analysis (MSA)

For citation: Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R., Vinogradova A.A. Correction of well azimuth in directional drilling. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(5):00-00. <https://doi.org/>

Введение

Большая пространственная неопределенность скважин является серьезной проблемой при разработке нефтегазовых месторождений. К ее основным негативным последствиям можно отнести недостижение геологических целей бурения и невозможность бурения скважин нужной длины из-за рисков столкновения с ранее пробуренными скважинами.

Специалисты отрасли понимают, что существует прямая связь между точностью пространственного положения скважин и их продуктивностью. Низкая точность траекторий ведет к потерям нефти и снижению экономической эффективности проектов. Поскольку задача обеспечения соответствия положения горных выработок проекту возложена на маркшейдерские службы, поиск путей повышения точности определения пространственно-геометрических параметров скважин должен стать одним из ключевых приоритетов их деятельности.

Основной вклад в пространственную неопределенность траекторий при бурении с помощью телесистем (MWD) вносят систематические ошибки измерений. Поскольку эти погрешности суммируются от замера к замеру, максимальная неопределенность формируется на забое скважины. При этом доминирующей является латеральная (боковая) составляющая, которая напрямую связана с систематическими ошибками определения магнитного азимута.

Главными источниками этих ошибок являются:

1. Неопределенность магнитного поля Земли.
2. Магнитное влияние бурильной колонны на показания магнитометров забойной телесистемы.

Статья является продолжением публикаций в журнале «Маркшейдерия и недропользование», № 3 [1] и 4 [2] за 2025 год, посвященных общему описанию маркшейдерского контроля положения скважин и использованию геомагнитных данных в нефтегазовой отрасли. Меры по снижению влияния первого фактора подробно рассмотрены авторами в публикации [2].

Настоящее исследование сфокусировано на втором, не менее значимом источнике ошибок. Магнетизм бурильной колонны может вносить критические погрешности в замеры телесистемы, известны случаи искажения магнитного азимута более чем на 15° . Несмотря на то, что это влияние достаточно хорошо изучено, и в отрасли применяются как аппаратные методы его снижения, так и математические алгоритмы коррекции замеров, проблема не теряет актуальности.

Цель исследования: анализ применяемых в отрасли методов снижения магнитного влияния бурильной колонны на измерения азимута для повышения точности траекторий.

Материал и методы исследования

Для проведения исследования в соответствии с заявленной целью выполнен анализ источников, в том числе документов «Сообщества инженеров-нефтяников» (SPE), описывающих методы расчета азимута скважины при наклонно-направленном бурении с помощью телесистем MWD, источники и виды магнитной интерференции, ее влияние на скважинные замеры. Рассмотрены применяемые аппаратные

и математические способы снижения влияния магнитных помех на измерения MWD. Проанализированы существующие алгоритмы коррекции влияния бурильной колонны и особенности их применения. С целью исследования в среде MS Excel реализованы алгоритмы одностанционной и многостанционной коррекции, с помощью которых выполнены расчеты траекторий по 15 наклонно-направленным скважинам. Проведен анализ результатов коррекции со сравнением траекторий, построенных до и после коррекции, с траекториями, выполненными на основе гироскопических измерений. Сделаны выводы и предложения по дальнейшему применению методик коррекции скважинных замеров в практике маркшейдерского обеспечения буровых работ.

Метод магнитной съемки

Для понимания источников азимутальных ошибок необходимо рассмотреть сам принцип магнитной съемки во время бурения – основного способа контроля траектории скважин.

Направление ствола скважины при съемке рассчитывают относительно опорных векторов: гравитационного поля Земли G_i и магнитного поля Земли B_i [3]. При измерениях определяют глубину скважины по стволу (MD), зенитный угол I и магнитный азимут A^1 .

Зенитный угол представляет собой угол между продольной осью скважины и вектором гравитационного поля G_i , направленным к центру масс Земли, вектор имеет положительное значение в направлении «вниз».

Магнитный азимут представляет собой угол между проекцией на горизонтальную плоскость продольной оси бурильной колонны и горизонтальной компонентой вектора магнитного поля Земли. В северном полушарии полный вектор магнитного поля B_i имеет наклон под углом D (угол магнитного склонения) ниже горизонта и положителен в направлении «на север».

Для определения зенитного угла и магнитного азимута в процессе бурения используют забойные телесистемы, которые размещаются внутри немагнитной секции КНБК как можно ближе к долоту. Телесистемы оснащены шестью датчиками: тремя магнитометрами и тремя акселерометрами. Передачу результатов замеров на устье скважины обеспечивает канал связи. Акселерометры служат для определения направления скважины относительно отвесной линии (направления силы тяжести), магнитометры – для определения направления скважины относительно магнитного севера.

Магнитометры ориентированы взаимно ортогонально по осям X , Y и Z , датчики оси Z соосны с направлением скважины (рис. 1а). Также ориентированы оси акселерометров. TF (tool face) – угол поворота телесистемы вокруг оси Z дает представление о направлениях осей X и Y в момент взятия замера. Когда ось Y совпадает с проекцией вертикального направления ствола скважины «вверх» в плоскости перпендикулярной оси инструмента, угол TF (tool face) равен 0 (рис. 1б).

¹ Здесь и далее по тексту под азимутом (A) понимается магнитный азимут.

Следует учитывать, что на сегодняшний день в отрасли отсутствуют жесткие стандарты наименования осей, выше приведенные сведения представляют собой наиболее распространенный вариант, однако в каждом конкретном случае необходимо уточнить у поставщика услуги наклонно-направленного бурения ориентацию осей в применяемой телесистеме.

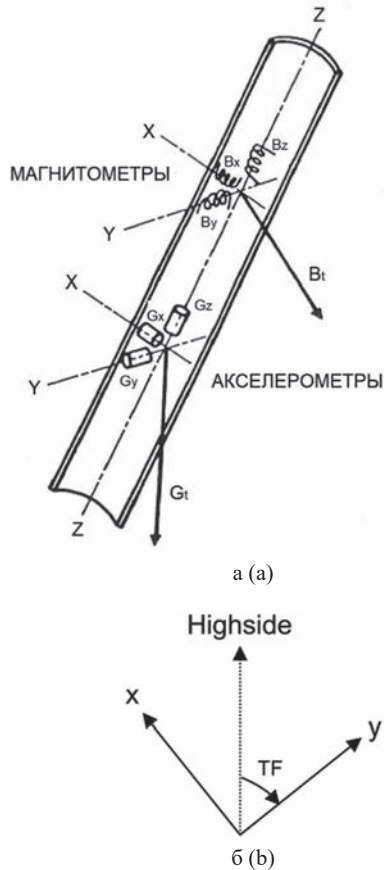


Рис. 1. Ориентация осей телесистемы MWD (а) и угол поворота инструмента (tool face) относительно «высокой стороны» (highside) (б) / Fig. 1. Orientation of the axes of the MWD telesystem (a) and the angle of rotation of the tool face relative to the "high side" (b)

В результате замеров MWD на станциях съемки по стволу скважины получают необходимые для расчета угловых параметров данные:

MD – длина по стволу скважины;

B_x, B_y, B_z – замеры магнитометров;

G_x, G_y, G_z – замеры акселерометров.

Используя замеры по всем 6 осям, вычисляют азимут (A) скважины на каждой станции съемки:

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{G_t(B_y G_x - B_x G_y)}{B_z(G_x^2 + G_y^2) - G_z(G_x B_x + G_y B_y)} \right) \quad (1)$$

где полное значение вектора гравитации G_t :

$$G_t = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (2)$$

Для расчета зенитного угла (I) используют только замеры акселерометров:

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{G_x^2 + G_y^2}}{G_z} \right) \quad (3)$$

Угол поворота инструмента вокруг оси Z – TF рассчитывается по формуле²

$$TF = \tan^{-1} \left(\frac{-G_x}{-G_y} \right) \quad (4)$$

Погрешности датчиков акселерометров и магнитометров ϵ_g и ϵ_b приводят к неточности измерений и, соответственно, погрешности в азимуте. Эти погрешности могут быть оценены как

$$\begin{aligned} \delta A_g &= \epsilon_g \left[\left(\frac{\partial A}{\partial G_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial G_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial G_z} \right)^2 \right]^{0,5} = \\ &= \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_g}{G} \left(\frac{B_y^2}{B_h^2} + \frac{1}{\tan^2 I} - 2 \cdot \frac{B_y \cdot \cos A}{B_h \cdot \tan I} \right)^{0,5} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\delta A_b = \epsilon_b \left[\left(\frac{\partial A}{\partial B_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial B_y} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial B_z} \right)^2 \right]^{0,5} = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_b}{B_h}, \quad (6)$$

где $B_h = (B_x^2 + B_y^2)^{0,5}$ – горизонтальная составляющая вектора магнитной индукции;

$B_v = B_z$ – вертикальная составляющая вектора магнитной индукции;

G_t – значение силы тяжести;

A – азимут скважины;

I – зенитный угол скважины;

δA_g – ошибка азимута, обусловленная погрешностью акселерометров;

δA_b – ошибка азимута, обусловленная погрешностью магнитометров.

Ошибки акселерометра и магнитометра не коррелированы между собой, поэтому общая погрешность по азимуту, обусловленная погрешностью датчиков, составляет

$$\delta A = (\delta A_g^2 + \delta A_b^2)^{0,5} \quad (7)$$

Как видно из приведенных формул, погрешность определения азимута существенно зависит от точности измерения фактических параметров магнитного и гравитационного поля. Гравитационное поле хорошо изучено и стабильно, магнитное поле, напротив, подвержено вариациям и внешним помехам. Таким образом, любые внешние помехи, искажающие геомагнитное поле в точке замера, оказывают прямое влияние на итоговую точность построения траектории.

Магнитная интерференция

Магнитная интерференция при измерениях в скважинах – это нежелательное искажение измеряемого вектора магнитного поля Земли, вызванное воздействием внешних магнитных полей. Эти поля накладываются на естественное геомагнитное поле и приводят к ошибкам в определении ориентации скважины.

Основными источниками интерференции являются:

– намагниченные элементы буровой колонны: стальные трубы, стабилизаторы, переводники, забойные двигатели и др., находящиеся выше или ниже телесистемы;

– соседние скважины – обсадные колонны близлежащих скважин, особенно при кустовом или уплотняющем бурении;

² В зависимости от направлений осей в телесистеме знаки числителя и знаменателя могут быть изменены.

- горные породы – железосодержащие горные породы могут создавать локальные магнитные аномалии;
- внешние геомагнитные возмущения: магнитные бури и струйные авроральные электроток;
- техногенные объекты поверхности: металлические объекты на поверхности или морском дне;
- намагниченный буровой раствор – добавки на основе железа (гематит, магнетит).

В целом магнитная интерференция – это «магнитный шум», который мешает телесистеме MWD точно определить направление на север, что может привести к ошибкам в проводке скважины, отклонению от проектных траекторий, недостижению геологических целей бурения, а также к рискам столкновения скважин в условиях высокой плотности бурения. Магнитное влияние на замеры MWD является одной из проблем отрасли, заслуживающей серьезного рассмотрения.

По влиянию на телесистему различают:

- осевую интерференцию (axial) – помеху, направленную вдоль продольной оси Z бурильной колонны (в первую очередь влияет на показания Z магнитометра);
- поперечную интерференцию (cross-axial) – помеху, действующую перпендикулярно оси скважины, вдоль осей X и Y .

Осевая магнитная интерференция

Намагниченность компонентов бурильной колонны связана с ее вращением, нагрузками и напряжением в магнитном поле Земли. Магнитные полюса образуются вблизи оконечностей каждого элемента. Каждый полюс создает поле ошибки на датчике, пропорциональное его силе и обратно пропорциональное квадрату расстояния от датчика. Сила магнитного полюса P равна магнитному потоку, который входит или выходит из него, и выражается в веберах (B_0).

Магнитные компоненты бурильной колонны могут также иметь индуцированную намагниченность, возникающую под влиянием магнитного поля Земли. Индуцированная осевая намагниченность, связанная с компонентами бурильной колонны, обычно мала по сравнению с постоянной намагниченностью.

Поскольку магнитные компоненты бурильной колонны обычно расположены на расстоянии не менее нескольких метров в осевом направлении от датчиков, поля ошибок, вызванные постоянной намагниченностью, направлены по оси Z . Поэтому поле ошибок эквивалентно ошибке смещения показаний Z -магнитометра.

В результате смещения магнитных полюсов от оси магнитных элементов, изгиба бурильной колонны или присутствия намагниченных участков в немагнитных элементах эффект влияния на поперечные магнитометры X и Y также может присутствовать, но кросс-осевая (поперечная) интерференция обычно на порядок меньше осевой.

Эффект осевого поля обычно заключается в увеличении расчетного азимута A , если скважина направлена на запад, или в его уменьшении, если скважина направлена на восток. В любом случае осевая помеха ведет к смещению расчетного местоположения забоя к северу, это типичный случай для скважин, расположенных в северном полушарии.

Предполагается, что поле ошибок (B), фиксируемое датчиками, представляет собой сумму вкладов от всех полюсов

$$B(r) = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (8)$$

где r – расстояние до источника помехи.

Для снижения магнитного влияния элементов КНБК на магнитометры забойная телесистема размещается в немагнитном участке бурильной колонны: немагнитной утяжеленной бурильной трубе (НУБТ), поле ошибок вызывается магнитными элементами выше и ниже этого участка и ориентировано в осевом направлении. В типовой компоновке низа бурильной колонны учитывают три полюса: один – над верхней оконечностью НУБТ, второй – под нижней и третий – в самом низу винтового забойного двигателя – долото. Все вместе они создают магнитное поле помех ΔB_z , для расчета их суммарного эффекта используется формула [4]

$$\Delta B_z(z) = \frac{|P_U|}{4\pi(L-z)^2} + \frac{|P_L|}{4\pi z^2} + \frac{|P_{BIT}|}{4\pi(z+L_{BIT})^2} \quad (9)$$

где $|P_U|$ и $|P_L|$ – модули силы полюсов, соответственно выше и ниже НУБТ;

L – длина НУБТ, м;

$L-z$ и z – расстояние от верха и низа НУБТ до магнитометров телесистемы;

L_{BIT} – длина участка бурильной колонны ниже НУБТ.

Используя приведенную формулу, можно определить такое расстояние z от низа бурильной колонны, при котором ΔB_z будет минимальной, именно там должны быть размещены магнитометры. Такой расчет выполняется на стадии проектирования КНБК на основе моделей или паспортных данных намагниченности элементов.

В работе SPE 11382 [4] приводятся следующие данные полевых замеров значений сил полюсов для типового скважинного оборудования:

- трубы выше НУБТ $> +9 \cdot 10^{-4} B_0$;
- стабилизатор $> -9 \cdot 10^{-5} B_0$;
- 10 м трубы ниже НУБТ $> -3 \cdot 10^{-4} B_0$;
- винтовой забойный двигатель (ВЗД) $> -1 \cdot 10^{-3} B_0$.

Указанные значения авторы [4] относят к консервативным оценкам. Следует также отметить, что показанная трехполюсная модель является упрощением, но она достаточно точна для большинства практических случаев.

Ошибка азимута ΔA , возникающая из-за интерференции бурильной колонны, определяется по формуле

$$\Delta A = \frac{\sin I \cdot \sin A \cdot \Delta B_z}{\cos(Dip) \cdot |B|} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (10)$$

где I – зенитный угол скважины;

A – магнитный азимут;

Dip – наклонение магнитного поля Земли в районе работ;

$|B|$ – значение полного вектора магнитной индукции магнитного поля Земли в районе работ;

$\cos(Dip) \cdot |B|$ – горизонтальная составляющая магнитного поля Земли;

ΔB_z – смещение показаний B_z из-за магнитной интерференции.

При проектировании КНБК необходимо учитывать, что ошибка азимута ΔA , связанная с осевой магнитной интерференцией, не должна превышать $0,5^\circ$.

Из уравнения 10 следует, что ошибка азимута возрастает:

- по мере приближения скважины к восточному и западному магнитным направлениям;
- при увеличении зенитного угла;
- по мере увеличения северной широты района работ, так

как угол магнитного наклонения увеличивается в северных широтах, а горизонтальная компонента при этом снижается.

Из изложенного следует, что магнитное влияние буровой колонны является систематической погрешностью, требующей специальных мер по снижению ее негативного влияния на точность азимута. К таким мерам можно отнести аппаратные меры магнитной изоляции телесистемы и методики коррекции замеров: одностанционную коррекцию и многостанционный анализ.

Кросс-осевая магнитная интерференция

Как уже было отмечено выше, кросс-осевая интерференция проявляется в искажении замеров магнитометров по осям X и Y , перпендикулярным направлению скважины и оси Z .

Источниками этого типа интерференции может быть недостаточная магнитная изоляция от влияния КНБК, «горячие точки» НУБТ (локальные намагниченные участки, которые могут появляться в процессе эксплуатации) и обсадные колонны соседних скважин. Также магнитный экранирующий эффект может оказывать намагниченность буровых растворов, особенно в таких положениях скважин, в которых раствор распределен вокруг КНБК неравномерно, например при провисании компоновки в горизонтальных участках. Эффекты негативного влияния намагниченности буровых растворов на замеры MWD подробно рассмотрены в работах SPE 71400 [5], SPE-195600-MS [6].

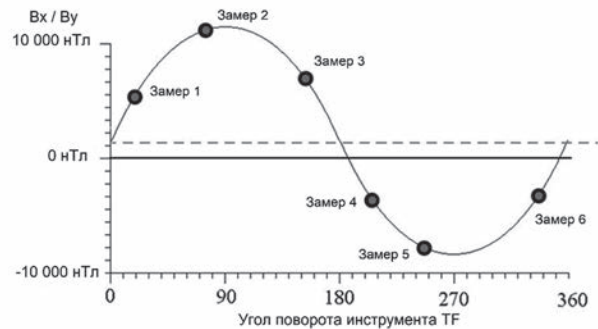
В отличие от оси Z влияния элементов КНБК на поперечные магнитометры осей X и Y значительно меньше, но в целом кросс-осевая интерференция также критична для расчета азимута, поскольку его значение напрямую зависит от горизонтальных компонентов магнитного поля B_x и B_y , ошибки в них могут привести к значительным отклонениям траектории ствола скважины.

Еще одной проблемой кросс-осевой интерференции являются ошибки положения инструмента относительно оси скважины – при навигационном бурении ориентация инструмента зависит от данных поперечных магнитометров и акселерометров.

Измерения, подверженные поперечному влиянию, могут не соответствовать критериям контроля качества (QC) по значениям полного магнитного поля $B_{t_{ref}}$ или углу магнитного наклонения Dip_{ref} , что требует применения корректирующих алгоритмов или отбраковки замеров.

Ключевую роль при диагностики кросс-осевой интерференции играет периодическое проведение ролл-тестов, которые заключаются в выполнении серии замеров на постоянной глубине MD с изменением угла вращения телесистемы TF вокруг оси скважины. При выполнении ролл-теста измерения должны проводиться во всех четырех квадрантах, взятие шести замеров в разных ориентациях, как правило, полностью обеспечивает выполнение этого условия. Поскольку значение показаний магнитометров по осям X и Y зависит от их текущего направления в магнитном поле Земли, то изменение их направления при вращении относительно оси скважины должно привести к изменению измеряемых величин B_x или B_y по синусоиде или создавать на графике окружность с центром в начале декартовой системы координат. На рисунке 2 показан результат ролл-теста из шести замеров, смещение центральной линии синусоиды относительно нулевого значения свидетельствует о наличии кросс-осевой интерференции,

а величина смещения показывает масштаб проблемы. В таблице на рисунке 2 показано изменение значения азимута A в точке замера в зависимости от поворота телесистемы вокруг оси.



№ замера	MD	INC	A	TF
1	850.34	30.24	315.67	18.32
2	850.33	30.20	322.45	70.67
3	850.33	30.27	319.25	150.34
4	850.34	30.22	316.87	211.41
5	850.33	30.28	321.92	247.63
6	850.33	30.25	317.48	343.52

Рис. 2. Результат ролл-теста. Кросс-осевая интерференция /
Fig. 2. The result of the roll test. Cross-axial interference

Предельных стандартизованных значений такого смещения не существует, операторы разработки и подрядчики по ННБ самостоятельно устанавливают его величину. Так, в умеренных широтах ориентируются на значение в 100 нТл, в северных широтах – до 150 нТл.

При выявлении значительной кросс-осевой интерференции необходимо выяснить ее причины, в первую очередь нужно обратить внимание на следующие обстоятельства:

- исправность телесистемы;
- наличие поблизости соседних скважин;
- наличие «горячих точек» на НУБТ;
- достаточность магнитной изоляции телесистемы;
- локальную намагниченность горных пород;
- намагниченность бурового раствора.

Умеренная кросс-осевая интерференция может быть скомпенсирована при помощи многостанционного анализа, при высокой – необходимо устранить источник помехи. Меры по исключению или снижению влияния кросс-осевой интерференции необходимо выбирать в соответствии с выявленными причинами и только после этого продолжать бурение. Если причина неустранима, например это обсадная колонна соседней скважины, необходимо применять гироскоп.

Для снижения влияния осевых и поперечных магнитных помех на измерения в отрасли используют следующие меры:

- *аппаратные*: магнитная изоляция датчиков MWD от внешних полей;
- *операционные*: проведение ролл-тестов и процедур контроля качества (QC) для обнаружения и отбраковки данных, полученных в условиях помех;
- *математические*: применение специальных алгоритмов одностанционной коррекции (SCC) и многостанционного анализа (MSA);
- *технологические*: использование гироскопических измерительных систем в условиях, где магнитные помехи неустранимы.

Аппаратные меры магнитной изоляции телесистемы

Аппаратная компенсация – это первая и обязательная мера защиты телесистемы от магнитного влияния бурильной колонны и недопущения возникновения азимутальных ошибок.

В отрасли используются следующие аппаратные меры:

– использование НУБТ и немагнитных элементов КНБК.

Суть метода заключается в увеличении расстояния между магнитометрами и источниками магнитных помех до приемлемого уровня. Это наиболее распространенное решение;

– применение активных систем компенсации: электромагнитных катушек или систем. Принцип их работы основан на измерении поля помех и генерации компенсирующего поля противоположного направления с помощью системы электромагнитов, управляемой бортовым процессором. Активные системы обладают высокой точностью компенсации, но, как правило, дороги и сложны в эксплуатации;

– применение магнитных экранов. Экран захватывает магнитное поле и пропускает его по себе, создавая замкнутый путь и не позволяя ему проходить через защищаемое устройство. В качестве материалов обычно используются сплавы на основе никеля (пермаллой), обладающие высокой магнитной проницаемостью в слабых полях. Экраны эффективно снижают помехи, но дороги и громоздки, поэтому применяются редко.

Использование НУБТ является одним из ранних, но в то же время простым и надежным решением, стандартно применяемым в настоящее время для обеспечения магнитной изоляции датчиков телесистемы.

Для снижения до приемлемого уровня магнитного влияния КНБК на телесистему использования одной стандартной 9-метровой НУБТ чаще всего недостаточно. Методика расчета длины НУБТ приводится в статье SPE 11382 [4]. Для расчета необходимой длины НУБТ ранее использовались специальные номограммы, учитывающие географическое положение района работ, зенитный угол и магнитный азимут скважины. Так, в соответствии с методикой расчета, длина НУБТ в районе Северного моря для скважины с зенитным углом 60° и азимутом 60° должна составлять более 40 метров (рис. 3).

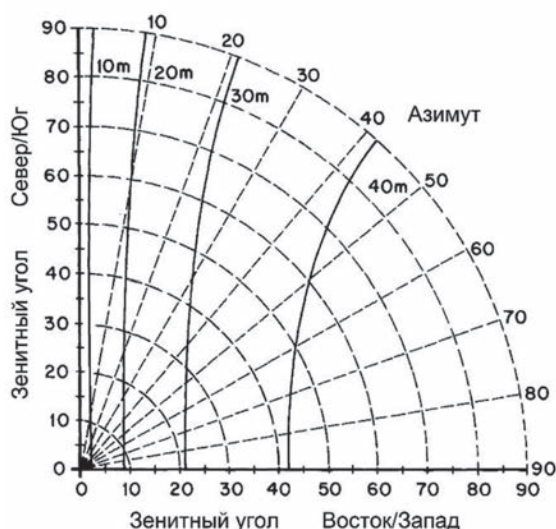


Рис. 3. Пример номограммы для расчета длины немагнитных утяжеленных буровых труб /
Fig. 3. An example of a nomogram for calculating the length of non-magnetic drill collars NDC

В настоящее время для расчетов магнитного влияния элементов КНБК на телесистему используется специализированное программное обеспечение.

Стандартная реализация аппаратных мер выглядит так:

1. На этапе проектирования КНБК рассчитывается необходимая длина немагнитного участка исходя из используемого оборудования, геометрических параметров скважины, местных параметров геомагнитного поля и свойств используемых труб.

2. В состав КНБК включаются немагнитные УБТ расчетной длины.

3. MWD-инструмент размещается внутри этой немагнитной секции.

4. Если остаточная погрешность все еще превышает допуски, применяются математические методы коррекции.

К преимуществам применения НУБТ можно отнести:

- отсутствие необходимости сложных вычислений;
- надежность метода на физическом уровне;
- возможность применения методов математической коррекции остаточной интерференции.

К недостаткам относятся:

- увеличение стоимости КНБК;
- увеличение длины и жесткости нижней части КНБК;
- удаление телесистемы от забоя скважины, что снижает точность проводки скважины;
- вероятность остаточных помех в северных широтах;
- необходимость более аккуратного обращения с бурильной колонной: прочность НУБТ ниже, чем у стандартных буровых труб, поэтому увеличение длины НУБТ повышает риск обрыва КНБК и потери дорогостоящего оборудования в скважине.

Обозначенные выше недостатки в некоторых случаях являются серьезным технологическим препятствием для бурения наклонно-направленных скважин. Для снижения этих ограничений в отрасли используется все больше элементов КНБК в немагнитном исполнении – это стабилизаторы, переводники, геофизические приборы каротажа. Также были разработаны меры математической коррекции измерений, позволяющие использовать более короткие НУБТ.

Математические методы коррекции

Как было показано выше, для обеспечения наибольшей точности измерений магнитного поля телесистема обычно размещается в немагнитной секции КНБК – НУБТ, окружающие телесистему элементы также могут быть изготовлены из немагнитного материала. Тем не менее НУБТ и немагнитные элементы могут намагничиваться во время буровых работ до такой степени, что точность измерений магнитного поля снижается до неприемлемых значений и не может соответствовать критериям контроля качества.

Для сокращения длины НУБТ и устранения осевого влияния приобретенной намагниченности немагнитных элементов используют различные алгоритмы математической коррекции замеров датчиков телесистемы, которые позволяют компенсировать ошибки, имеющие различные источники.

Эти алгоритмы могут использовать известные параметры магнитного поля, основываться на данных, полученных от одиночных замеров, или на статистическом анализе измерений на разных глубинах и с разной ориентацией инструмента.

Методы одностанционной коррекции в первую очередь направлены на компенсацию осевой интерференции. Преимуществом методов одностанционной коррекции является их робастность на основании одиночного замера, то есть они начинают работать сразу, и нет необходимости накопления представительной выборки. Однако многостанционные алгоритмы позволяют более точно компенсировать как осевую, так и поперечную магнитную интерференцию, а также устранять погрешности измерений акселерометров. Кроме этого, многостанционный анализ является мощным инструментом контроля качества замеров MWD и оценки используемых геомагнитных моделей.

Одностанционная коррекция

Методы одностанционной коррекции были разработаны одновременно с внедрением твердотельных забойных телесистем в конце 1970-х – начале 1980-х годов, их совершенствование продолжается по настоящее время [7, 8].

Используя известные параметры опорного магнитного поля, измерения акселерометров и принимая измерения магнитометров по осям X и Y как истинные, значение магнитометра по оси Z может быть рассчитано теоретически. После этого расчет азимута выполняется с использованием скорректированного значения Z -магнитометра. Коррекция по оси Z обеспечивает достоверность показаний по азимуту, когда магнитные параметры выходят за пределы референсных значений из-за интерференции бурильной колонны.

Простейший вариант определения теоретического значения магнитометра по оси Z – метод векторных сумм – использует уравнение полного модуля поля B_t :

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}, \quad (11)$$

$$B_z = \sqrt{B_t^2 - B_x^2 - B_y^2} \quad (12)$$

Таким образом, величина B_z вычисляется из референсного значения B_t и измеренных B_x и B_y .

При зенитных углах, близких к горизонтальным, могут появляться двойственные решения значения B_z . Верное значение может быть найдено при подстановке в формулу расчетного значения B_z и сравнения полученного значения Dip с референсным значением Dip_{ref} :

$$Dip = \tan^{-1} \left[\frac{B_x G_x + B_y G_y + B_z G_z}{\sqrt{(G_y B_z - G_z B_y)^2 + (G_x B_z - G_z B_x)^2 + (G_y B_x - G_x B_y)^2}} \right] \quad (13)$$

Другой вариант определения осевой компоненты использует два ожидаемых значения: B_{z1} – для модуля полной индукции магнитного поля $B_{t_{ref}}$ и B_{z2} – для магнитного наклона Dip_{ref} взятых из опорной геомагнитной модели. Значение B_{z1} вычисляется методом векторных сумм из B_t . Значение B_{z2} рассчитывается для обеспечения наилучшего соответствия референсному углу магнитного наклона. Используя Dip_{ref} измерения акселерометров и поперечных магнитометров B_x и B_y , значение B_{z2} определяют с помощью приведенной выше формулы расчета Dip . Решение находится путем итерационной процедуры подбора наилучшего соответствия.

Затем из полученных B_{z1} и B_{z2} вычисляют итоговое взвешенное значение B_{ze} , которое представляет наилучшее решение для осевой компоненты магнитного поля:

$$B_{ze} = \frac{C_1 \cdot B_{z1} + C_2 \cdot B_{z2}}{C_1 + C_2} \quad (14)$$

где C_1 и C_2 – весовые коэффициенты, обратно пропорциональные неопределенности B_{z1} и B_{z2} соответственно, метод подробно описан в патенте США № 5452518³.

Еще один итерационный алгоритм – метод короткого НУБТ – описан в патентах США № 4163324⁴ и 33708⁵.

Алгоритм заключается в циклическом уточнении азимута A и значения осевой компоненты B_z до достижения сходимости решения:

1) сперва вычисляют начальный азимут A_0 с использованием поперечных осей магнитометров, акселерометров и параметров исходного геомагнитного поля по формуле

$$A_0 = \frac{-(B_x \sin TF + B_y \cos TF) \cos I}{(B_x \cos TF - B_y \sin TF) + B_z \sin I} \quad (15)$$

где TF – угол поворота инструмента вокруг оси, равный $G_y / (-G_x)$;

B_y – вертикальная составляющая опорного геомагнитного поля;

I – зенитный угол.

2) значение B_z определяют по формуле

$$B_z = B_h \cos A_0 \sin I + B_v \cos I \quad (16)$$

где B_h – горизонтальная составляющая опорного геомагнитного поля;

3) далее азимут вычисляют по формуле

$$A_i = \frac{-(B_x \sin TF + B_y \cos TF)}{\cos I (B_x \cos TF - B_y \sin TF) + B_z \sin I} \quad (17)$$

4) затем повторяют вычисление значения B_z по формуле из пункта 2, заменяя A_0 на A_i , и далее вычисляя A_{i+1} по формуле из пункта 3.

5) итерации по пунктам 2 и 3 выполняют до тех пор, пока изменение азимута между итерациями не будет менее $0,0001^\circ$.

Разные производители программного обеспечения могут использовать собственные алгоритмы коррекции, которые чаще всего решают задачу поиска оптимального баланса соответствия значения B_z модулю B_t и наклону Dip .

На рисунке 4 (см. цв. вклейку на стр. 38) показан принцип подбора значения B_z , обеспечивающего наилучшее соответствие полному полю B_t и углу наклона Dip .

Методы одностанционной коррекции имеют ограничения, связанные с направлением скважины относительно вектора магнитного поля Земли и особенностями алгоритма. Точность опорной геомагнитной модели критически важна для результатов коррекции, особенно в сложных ориентациях.

По мере увеличения зенитного угла и приближении к направлениям восток/запад одностанционная коррекция теряет

³ DiPersio R.D. Method of correcting for axial error components in magnetometer readings during wellbore survey operations // Patent No. US5452518A. Date of Patent: 26.09.1995.

⁴ Russell M.K., Russell A.W. Surveying of boreholes // Patent No. US4163324A. Date of Patent: 07.08.1979.

⁵ Roesler R.F.. Surveying of boreholes using shortened non-magnetic collars // Patent No. USRE33708E. Date of Patent: 08.10.1991.

свою точность. Это связано с тем, что в этих направлениях инструмент ориентирован практически перпендикулярно магнитному меридиану, влияние интерференции становится максимальным, что делает алгоритм коррекции неэффективным и неустойчивым. По этой причине методы одностанционной коррекции имеют строго определенные зоны исключения (no-go zones), где их применение не рекомендовано или полностью запрещено из-за риска получения некорректных результатов.

Отраслевые ограничения на использование методов одностанционной коррекции для средних широт приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Отраслевые ограничения на использование методов одностанционной коррекции /

Industry restrictions on the use of single-station correction methods (Short Collar Correction (SCC))

Диапазон зенитного угла, град	Диапазон азимута, град	Применимость SCC
0–60	0–360	Ограничений нет
60–90	0–60, 120–240, 300–360	Ограничений нет
60–90	60–70, 110–120, 240–250, 290–300	Не рекомендуется
60–90	70–110, 250–290	Запрещено

*Данные рекомендации соответствуют модели ошибок ISCWSA для регионов с умеренным магнитным наклонением

При выполнении работ в районах со значительными углами магнитного наклонения зоны исключения должны быть еще более консервативными.

Описанные ограничения одностанционной коррекции, особенно в условиях высоких широт и больших зенитных углов, обуславливают необходимость применения более сложных методов, основанных на статистической обработке множества измерений.

Многостанционный анализ

Значительным улучшением ранних методик компенсации магнитных помех стал алгоритм статистического анализа группы замеров MSA (Multistation analysis). Метод был предложен Эндрю Бруксом (Baker Hughes INTEQ) в 1998 году, алгоритм метода подробно описан в патенте US6179067B1⁶ и статье SPE 49060 [9]. Главное преимущество методики MSA – это возможность решить проблему магнитных помех буровой колонны для скважин при значительном снижении зависимости от их ориентации. В отличие от одностанционной коррекции (SCC), которая работает с каждым замером независимо и имеет строгие ограничения по азимуту, MSA анализирует всю совокупность данных рейса, что позволяет устранять систематические ошибки более надежно и в более широком диапазоне направлений бурения, однако предъявляет более высокие требования к количеству и качеству данных.

Принцип метода. Метод основан на явном предположении об общих источниках ошибок для всех замеров рейса и минимизации дисперсии относительно значений опорного поля. То есть если общая осевая магнитная ошибка оценива-

ется как смещение (бэйс) ϵbz измерения Z-магнитометра, то для любого n-го замера этого рейса оно может быть скорректировано следующим образом:

$$B_{z_{corr_n}} = B_{z_{meas_n}} - \epsilon bz \quad (18)$$

где $B_{z_{corr}}$ – скорректированное значение B_z ;
 $B_{z_{meas}}$ – измеренное значение B_z .

Поиск значения смещения ϵbz выполняется итерационно, верным решением считается такое, при котором дисперсия V измерений параметров фактического магнитного поля относительно референсного значения будет минимальна.

Поскольку вертикальная и горизонтальная компоненты поля не коррелированы между собой, для расчета дисперсии V используется формула

$$V = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (B_{h_n} - B_{h_{ref}})^2 + (B_{v_n} - B_{v_{ref}})^2 \quad (19)$$

где суммирование проводится по всем n замерам в рассматриваемом рейсе;

B_h, B_v – значения горизонтальной и вертикальной составляющей магнитного поля, рассчитанные по приведенным ниже формулам;

$B_{h_{ref}}, B_{v_{ref}}$ – референсные значения горизонтальной и вертикальной составляющей магнитного поля, рассчитанные на основании параметров используемой геомагнитной модели.

Измеренная вертикальная компонента на станции n:

$$B_{v_n} = \frac{(B_{x_n} \cdot G_{x_n} + B_{y_n} \cdot G_{y_n} + B_{z_{corr_n}} \cdot G_{z_n})}{(G_{x_n}^2 + G_{y_n}^2 + G_{z_n}^2)^{0.5}} \quad (20)$$

Измеренная горизонтальная компонента на станции n:

$$B_{h_n} = (B_{x_n}^2 + B_{y_n}^2 + B_{z_{corr_n}}^2 - B_{v_n}^2)^{0.5} \quad (21)$$

Референсное значение вертикальной $B_{v_{ref}}$ и горизонтальной $B_{h_{ref}}$ компонент:

$$B_{v_{ref}} = B_{ref} \cdot \sin(Dip_{ref}), \quad (22)$$

$$B_{h_{ref}} = B_{ref} \cdot \cos(Dip_{ref}), \quad (23)$$

где B_{ref} и Dip_{ref} – полный модуль магнитной индукции и угол магнитного наклонения, предсказанные геомагнитной моделью.

Пример сокращения дисперсии и коррекции замеров до уровня соответствия полевым критериям приемки показан на рисунке 5.

Алгоритм решает задачу оптимизации ϵbz , используя значение опорного геомагнитного поля и замеров, сделанных в течении рейса с одной неизменной компоновкой низа буровой колонны. Каждая компоновка имеет уникальную «магнитную подпись». MSA делает расчет магнитной сигнатуры конкретной КНБК и применяет полученные поправки ко всем замерам рейса.

Метод не ограничивается расчетом поправки осевого магнитометра B_z , аналогичным образом могут быть рассчитаны поправки к поперечным осям B_x и B_y , а также масштабные коэффициенты к ним.

При помощи этого же алгоритма может быть проведена коррекция смещений и масштабных коэффициентов акселерометров.

⁶ Brooks A.G. Method for magnetic survey calibration and estimation of uncertainty // Patent No.US6179067B1. Date of Patent: 30.01.2001.

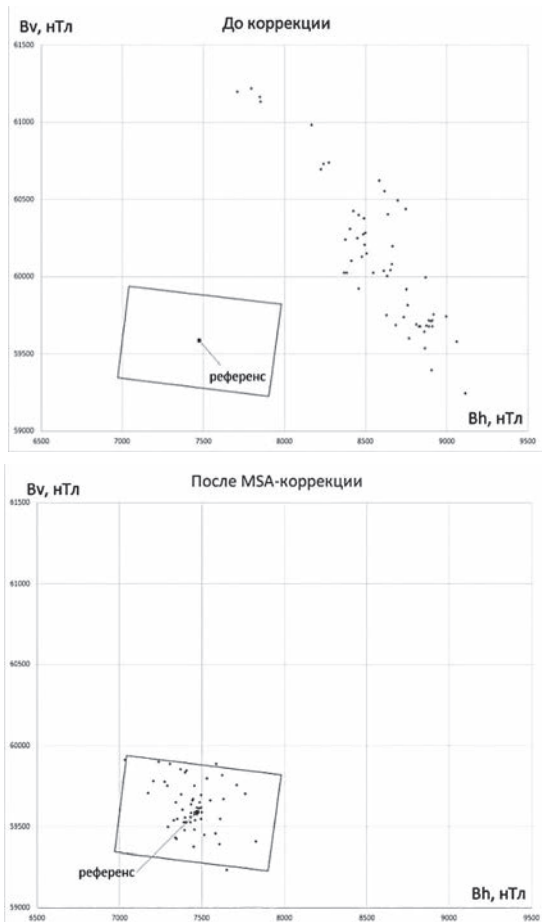


Рис. 5. Замеры до и после коррекции. Выделенная область – граница критериев приемки замеров, определенная относительно референсных значений /

Fig. 5. Measurements before and after correction. The selected area is the boundary of the measurement acceptance criteria, defined relative to the reference values

С помощью многостанционного анализа можно идентифицировать и исправить большинство систематических ошибок, общих для всех замеров рейса. Остаточные ошибки моделируются как случайные или шум датчиков. Величина шума может быть оценена из спецификаций датчиков и характеристик неопределенности поля или из остаточной дисперсии V . Квадратный корень из V может быть использован для приближенной оценки стандартного отклонения σ шума на каждом канале магнитометра.

Условия применения. Для достоверных решений алгоритма необходимо выполнение ряда условий:

- число замеров должно быть не менее чем в три раза больше числа оцениваемых членов ошибки и всегда больше или равно четырем;
- замеры предпочтительно должны быть взяты с равномерным распределением ориентации инструмента вокруг оси и не должны быть сгруппированы в одном угловом секторе;
- траектория скважины должна изменяться по зенитному углу и азимуту минимум на 5° .

Более детально минимальные требования к MSA рассмотрены в работах SPE-125677-MS и SPE-173098-MS [10, 11]. Необходимо отметить, что несмотря на то, что данный метод менее восприимчив к ограничениям, присущим одностанционным алгоритмам коррекции, он также имеет ограничения,

связанные с ориентацией горизонтальных стволов скважин в направлениях запад/восток. Так, при использовании моделей магнитного поля Земли стандартного разрешения, среднее значение произведения $\sin(I) \cdot \sin(A)$ в рейсе должно быть $<0,82$, для IFR-моделей $<0,91$. Замеры, не удовлетворяющие этому условию, относятся к зоне исключений (red zone / no-go zone). При превышении этих значений система уравнений становится плохо обусловленной, что приводит к неустойчивым решениям и резкому росту погрешности коррекции.

Контроль качества измерений. Кроме коррекции замеров, метод MSA широко используется в процедурах контроля качества замеров (QA/QC). В отрасли используется многостанционное тестирование акселерометров (MSAT), магнитометров (MSMT) и многостанционный гиротест (MSGT). Подробно использование многостанционных тестов в процедурах контроля качества описано в работах Роджера Эксета и др. [12, 13]. В работе Нирнес и др. SPE/IADC 96211 [14], посвященной анализу точности и надежности магнитных замеров, сделаны выводы, что MSA наиболее полезен для диагностики внешних воздействий и сбоев датчиков, в то время как наличие ошибок датчиков приемлемой величины сложнее доказать статистически. В исследованиях был сделан вывод о том, что использование MSA без соблюдения требований, предъявляемых к замерам, увеличивает вероятность неправильной интерпретации результатов оценки. Указанные исследования подчеркивают, что MSA всегда будет предоставлять ценную информацию о качестве магнитных съемок.

Проверка на соответствие полевым критериям качества (Field Acceptance Criteria) эффективно выявляет потенциальные проблемы качества замеров, но мало способствует определению причины проблемы или выявлению источников ошибок. Для этого данные замеров могут быть дополнительно проанализированы с использованием расширенных методов многоточечного анализа (MSA) для определения отдельных составляющих ошибки, вызванных смещением, масштабом и несоосностью датчиков. Трендовый анализ также полезен для распознавания характерных форм магнитной интерференции буровой колонны, магнитного бурового раствора и других факторов окружающей среды, влияющих на погрешность замера.

В работе К. Булыченкова SPE 166865 [15] приводится усовершенствованный алгоритм MSA, устойчивый к ошибкам, вызванным неточностью геомагнитной модели, а также позволяющий выполнять точную коррекцию осевой магнитной интерференции в горизонтальных скважинах в направлении запад/восток. Метод основан на выделении доверительного интервала измерений и выполнении вычислений в его пределах.

Коррекция MSA позволяет устранить внешнее влияние КНБК, после чего с помощью скорректированных значений B_x , B_y и B_z можно определить фактические параметры магнитного поля: полный модуль магнитной индукции B_i и угол магнитного наклона Dip . Это позволяет оценить применимость используемой геомагнитной модели в данной локации. Для этого траектория скважины должна иметь достаточную вариацию по зенитному углу и азимуту, а сами замеры не должны быть излишне зашумлены.

Практические результаты коррекции замеров

В ходе проведенного исследования была выполнена коррекция замеров методом векторных сумм и MSA для набора

из 15 скважин, в которых дополнительно проводились гироскопические замеры от устья до конца секции под эксплуатационную колонну (ЭК). Цель исследования заключалась в проверке работоспособности алгоритмов одностанционной и многостанционной коррекции, реализованных в среде MS Excel. География района – Крайний Север. Геомагнитные условия района работ можно отнести к очень сложным – горизонтальная составляющая магнитного поля приблизительно 7000 нТл, угол магнитного наклона более 80°. Неопределенности положения скважин в таких условиях возрастают более чем на 50 % по сравнению с умеренными широтами.

Практическое применение одностанционной коррекции методом векторных сумм показало его надежность в несколько меньших пределах, чем предусмотрено зонами исключения метода, авторы связывают это со сложными геомагнитными условиями района работ. Метод приемлемо выполнял осевую коррекцию примерно до середины секции под ЭК с зенитными углами около 50° в «плохих» направлениях. Было принято решение об использовании метода векторных сумм только для коррекции замеров при бурении секции под кондуктор (приблизительно первые 430 м). Использование MSA в верхней секции затруднительно из-за незначительной угловой вариации траектории и помех, вызванных близостью направления и наземного оборудования буровой площадки.

Статистический анализ результатов MSA-коррекции проводился в секциях под ЭК в диапазоне глубин по стволу ~ от 430 до 1330 м, в которых выполнялся набор зенитного угла и азимута для оптимального вскрытия продуктивного пласта. Соответственно, траектории на этом участке имеют наибольший диапазон вариаций направлений, что обеспечивает одно из основных условий успешной коррекции. В ходе исследования устранялась только осевая интерференция: поправка рассчитывалась для магнитометра B_z .

Сравнивалось боковое (латеральное) отклонение между траекториями, построенными по гироскопическим замерам и замерам MWD до и после коррекции. Гироскопические траектории в данном случае приняты как эталонные ввиду того, что они не подвержены ошибкам, свойственным для магнитных измерений.

В процессе вычислений из выборки была исключена одна скважина, не удовлетворяющая условию $\sin(I) \cdot \sin(A) < 0,82$, она практически полностью попадала в зону исключений MSA. Попытки коррекции в ней приводили к ухудшению положения. По четырем скважинам величины коррекции ϵ_{bz} были сопоставимы с неопределенностью геомагнитной модели. В результате по пяти указанным скважинам было принято решение остаться на сырых замерах.

Коррекция выполнялась с использованием двух геомагнитных моделей – BGGM и IGRF.

По оставшимся 10 скважинам коррекция по обеим моделям значительно приблизила траектории к эталонным значениям, модель высокого разрешения BGGM ожидаемо показала лучший результат. По этой модели медианное значение осевой коррекции ϵ_{bz} для 10 скважин составило 890 нТл (диапазон от 146 до 2140 нТл), медиана коррекции азимута при использовании модели BGGM – 3,2° (диапазон от 0,5° до 7°). Минимальное улучшение положения траектории составило 47 %, максимальное – 98 %, среднее – 76 %.

Результаты коррекции для двух моделей приведены в таблице 2 и на рисунках 6 и 7.

Таблица 2 / Table 2

Размеры отклонения траекторий MWD от гироскопа до и после коррекции /
The size of the deviation of the MWD trajectories from the gyroscope before and after correction

Скв.	Отклонение траектории MWD от траектории гироскопа, м				Величина коррекции			
	Raw* BGGM (без корр.)	BGGM+MSA (коррекция)	Raw IGRF (без корр.)	IGRF+MSA (коррекция)	ΔAz BGGM	ΔAz IGRF	ϵ_{bz} BGGM	ϵ_{bz} IGRF
1	35,21	3,78	38,77	10,65	4,09	3,63	1282	1115
2	26,72	2,98	31,01	8,38	2,90	2,75	920	868
3	13,13	3,09	11,26	4,47	2,61	2,49	2140	2014
4	5,38	2,04	9,16	0,19	0,52	1,26	146	346
5	87,65	0,79	85,87	2,05	7,03	6,68	1773	1664
6	8,54	3,27	14,29	4,73	1,69	0,67	300	111
7	8,41	4,49	10,93	0,94	3,70	3,49	1278	1191
8	25,16	9,86	27,63	15,28	1,25	0,79	201	128
9	77,43	3,02	74,72	9,82	5,29	4,81	1565	1403
10	27,76	6,76	24,97	12,82	2,94	1,56	506	272

Raw* – сырые (необработанные замеры)

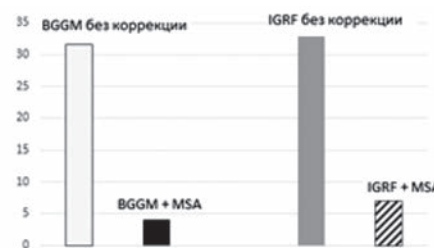


Рис. 6. Средние величины отклонения траекторий MWD от гироскопа до и после MSA-коррекции по моделям МПЗ, м /

Fig. 6. Average deviations of the MWD trajectories from the gyroscope in meters before and after the MSA correction based on models of the Earth's magnetic field

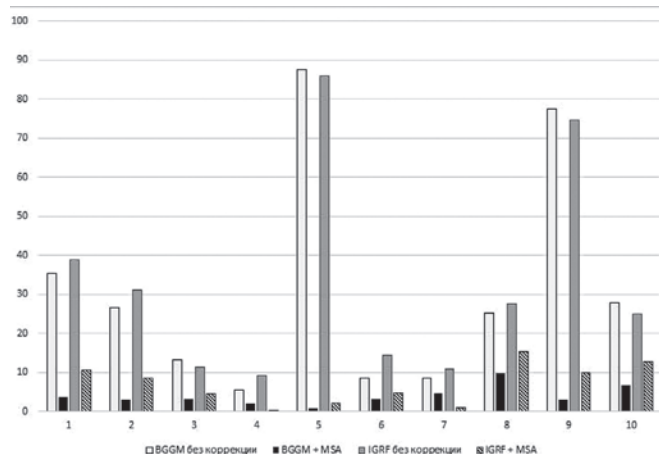


Рис. 7. Величины отклонения траекторий MWD от гироскопа до и после MSA-коррекции по скважинам и моделям МПЗ, м /

Fig. 7. The magnitude of the deviation of the MWD trajectories from the gyroscope in meters before and after the MSA correction for wells and models of the Earth's magnetic field

Сходимость алгоритма была дополнительно проверена по данным расчета специализированного программного продукта для коррекции MWD-замеров одного из ведущих рос-

сийских разработчиков, расхождение результатов коррекции в Excel и специализированном ПО в конце секции под ЭК не превышали 1 м по всем скорректированным траекториям.

Оценка влияния коррекции на уменьшение эллипсоидов неопределенности в данном исследовании не проводилась, данная работа планируется авторами в качестве темы для дальнейших исследований.

Обсуждение результатов исследования

Важным результатом исследования является успешная апробация алгоритма MSA, реализованного в среде Excel. Это подтверждает, что базовые принципы метода достаточно просты для их понимания и применения силами маркшейдерских служб нефтегазовых компаний. Возможность самостоятельного проведения первичного MSA-анализа позволит оперативно выявлять систематические ошибки на раннем этапе (при условии своевременного получения текущих замеров), не дожидаясь итоговой обработки данных подрядчиком, что снизит риски принятия неверных решений по корректировке траектории и потенциально сэкономит значительные средства. Безусловно, для промышленного применения требуются специализированные программные пакеты, однако данная реализация позволяет оперативно осуществлять внутренний контроль траекторий, предоставляемых подрядчиками, и быстро оценивать качество проводки наклонно-направленных и горизонтальных скважин.

Выполнение расчетов по двум моделям показало, что метод также может быть использован с моделями низкого разрешения.

Получено подтверждение работоспособности методов одностанционной коррекции в пределах его применимости. Рекомендуется применять одностанционную коррекцию в секции под кондуктор. Для секций под эксплуатационную/техническую колонны и под хвостовик следует применять MSA. Данная стратегия основана на том, что на начальных участках скважин присутствует несистематическое магнитное влияние направления и поверхностного оборудования, зенитные углы часто малы, и траектория не обладает достаточной вариативностью для надежного MSA, что делает робастную одностанционную коррекцию предпочтительным методом. В следующих секциях скважина обладает большей вариацией траектории, и MSA становится более эффективным, тогда как одностанционная коррекция теряет точность и быстро попадает в зоны исключения.

Полученные результаты требуют дальнейшей верификации на более представительной выборке скважин.

Наиболее полезным в дальнейшем представляется решение следующих задач:

- разработки методики, основанной на базе модели ошибок ISCWSA, позволяющей выполнять расчет параметров эллипсоидов неопределенности для скважин, на которых применялась MSA-коррекция. Методика должна учитывать разные геомагнитные модели и результаты оценки качества коррекции;
- выполнения анализа корреляции между расчетными магнитными помехами КНБК и результатами коррекции;
- определения возможностей и ограничений применения алгоритма MSA в условиях высоких широт с экстремально низким значением горизонтальной составляющей магнитного поля;

– сравнения эффективности MSA для различных геомагнитных моделей;

– разработки формализованных критериев оценки качества коррекции MSA и практических рекомендаций по ее применению.

Отдельно стоит отметить, что в настоящее время большинство программ замеров ограничивается минимальным набором измерений для определения траекторий скважин, любые контрольные измерения относятся, скорее, к редким исключениям. Маркшейдерским службам операторов разработки предлагается серьезно отнестись к данному вопросу и настойчиво разъяснять коллегам из буровых и геологических управлений, что однократное измерение может нести в себе невыявленные систематические ошибки и не может считаться полностью достоверным без проведения контрольных процедур. Незначительные затраты времени и средств на повторные замеры ведут к повышению точности проводки скважин, снижению рисков промышленной безопасности, повышению эффективности разработки и, в конечном итоге, конвертируются в баррели нефти и доллары прибыли. Здесь не лишним будет напомнить, что книги маркшейдерских указаний никто не отменял.

Метод MSA показывает наиболее устойчивые решения в секциях с достаточным изменением зенитного угла и азимута. Авторы считают целесообразным проведение ролл-теста в начале секции для контроля кросс-осевой интерференции и ускорения процесса набора достаточной статистической базы замеров для применения коррекции при проводке скважины.

К важным мерам повышения уверенности и контроля качества проводки скважин необходимо отнести проведение замеров гироскопическими приборами при повторных геофизических исследованиях скважин.

При отсутствии IFR-модели и контроле вариаций магнитного поля в районах, расположенных в условиях высоких широт или в местностях со значительными локальными аномалиями магнитного поля, идеальным вариантом является спуск гироскопа до точки вскрытия продуктивного пласта после окончания бурения секции под ЭК и его подъем на поверхность вместе с бурильной колонной с записью замеров в двух направлениях: прямо и обратно. Такая операция требует минимальных затрат времени, но значительно снижает неопределенность траектории скважин, что особенно актуально при уплотняющем бурении в высоких широтах. При проведении исследования гироскопические данные по тестовому набору были получены в результате описанной здесь процедуры. По мнению авторов, в любых условиях необходима системная работа по изменению подходов к планированию буровых работ в сторону увеличения количества достоверных данных.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что магнитное влияние бурильной колонны является значительным источником систематических ошибок при определении азимута скважин методом MWD. Это приводит к существенной пространственной неопределенности траектории и сопряжено с серьезными технологическими и экономическими рисками.

Аппаратные меры (использование НУБТ и немагнитных элементов КНБК) являются первым и необходимым этапом защиты от магнитных помех. Однако из-за технических ограничений они зачастую недостаточны для полного устранения

внешнего влияния на замеры, особенно в условиях высоких широт и сложных траекторий.

Математические методы коррекции демонстрируют высокую эффективность в компенсации магнитных помех. Одностанционная коррекция (SCC) робастна и применима на начальных участках бурения, однако имеет строгие ограничения, связанные с ориентацией скважины относительно магнитного поля Земли.

Многостанционный анализ (MSA) показал себя как мощный и универсальный инструмент для подавления магнитных помех, позволяющий значительно повысить точность магнитных съемок до уровня, близкого к гироскопическим измерениям, даже в экстремальных геомагнитных условиях Крайнего Севера.

Практическая апробация алгоритма MSA-коррекции в MS Excel доказала возможность их успешного применения силами маркшейдерских служб нефтегазовых компаний для независимого контроля траекторий, предоставляемых подрядчиками.

Главным условием успешного применения методов коррекции является наличие качественных замеров MWD, что требует внедрения строгих протоколов контроля качества измерений, которые не ограничиваются прохождением теста на соответствие полевым критериям (FAC).

Для полной оценки эффекта от коррекции и интеграции ее результатов в систему управления рисками бурения необходима разработка методики расчета эллипсоидов неопределенности, учитывающей применение MSA и SCC, а также формализованных критериев оценки качества коррекции.

Методы математической коррекции, оценка качества за-

меров и другие меры, направленные на повышение точности проводки скважин, являются областью, в которой наиболее полно может раскрыться потенциал маркшейдерских служб нефтегазовых компаний.

Маркшейдерским службам необходимо критически рассматривать действующие программы замеров и оценивать их достаточность с точки зрения возможностей контроля качества замеров. При необходимости включать в программы замеров проведение ролл-тестов и повторных измерений при подъеме бурильной колонны.

При высоких рисках столкновений скважин или недостижения геологических целей бурения для обеспечения приемлемого уровня точности проводки скважин необходимо рассматривать создание локальной геомагнитной модели (IFR), обеспечение ННБ геомагнитными вариационными данными (PIFR) или применение высокоточных гироскопов для контроля траекторий.

Выводы

1. Проведенное исследование показало, что комплексное применение аппаратных мер изоляции, одностанционной коррекции на начальных участках и многостанционного анализа на последующих этапах бурения, подкрепленное строгим протоколом контрольных замеров, позволяет вывести точность проводки скважин на качественно новый уровень.

2. Внедрение предложенных методик коррекции в практику маркшейдерского обеспечения буровых работ является действенным инструментом снижения рисков пересечения скважин и повышения экономической эффективности разработки месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р. Маркшейдерский контроль пространственного положения скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (3): 21-28.
Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R. Surveying control of the spatial position of wells. *Mine Surveying and subsurface use*. 2025; 25 (3): 21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-21-28>.
2. Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Петров В.Г., и др. Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025; 25 (4): 71-82.
Bukhtoyarov B.N., Starikova O.R., Petrov V.G., et al. Geomagnetic data for directional drilling and well positioning. *Mine Surveying and subsurface use*. 2025; 25 (4): 71-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/207933322025-25-4-71-82>.
3. Introduction to Wellbore Positioning. *ISCWSA: Well Intercept Sub-committee eBook* URL: <https://www.uhi.ac.uk/en/wellbore-positioning-download/>.
4. Grindrod S.J., Wolff J.M., Calculation of NMDC Length Required for Various Latitudes Developed from Field Measurements of Drill String Magnetization. *Paper IADC/SPE 11382 presented at the 1983 IADC/SPE Drilling Conference*. New Orleans, 1983.
5. Wilson H., Brooks A.G. Wellbore Position Errors Caused by Drilling Fluid Contamination. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, 2001. <https://doi.org/10.2118/71400-MS>.
6. Edvardsen I., Nyrnes E., Gullikstad J. et al. Best Practices and Recommendations for Magnetic Directional Surveying in the Barents Sea. *Paper presented at the SPE Norway One Day Seminar*. Bergen, Norway, 2019. <https://doi.org/10.2118/195600-MS>.
7. Russell A.W., Roesler R.F. Reduction of Nonmagnetic Drill Collar Length Through Magnetic Azimuth Correction Technique. *Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, 1985. <https://doi.org/10.2118/13476-MS>.
8. Cheatham C.A., Shih S., Churchwell D.L., et al. Effects of Magnetic Interference on Directional Surveys in Horizontal Wells. *Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, 1992. <https://doi.org/10.2118/23852-MS>.
9. Brooks A.G., Gurden P.A., Noy K.A. Practical Application of a Multiple-Survey Magnetic Correction Algorithm. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, 1998. <https://doi.org/10.2118/49060-MS>.
10. Nyrnes E., Torkildsen T., Wilson H. Minimum Requirements for Multi-Station Analysis of MWD Magnetic Directional Surveys. *Paper presented at the Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition*. Manama, Bahrain, 2009. <https://doi.org/10.2118/125677-MS>.
11. Hanak F. C., Wilson H., Gjertsen M. Assessment of the Validity of MWD Survey Accuracy Following Multistation Analysis. *Conference: SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. London, United Kingdom, 2015. <https://doi.org/10.2118/173098-MS>.
12. Ekseth R., Kovalenko K., Weston J.L., et al. The Reliability Problem Related to Directional Survey Data. *Paper presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Bangkok, Thailand, 2006. <https://doi.org/10.2118/103734-MS>.
13. Ekseth R., Torkildsen T., Brooks A., et al. High Integrity Wellbore Surveys: Methods for Eliminating Gross Errors. *SPE/IADC 105558 presented at the SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, The Netherlands, 2007. <https://doi.org/10.2118/105558-MS>.

14. Nyrnes E., Torkildsen T. Analyses of the Accuracy and Reliability of Magnetic Directional Surveys. *Paper presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Dubai, United Arab Emirates, 2005. <https://doi.org/10.2118/96211-MS>.
15. Bulychenkov K. Improving Multistation Analysis of MWD Directional Magnetic Surveys. *Paper presented at the SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 2013. <https://doi.org/10.2118/166865-MS>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Николаевич Бухтояров –

начальник отдела маркшейдерско-геодезических работ, ООО «Газпром нефть шельф», 191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: z9851275712@gmail.com

Оксана Рашитовна Старикова –

заместитель начальника отдела маркшейдерско-геодезических работ ООО «Газпром нефть шельф», 191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: oxy3791@gmail.com

Анастасия Алексеевна Виноградова –

студентка 6-го курса, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 199106, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Vinog_Nas02@mail.ru

Критерии авторства:

Б. Н. Бухтояров – написание части текста статьи, анализ источников, редактирование; О. Р. Старикова – реализация алгоритмов коррекции, выполнение вычислений, написание части разделов текста; А. А. Виноградова – разработка и реализация алгоритмов контроля устойчивости решений MSA, выполнение расчетов, написание части текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.09.2025

Поступила после рецензирования: 05.10.2025

Принята к публикации: 12.10.2025

ABOUT THE AUTHORS

Boris N. Bukhtoyarov –

Head of Surveying and Geodesy Department, Gazprom Neft Shelf LLC, 191186, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: z9851275712@gmail.com

Oksana R. Starikova –

Deputy Head of the Surveying and Geodesy Department of Gazprom Neft Shelf LLC, 191186, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: oxy3791@gmail.com

Anastasia A. Vinogradova –

5th year student, St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, 199106, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: Vinog_Nas02@mail.ru

Contribution:

B. N. Bukhtoyarov – writing part of the text, analysis of sources, editing; O. R. Starikova – implementation of correction algorithms, performing computations, writing part of the sections; A. A. Vinogradova – development and implementation of MSA solution stability control algorithms, performing calculations, writing part of the text. Note: all authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Article info

Received: 24.09.2025

Revised: 05.10.2025

Accepted: 12.10.2025