

ГЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ СКВАЖИН

Б. Н. Бухтояров^{1✉}, О. Р. Старикова¹,
В. Г. Петров², Д. В. Кудин³, А. А. Виноградова⁴

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

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН
(ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Российская Федерация

³Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва, Российская Федерация

⁴Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

✉ z9851275712@gmail.com

Аннотация: Освещены вопросы использования в наклонно-направленном бурении (ННБ) моделей магнитного поля Земли и их параметров. Показаны примеры геомагнитных моделей, которые могут применяться в ННБ для проводки скважин и при определении их траекторий. Рассмотрены отечественные модели высокого разрешения, приведены их основные характеристики. Исследованы методы учета местных магнитных аномалий и вариаций переменного магнитного поля Земли для повышения точности проводки скважин. Исследование может быть полезным для специалистов маркшейдерских служб нефтегазовых компаний в вопросах обеспечения наклонно-направленного бурения геомагнитными данными.

Ключевые слова: исследование траектории скважин, проводка скважин, магнитное поле Земли, геомагнитные модели, наклонно-направленное бурение, параметры магнитного поля, IFR, IIFR

Для цитирования: Бухтояров БН, Старикова ОР, Петров ВГ, Кудин ДВ, Виноградова АА. Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 71-82. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-71-82>.

GEOMAGNETIC DATA FOR DIRECTIONAL DRILLING AND WELL POSITIONING

B. N. Bukhtoyarov^{1✉}, O. R. Starikova¹, V. G. Petrov²,
D. V. Kudin³, A. A. Vinogradova⁴

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

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of
Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russian Federation

³Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC RAS), Moscow, Russian Federation

⁴St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z9851275712@gmail.com

Abstract: The article covers the issues of using the Earth's magnetic field models and their parameters in directional drilling. Examples of geomagnetic models that can be used in directional drilling for drilling wells and determining their trajectories are shown. Domestic high-resolution models are considered, their main characteristics are given. Methods for accounting for local magnetic anomalies and variations in the Earth's variable magnetic field to improve the accuracy of well drilling are studied. The study can be useful for specialists of mine surveying services of oil and gas companies in matters of providing directional drilling with geomagnetic data.

Keywords: Well trajectory surveying, well wiring, Earth's magnetic field, geomagnetic models, directional drilling, magnetic field parameters, IFR, IIFR

For citation: Bukhtoyarov BN, Starikova OR, Petrov VG, Kudin DV, Vinogradova AA. Geomagnetic data for directional drilling and well positioning. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):71-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-71-82>.

Введение

До появления забойных телесистем (MWD) буровые работы приходилось останавливать для проведения измерений траектории скважины. В связи с высокой стоимостью бурения, особенно на шельфе, индустрия всегда стремилась минимизировать время, затрачиваемое на проведение исследований. Это привело к разработке приборов скважинной телеметрии, являющихся частью буровой компоновки и передающих данные на поверхность в процессе бурения при наращивании буровой колонны. Забойные телесистемы на основе магнитометров были включены в состав компоновки низа буровой колонны (КНБК), и по их измерениям стали вычисляться направление наклонно-направленных или горизонтальных скважин и положение забоя во время бурения.

Вскоре после этого в системах MWD стали использоваться гироскопические приборы, но необходимый компромисс между точностью и надежностью в сложных условиях бурения ограничил их применение относительно небольшими углами наклона. Только в последние годы удалось преодолеть технические ограничения для приборов MWD на основе гироскопов. Хотя гироскопы обладают рядом преимуществ по сравнению с приборами на основе магнитометров, их высокая стоимость и меньшая прочность позволяют приборам MWD на основе магнитометров по-прежнему оставаться наиболее распространенным методом исследования. Таким образом, направленная съемка по-прежнему во многом зависит от знания магнитного поля Земли.

Телесистема MWD включает в свой состав два набора датчиков: три магнитометра и три акселерометра, эти датчики служат для определения положения инструмента относительно магнитного и гравитационного полей Земли. Зная направление силовых линий этих полей, можно рассчитать наклон и направление бурового инструмента. Последовательное выполнение измерений MWD в процессе бурения позволяет определить траекторию скважины в пространстве.

Референсные параметры физических полей получают из соответствующих моделей – магнитных и гравитационных. Гравитационное поле достаточно хорошо изучено, статично и не вызывает существенных погрешностей в замерах MWD. Магнитное поле, напротив, – непостоянно, подвержено воздействию множества факторов и является одним из основных источников латеральной неопределенности положения скважин. Низкая точность траектории не позволяет достичь геологических целей бурения и, соответственно, проектных показателей добычи углеводородов, ведет к росту рисков промышленной безопасности, связанных с пересечением скважин, а также к снижению качества модельных построений.

В настоящее время увеличивается степень вовлеченности маркшейдерских служб нефтегазовых компаний в процессы управления траекториями направленных скважин, определения их пространственного положения и оценки их неопределенности.

Цель исследования

Помощь специалистам маркшейдерских служб нефтегазовых компаний в ориентировании в вопросах обеспечения бурения направленных скважин геомагнитными данными.

Материал и методы исследования

В целях исследования проведен анализ российских и зарубежных источников, документов Сообщества инженеров-нефтяников (SPE). Выделены основные темы, необходимые для понимания аспектов обеспечения геомагнитными данными процессов наклонно-направленного бурения. Освещены основы земного магнетизма: источники магнитного поля Земли, его параметры, проведен анализ используемых в ННБ геомагнитных моделей, в том числе созданных российскими научными организациями. Проанализированы методы создания локальных моделей магнитного поля, учитывающих местные магнитные аномалии и методы компенсации временных магнитных возмущений. Отдельно проведен анализ влияния геомагнитных возмущений на ННБ в высоких широтах.

Результаты исследований

Магнитное поле Земли и его состав

Геомагнитное поле распространяется от внешнего жидкого ядра до границы магнитосферы Земли (магнитопаузы). На расстоянии нескольких радиусов Земли геомагнитное поле определяется как дипольное, то есть как поле вокруг магнита, имеющего положительный и отрицательный полюса, поле наклонено относительно оси вращения Земли [1–3].

Вся совокупность современных данных о магнитном поле, полученных по измерениям магнитного поля на поверхности Земли и в околоземном пространстве, позволяет разделить геомагнитное поле на три основные части:

1. Главное поле и его вековые вариации, имеющие источники внутри Земли.
2. Аномальное поле, обусловленное совокупностью источников в тонком верхнем слое Земли.
3. Внешнее поле, связанное с внешними источниками: токовыми системами в околоземном пространстве.

Магнитное поле можно определить полным вектором B магнитной индукции, выраженным как векторная сумма вкладов от трех основных источников:

$$B = B_m + B_c + B_d,$$

где B_m – главное поле, генерируемое ядром Земли; B_c – поле земной коры; B_d – совокупное поле возмущения, вызванное электрическими токами в ионосфере и магнитосфере.

Главное, или нормальное, поле и его вековые вариации. Общеизвестной является теория образования основной части геомагнитного поля в недрах Земли, согласно которой жидкое внешнее ядро поддерживает электрический ток, благодаря динамо-эффекту. Медленное изменение основного поля (значений элементов магнитного поля) с течением времени называется вековым ходом или вековой вариацией.

Поле аномалий земной коры связано с намагниченностью земной коры по всей ее толщине приблизительно до 40 км. Эта часть спектра геомагнитного поля приурочена к интрузиям и более близкому к поверхности залеганию коренных пород. В областях с доминированием осадочных пород аномальное поле менее заметно. Аномалии могут вносить существенные искажения в направление и значение модуля индукции главного магнитного поля и таким образом создавать систематические ошибки в замерах MWD при бурении скважин.

Внешнее поле. Солнце излучает плазму, которая распространяется по Солнечной системе в виде солнечного ветра. Достигая магнитосферы Земли, солнечный ветер взаимодействует с геомагнитным полем, создавая электрические токи в околоземном пространстве и соответствующие «зеркальные токи», индуцированные в Земле и океанах. Изменения потока солнечного ветра приводят к флуктуациям этих токов, которые в конечном итоге создают поле возмущений, искажающих главное магнитное поле.

Вклад главного поля в геомагнитное поле на поверхности Земли составляет ~95 %, аномального поля ~4 %, внешнего поля ~1 %.

В таблице 1 приведены характеристики основных источников магнитного поля Земли.

Таблица 1 / Table 1
Основные источники магнитного поля /
Main sources of magnetic field

Источник магнитного поля	Амплитуда, нТл	Период изменения	Описание
<i>Внутренние (главное и аномальное поле)</i>			
Ядро	50 000	Годы	Модели главного поля
Литосфера	100–1 000	Века	Карты аномального поля, модели высокого разрешения
<i>Внешние (поле внешних возмущений)</i>			
Внешние возмущения (высокоширотные эффекты)	>1 000	Часы и дни	-
Внешние возмущения (среднеширотные эффекты)	10–200	Часы и дни	Модели ионосферного поля

Элементы земного магнетизма

Магнитное поле Земли в каждой точке пространства выражается вектором магнитной индукции, который имеет направление и силовую характеристику. Этот вектор может быть описан несколькими способами (рис. 1).

В сферических координатах, используемых в бурении, он определяется элементами D , I и B , где:

D – *склонение*, угол между магнитным и истинным севером, измеренный в горизонтальной плоскости, измеряется в градусах. Склонение положительно, когда магнитный север находится восточнее истинного севера, и отрицательно, когда западнее;

I – *наклонение*, угол между направлением местного магнитного поля и горизонтальной плоскостью, измеряется в градусах. К северу от магнитного экватора наклонение положительно, а к югу – отрицательно.

Склонение и наклонение задают направление вектора индукции.

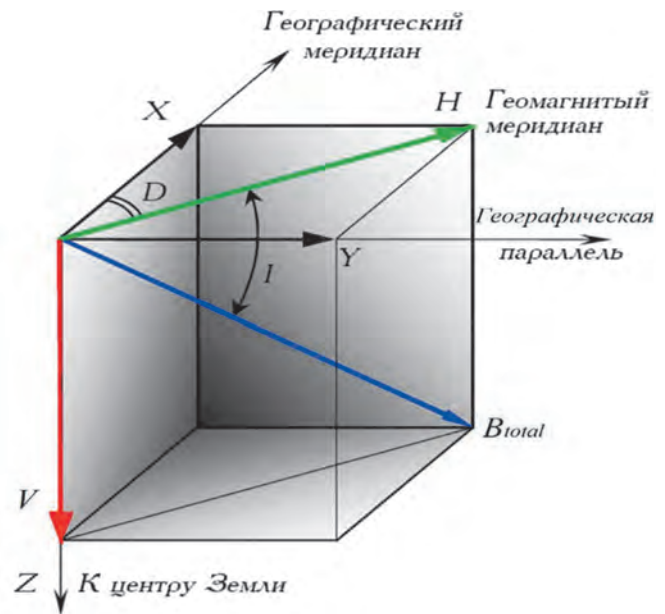


Рис. 1. Компоненты магнитного поля Земли /
Fig. 1. Components of the Earth's magnetic field

B (иногда обозначают как F) – модуль магнитной индукции (ранее использовался термин «напряженность поля»), является силовой характеристикой геомагнитного поля, единица измерения – нТл.

В научных целях для разложения вектора магнитной индукции на составляющие применяют прямоугольную систему координат, в которой ось X ориентирована по направлению географического меридиана, Y – по направлению параллели, а ось Z – направлена вниз.

Если поместить начало координат в точку наблюдения, то проекция вектора магнитной индукции на ось X будет называться северной составляющей (компонентой), проекция на ось Y – восточной составляющей и проекция на ось Z – вертикальной составляющей.

В некоторых случаях используется цилиндрическая система координат, в которой полный модуль магнитной индукции раскладывают на элементы H , Z и D . Проекцию вектора магнитной индукции на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей H , проекцию на вертикальную плоскость – вертикальной составляющей Z , и D – склонение, определяющее направление вектора в горизонтальной плоскости.

Приведенные ниже уравнения описывают взаимосвязь между элементами, используемыми в различных системах координат:

$$\begin{aligned} X &= H \cdot \cos D; \quad Y = H \cdot \sin D; \quad Z = H \cdot \tan I; \\ H &= \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \\ D &= \arctg \frac{Y}{X}, \quad I = \arctg \frac{Z}{H}. \end{aligned}$$

Сферический гармонический анализ

Наблюдения геомагнитного поля показали его зависимость от местоположения и времени. Для описания свойств магнитного поля Земли на основе измерений используется сферический гармонический анализ (СГА).

Первая попытка представления зависимости элементов магнетизма от координат точки была сделана в 1835 году в работе профессора Казанского университета И. Симонова

[4], при этом магнитное поле Земли предполагалось полем однородно намагниченного шара.

Следующим шагом в аналитическом представлении геомагнитного поля явилась теория К. Гаусса, предложенная в 1838 году [5]. Эта теория позволяет вычислять элементы земного магнетизма в любой точке поверхности и вне ее без объяснения физических причин возникновения самого поля при условии наличия данных о потенциале поля в отдельных его точках. Разложение магнитного потенциала в ряд сферических функций называется сферическим гармоническим анализом (СГА).

СГА является основным методом описания магнитного поля Земли, поэтому модели магнитного поля, как правило, представляют собой набор гармонических и весовых коэффициентов, которые определяются по координатам точки измерения и номеру гармоники. От количества исходных данных и охвата ими области распределения поля зависят достижимая степень гармонического разложения и точность моделирования [6–7].

Гармонические коэффициенты вычисляются из условия минимизации разности измеренных значений поля на сети измерений и значений, вычисленных по модели с этими коэффициентами, по методу наименьших квадратов.

Пространственное разрешение модели определяется количеством (порядком N) гармоник, например, при $N = 13$ требуется 195 коэффициентов и обеспечивается разрешение $\sim 3\,000$ км, при $N = 15$ требуется 255 коэффициентов и обеспечивается разрешение 2 600 км, при $N = 780 - 609\,960$ коэффициентов и 51 км, при $N = 1\,400 - 1\,962\,800$ коэффициентов и 28 км соответственно. Очевидно, что при увеличении N быстро возрастает число неизвестных (гармонических коэффициентов), что приводит к вычислительной трудности их определения.

На рисунке 2 представлен вклад сферических гармоник разной степени для моделей магнитного поля Земли.

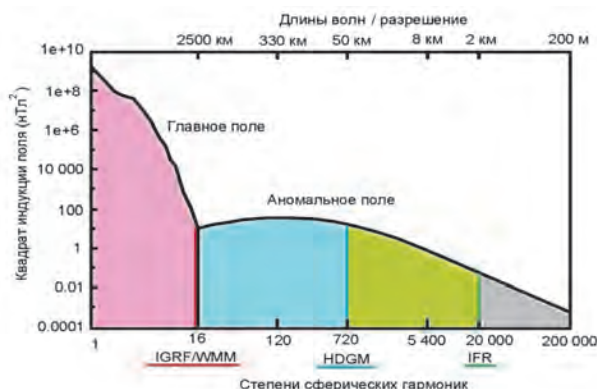


Рис. 2. Вклад сферических гармоник разной степени для моделей магнитного поля Земли /

Fig. 2. Contribution of spherical harmonics of different degrees for models of the Earth's magnetic field

Значимость теории Гаусса в настоящее время значительно возросла: измерения магнитного поля Земли ведутся из космоса, накоплен значительный массив данных приземных съемок (наземных, аэро- и гидромагнитных), появились компьютерные мощности для обработки больших объемов данных.

Модели магнитного поля

Существует множество математических моделей магнитного поля Земли: глобальных, региональных, локальных. Об-

щим для них является то, что они позволяют выполнить расчет значений элементов земного магнетизма с учетом координат и времени. При этом одни модели могут учитывать все три источника магнитного поля, другие – только главное поле [8].

Поле ядра Земли, длинноволновое, медленно меняющееся во времени поле, представлено глобальными спутниковыми моделями, такими как Международное эталонное геомагнитное поле IGRF (до 13-й степени гармоник) и Мировая магнитная модель WMM (до 15-й степени гармоник).

Модель магнитного поля CHAOS охватывает статичное поле ядра (сферические гармоники ≤ 15), свёрхкрупномасштабное поле земной коры (до сферических гармоник ~ 25), а также временные вариации векового хода (для сферических гармоник ≤ 20).

Литосферное магнитное поле в диапазоне самых длинных волн представлено сферическими гармоническими моделями, такими как WMMHR (данные спутниковой миссии CHAMP) и LCS-1 (данные миссий CHAMP и SWARM). Эти длинноволновые литосферные модели охватывают сферические гармоники до степеней 133 и 166 соответственно (разрешение ~ 300 и ~ 240 км).

Коммерческие модели HDGM и BGGM, исследовательская модель EMM, модели EMM-ИЗМИРАН и ГЦ РАН являются гибридными, они объединяют в себе спутниковые данные и данные приземных съемок. Длины волн короче 300 км в этих моделях получены путем сферического гармонического представления длинных волн глобальных моделей аномального поля, таких как EMAG2 или WDMAM, в итоге эти модели имеют степени гармонического разложения от 720 до 1 440 и пространственное разрешение $\sim 50-28$ км.

Глобальные модели аномального поля EMAG2 и WDMAM созданы с использованием данных приземных съемок и имеют пространственное разрешение ~ 4 км. Чтобы исключить в этих моделях временную зависимость (вековой ход), в них из реальных значений модуля магнитного поля вычитается модуль главного поля, описываемый первыми 15 гармониками. В таблице 2 представлены пространственные разрешения моделей магнитного поля Земли.

Таблица 2 / Table 2

Пространственное разрешение моделей магнитного поля Земли / Spatial resolution of the Earth's magnetic field models

Разрешение магнитных моделей по сферическим гармоникам и расстоянию (на экваторе)										
Глобальная модель или сетка	Масштабный диапазон моделей: светло-серый = спутниковые данные темно-серый = приземные данные					Сферическая гармоника	Пространственное разрешение			
						Степень	Километры	Градусы	Минуты	
WMM IGRF						ядро	2	16012.1	180,00	10800.0
							8	4709.4	45,00	2700.0
							12	3202.4	30,00	1800.0
							13	2965.2	27.69	1661.5
CHAOS						литосфера	15	2582.6	24,00	1440.0
							20	1952.7	18,00	1080.0
							50	792.7	7.20	432.0
							100	398.3	3.60	216.0
WMMHR LCS-1						федерация	133	299.9	2.71	162.4
							166	240.4	2.17	130.1
							300	133.2	1.20	72.0
							500	80.0	0.72	43.2
HDGM, EMM, ИЗМИРАН ГЦРАН BGGM						различные	750	53.3	0.48	28.8
							790	50.6	0.46	27.3
							1050	38.1	0.34	20.5
							1440	27.8	0.25	15.0
							2000	20.0	0.18	10.8
							3000	13.3	0.12	7.2
							4000	10.0	0.09	5.4
							5000	8.0	0.07	4.3
WDMAM, EMAG2*							7000	5.7	0.05	3.1
							10000	4.0	0.04	2.2

* не являются моделями сферических гармоник

Геомагнитные модели, используемые в наклонно-направленном бурении

При инклинометрии скважин глобальные геомагнитные модели используются для расчета опорных (референсных) значений компонент магнитного поля: D , I , B . Склонение D используется для пересчета азимута из магнитного в истинный, наклонение I и полный модуль индукции магнитного поля B используются как опорные значения для проверки качества измерений и как входные данные для алгоритмов коррекции измерений.

По классификации Руководящего комитета по точности позиционирования стволов скважин (ISCWSA SPE) используемые при наклонно-направленном бурении геомагнитные модели подразделяются на пять основных категорий [9]:

- низкого разрешения (IGRF, WMM) – главное поле, обновление реже чем 1 раз в год;
- стандартного разрешения (WMMHR, BGGM после 2019 г.) – главное поле + крупномасштабные аномалии, обновление ежегодно;
- высокого разрешения (HDGM, BGGM) – главное поле + глобальное поле аномалий высокого разрешения, обновление ежегодно;
- IFR1 (In-Field Referencing – 1) – главное поле + локальные аномалии, обновление ежегодно;
- IFR2 (In-Field Referencing – 2) – IFR1 + real-time коррекция внешнего поля, обновление 1 раз в минуту или чаще.

В таблице 3 приведены допустимые погрешности моделей магнитного поля Земли (МПЗ) для модели ошибок ISCWSA [6, 10, 11].

Таблица 3 / Table 3

Допустимые погрешности моделей магнитного поля Земли для модели ошибок ISCWSA / Acceptable errors of the EMF models for the ISCWSA error model

Модель	Погрешность модуля поля B , нТ	Погрешность магнитного наклонения I	Погрешность магнитного склонения постоянная D , °	Погрешность магнитного склонения, зависящая от горизонтальной составляющей вектора индукции, ° • нТ
HDGM	107	0,16	0,30	4 118
Standard	130	0,20	0,36	5 000
IGRF/WMM	157	0,24	0,43	6 029
IFR1	50	0,1	0,15	1 500
IFR2	45	0,08	0,15	1 250

Модель IGRF

Это самая известная и общедоступная глобальная модель магнитного поля Земли, зачастую используемая российскими нефтесервисными компаниями и операторами. IGRF является результатом международного сотрудничества экспертов в области моделирования магнитного поля и различных институтов, ведущих сбор и обработку геомагнитных данных со спутников и наземных станций по всему миру. IGRF создана и обновляется для того, чтобы предоставить пользователям удобный доступ к модели геомагнитного поля для областей, близких к поверхности Земли.

IGRF описывает только главное поле и не учитывает аномалии, вызванные намагниченностью земной коры, также в ней не учитываются системы электрических токов в маг-

нитосфере и ионосфере. Модель IGRF обновляется каждые пять лет и имеет степень сферического разложения до степени $N = 13$. На сайте ИЗМИРАН (<http://serv.izmiran.ru/webff/igrf-13gm.html>) в настоящее время доступен расчет элементов земного магнетизма по модели IGRF-14 на период 1935–2030 годов.

Модели WMM / WMMHR

Всемирная магнитная модель WMM (низкого разрешения) разработана совместно Национальным центром экологической информации США (NCEI) и Британской геологической службой (BGS), обновляется каждые пять лет и имеет степень сферического разложения до степени $N = 12$, разрешение $>3\,000$ км.

Модель WMMHR по классификации ISCWSA относится к моделям стандартного разрешения, является усовершенствованной версией модели WMM и обеспечивает более детальное и точное описание геомагнитного поля. Она включает коэффициенты главного поля и вековых вариаций степеней $N = 1–15$, а также поля земной коры $N = 16–133$, имеет пространственное разрешение ~ 300 км. Модель разработана и поддерживается Национальным центром экологической информации США. Доступ к этим моделям свободный (www.ncei.noaa.gov).

Зарубежные коммерческие модели магнитного поля Земли высокого разрешения

Зарубежные компании чаще используют модели высокого разрешения:

- BGGM – поддерживается Британской геологической службой (BGS);
- HDGM – разработана и поддерживается Национальным центром экологической информации США (NCEI).

Эти модели обновляются ежегодно, учитывают главное магнитное поле, глобальное поле аномалий и модель среднего внешнего поля возмущений.

Обе модели в РФ в настоящее время официально недоступны.

Российские модели высокого разрешения

В настоящее время различными российскими научными организациями разработан ряд моделей МПЗ, которые отвечают требованиям классификации ISCWSA, предъявляемым к моделям высокого разрешения. Данные этих моделей могут быть предоставлены заказчику на договорной основе, форматы предоставления информации по элементам МПЗ обсуждаются в каждом случае индивидуально.

Модель CAMPUS – ГЦ РАН (Москва)

Серия моделей магнитного поля Земли CAMPUS ГЦ РАН включает в себя модели главного (CAMPUS-C) и литосферного, или аномального, поля (CAMPUS-A). Модель главного поля строится по спутниковым и обсерваторским данным до 15-й гармоники, а модель аномального поля – с 16-й до 1 050-й гармоники. В основе модели главного поля лежит модель-кандидат IGRF-14 [12], которая была подготовлена командой Геофизического центра РАН в 2024 году. Модель-кандидат ГЦ РАН прошла все этапы верификации рабочей группы по подготовке модели IGRF (рис. 3) и была использована при расчете коэффициентов модели на 2025–2030 годы.

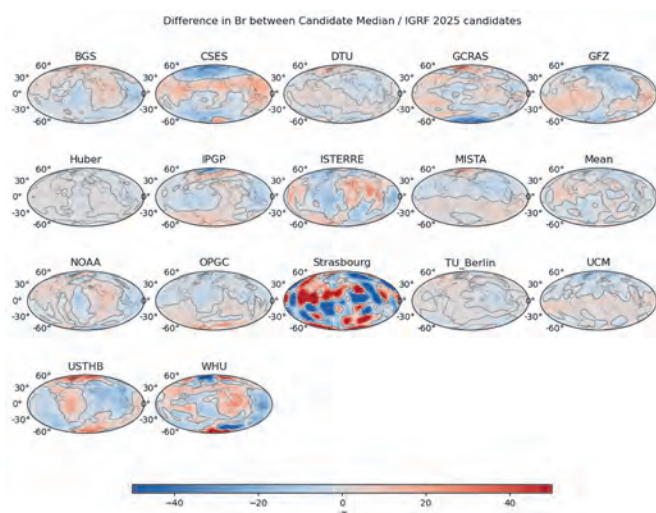


Рис. 3. Разность медианной модели с каждой моделью-кандидатом IGRF-14 /

Fig. 3. Difference of the median model with each IGRF-14 candidate model

Наиболее полная модель общего поля CAMPUS-CA построена 1 апреля 2025 года по данным спутниковых миссий за 2024–2025 годы. CAMPUS-CA аналогична гибридным моделям высокого разрешения HDGM и BGGM, включает в себя модель главного поля и глобальное аномальное поле, степень сферического разложения модели – 1 050, пространственное разрешение ~38 км. Для модели CAMPUS-CA совместно с АО «ИГиРГИ» была выполнена верификация на территории Западно-Сибирской платформы по специально разработанной методике, включающей площадные аэромагнитные съемки и наземные абсолютные наблюдения в нескольких точках на поверхности. Ведутся работы по приведению погрешностей модели в соответствие с моделью ошибок ISCWSA rev. 5 [11].

Доступные форматы предоставления данных:

- 1) отдельное программное обеспечение;
- 2) в виде динамических библиотек, встраиваемых в другое ПО;
- 3) внешний облачный сервис.

Модели ИЗМИРАН (Москва)

ИЗМИРАН – одна из старейших научных организаций РФ, ведущих работы в области земного магнетизма. Модели магнитного поля Земли, основанные на спутниковых данных и данных приземных съемок, институт разрабатывает с 1980-х годов.

В настоящее время построены следующие модели:

– ИЗМ2025 [13, 14] – построена по данным спутников SWARM за 2023–2024 годы на 1 января 2025 года. Модель включает до 15 гармоник (а не 13, как IGRF). Коэффициенты векового хода также вычислялись до 15-й гармоники для возможности объединения указанной модели с моделью EMAG2. Для повышения точности в северных районах модель включает высокоширотные данные, обычно исключаемые при построении моделей. Анализ точности модели ИЗМ2025 показал высокую степень сходимости с моделью IGRF-14;

– ЕММ-ИЗМИРАН – модель высокого разрешения, в которой первые 15 гармоник взяты из модели ИЗМ2025, а с 16-й по 790-ю – из модели ЕММ2017, пространственное разрешение – 50 км;

– ЕМAG2-ИЗМИРАН – модели с более высоким разрешением, строятся с использованием сетки глобальных аномалий EMAG-2 в виде таблиц значений магнитного склонения по заданной сетке для конкретного участка заказчика. Разрешение моделей ЕМAG2-ИЗМИРАН соответствует исходным данным и составляет ~4 км. Аномальное магнитное поле не является гармонической функцией, и при построении таких моделей производится преобразование модуля магнитного поля в компоненты, обычно сначала приближенно в Z-компоненту, затем последовательно уточняются X-, Y- и Z-компоненты. При расчетах необходимо использовать глобальные модели.

В ИЗМИРАН также разработаны методики, основанные на гармонических моделях, методе эквивалентного магнитного источника, а также на основе нейросетей, позволяющие выполнять расчеты карт X-, Y- и Z-компонент, склонения, наклонения и полного модуля индукции магнитного поля Земли с разрешением до 5 км, в том числе глубинных моделей уровня IFR1, используемых в наклонно-направленном бурении [15–17]. Предусмотрено предоставление данных в виде прикладного программного обеспечения.

В Санкт-Петербургском филиале ИЗМИРАН (СПбФ ИЗМИРАН) разработана методика расчетов компонент вектора индукции постоянного магнитного поля, вычисляемых по модульной информации, создана пополняемая база магнитометрических векторных данных всего земного шара, включающая в себя как материалы модульных и векторных съемок, так и расчетные значения компонент, вычисленных по измерениям модуля магнитного поля вблизи поверхности Земли. На ее основе в секторе магнитной картографии СПбФ ИЗМИРАН создана глобальная трехмерная векторная обновляемая модель МПЗ и реализована концепция расчета глобальной трехмерной модели угловых и прямоугольных компонент вектора индукции МПЗ. Модель не является гармонической. Расчет точности проводился в том числе путем сопоставления расчетных данных модели с данными наблюдений в мировой сети магнитометрических обсерваторий.

В таблице 4 приведены среднестатистические оценки расхождений между расчетными и измеренными значениями компонент МПЗ на Мировой сети геомагнитных обсерваторий по всему земному шару, колонки 4 и 5 рассчитаны с доверительной вероятностью 95 % [18].

Таблица 4 / Table 4

Оценка точности модели Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук / Assessment of the accuracy of the IZMIRAN SPbF model

Компонента МПЗ	Число обсерваторий (N)	Среднее значение расхождений	Доверительный интервал	Среднестатистическое значение расхождений расчетных данных	СКО расчетных данных и данных наблюдений
F	315	31 нТл	±14 нТл	31 ± 14 нТл	131 нТл
Z	279	9 нТл	±13 нТл	9 ± 13 нТл	110 нТл
H	299	11 нТл	±11 нТл	11 ± 11 нТл	100 нТл
D	267	0.01°	±0.02°	0.01 ± 0.02°	0.2°
I	310	0.01°	±0.02°	0.01 ± 0.02°	0.2°

В СПбФ ИЗМИРАН также накоплен опыт создания локальных глубинных моделей магнитного поля Земли на основе глобальной компонентной модели МПЗ, полевые данные подтверждают соответствие внедренных локальных моделей СПбФ ИЗМИРАН моделям IFR1 по классификации ISCWSA.

Локальные магнитные модели

Инструменты MWD являются проверенным и надежным средством точного позиционирования скважин при условии учета и минимизации двух источников ошибок:

- 1) ошибки привязки по склонению;
- 2) помехи, вызванные намагниченными элементами КНБК.

Ошибку склонения можно значительно снизить, уточнив местные геомагнитные параметры. Магнитное влияние КНБК устраняется аналитическими методами – «короткого НУБТ» (SCC) и многостанционного анализа (MSA). При этом эффективность SCC и MSA напрямую зависит от точности используемых геомагнитных параметров: полного модуля индукции и наклонения магнитного поля.

Повышение их точности достигается путем создания локальных геомагнитных моделей, по классификации ISCWSA – IFR1 (In-Field Referencing). Такие локальные модели учитывают влияние намагниченности горных пород на конкретном участке недр и предоставляют уточненные значения параметров магнитного поля для наклонно-направленного бурения. Минимальная точность таких моделей составляет: $0,15^\circ$ – для склонения; $0,1^\circ$ – для наклонения и 50 нТ – для полного модуля индукции магнитного поля. Использование IFR-моделей может приблизить точность позиционирования скважин к гироскопической без затраты времени и средств на дополнительные исследования, а также сократить/исключить случаи незапланированных срезок стволов скважин и перебуривания забракованных участков [19–20].

При этом в каждом конкретном случае создание IFR-модели должно быть обосновано, поскольку это всегда существенные финансовые затраты для нефтегазового проекта.

Создание такой модели может быть целесообразно в следующих случаях:

- наличие на участке аномалий, не учтенных в глобальных моделях, при которых замеры MWD систематически не укладываются в установленные критерии надежности измерений по B_{total} и Dip;
- небольшие размеры геологических целей (расчетный эллипсоид неопределенности (EQU) превышает размеры геологической цели) и (или) сложные горно-геологические условия (разломы и т. д.), требующие высокой точности проводки скважин;
- плотная сетка скважин на новом участке, бурение на шельфе с платформы или искусственного острова, уплотняющее бурение на действующем месторождении, когда критическое сближение эллипсоидов неопределенности, рассчитанных по глобальным моделям, не позволяет разместить скважины нужной протяженности там, где они необходимы, из-за риска их пересечения.

Зависимость неопределенности скважины от класса используемой модели приведена в таблице 5.

В случаях, когда экономически нецелесообразно создание IFR-модели (небольшой объем бурения), но требуется более точное позиционирование скважин, можно рассмотреть использование гироскопических измерений или точеч-

ные измерения параметров МПЗ в районе буровой площадки перед началом работ.

Таблица 5 / Table 5

Зависимость неопределенности скважины от класса используемой модели [21] /

Dependence of well uncertainty on the class of the model used [21]

Tool Code*	Опорная модель	Коррекция измерений	~EQU**
MWD + IGRF	IGRF или WMM	-	+10 %
MWD	BGGM или MVSD	-	Стандартный
MWD + HD	HDGM или BGGM	-	-10 %
MWD + IFR1	In-Field Referencing (IFR1)	-	-30 %
MWD + IFR1 + MSA	In-Field Referencing (IFR1)	MSA	-50 %

*Код ошибки для расчета позиционной неопределенности скважины.

**Приблизительные размеры эллипсоида неопределенности, фактические размеры зависят от географического местоположения и ориентации ствола скважины.

При создании IFR-моделей вычисляются аномалии параметров магнитного поля, создаваемого локальными источниками (намагниченными горными породами) внутри геомагнитного куба на основе известных параметров изучаемого объекта и свойств среды [22–23]. Для этого используют данные локальных приземных (наземных, аэро-, гидромагнитных) съемок. Дополнительное использование спутниковых данных и данных съемок на разных высотах позволяет охватить более широкий спектр магнитного поля и учесть большее число его источников и тем самым повысить точность модели.

Поскольку аномальное поле, в отличие от главного, изменяется во времени очень медленно, в качестве исходных данных могут использоваться данные магнитометрических съемок, выполненных на стадии поисково-оценочных и разведочных работ, что может существенно сократить расходы на создание IFR-модели. Для учета намагниченности горных пород и инверсии параметров магнитного поля на глубину необходим учет данных о геологическом строении земной коры.

При создании IFR-моделей могут использоваться следующие методы:

- нисходящего продолжения при помощи быстрых преобразований Фурье (FFT) – один из ранних методов, имеет ряд недостатков, нестабилен с увеличением глубины;
- эквивалентного источника;
- эллипсоидальных гармонических функций высоких степеней (метод запатентован Magnetic Variation Service LLC). Модель строится на основе комбинирования данных спутниковых и приземных съемок для более полного учета спектра поля земной коры. Если поле известно для большой территории, то решение дифференциального уравнения Лапласа для этой области позволяет выполнить разложение полного вектора геомагнитного поля на компоненты. Для решения уравнения Лапласа вектор магнитного поля сначала представляется как отрицательный градиент скалярного магнитного потенциала (уравнение Максвелла).

Метод эквивалентного источника включает в себя следующие этапы обработки:

Продолжение вниз аномалии полного вектора индукции

с высоты наблюдения до постоянной глубины при предположении, что нет магнитных источников выше самого глубокого уровня модели и величина аномалии гораздо меньше, чем величина общего магнитного поля Земли.

Вычисление X -, Y -, Z -компонент векторного поля из скалярной аномалии полной индукции.

Расчет локальных аномалий склонения и наклонения относительно направления главного магнитного поля из-за магнитной аномалии коры.

Для учета изменений главного поля и аномалий векового хода целесообразны создание и периодические наблюдения пунктов векового хода в районе работ.

После создания IFR-модели необходимо выполнить контрольную инструментальную съемку компонент МПЗ на площади ее действия и провести сравнение полученных параметров с предсказаниями модели.

Фактические параметры магнитного поля B и I также вычисляются в процессе взятия замеров MWD и должны использоваться для оценки корректности созданной IFR-модели после накопления представительной выборки и «очистки» замеров от магнитного влияния КНБК. Для визуализации может использоваться таблица (график) с границами приемки замеров по критериям контроля качества и распределением замеров относительно референсов модели.

Другой способ проверки корректности работы модели IFR – сравнение траекторий скважин, рассчитанных с помощью локальной модели, с траекториями тех же скважин, определенных с помощью гироскопа (при наличии достаточного количества таких измерений).

На сегодняшний день в Российской Федерации есть примеры успешного внедрения IFR-моделей для нефтегазового сектора, одна из них внедрена в 2022 году на полуострове Ямал ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск).

Учет влияния внешнего поля

Солнце является источником межпланетного магнитного поля, которое переносится потоком заряженных частиц – солнечным ветром. При достижении им магнитного поля Земли образуется ударная волна, сжимающая магнитное поле со стороны Солнца и растягивающая его с противоположной стороны. В результате магнитосфера становится асимметричной: со стороны Солнца магнитное поле простирается только на 10–13 радиусов Земли, с противоположной – образуется так называемый хвост магнитосферы, который вытянут до 1000 земных радиусов. При взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли возникают электрические токи, которые подвергаются флуктуации при изменении солнечного ветра и в итоге создают поле возмущений.

Из многочисленных исследований геомагнитных возмущений известны их характерные признаки, в первую очередь интенсивность, продолжительность протекания и пространственное распределение [24]. Установлено, что геомагнитные возмущения на поверхности Земли есть сумма эффектов различных источников, представляющих собой сложные системы токов, текущих в ионосфере и магнитосфере Земли. Структура и динамика токовых систем геомагнитных возмущений все еще недостаточно изучены, но некоторые их параметры достаточно твердо установлены.

На сегодня можно принять, что переменное магнитное поле состоит из следующих частей:

$$S + L + DP + DR + DCF + DT,$$

где S – регулярная часть поля, возникающая из-за волнового излучения Солнца, – токовая система, развивающаяся на освещенной стороне Земли на высоте слоя E ионосферы;

L – регулярная часть поля, возникающая из-за лунных приливов в верхней атмосфере, статистически выделяется методом наложения эпох по возможно большему периоду наблюдений, также приурочена к слою E ионосферы;

DP – нерегулярная часть поля, возникающая из-за корпускулярного излучения Солнца, токи развиваются в виде электроструй в зоне полярных сияний на высотах слоя E ионосферы;

DR – поле кольцевого тока, существенно усиливающегося в период магнитных бурь планетарного масштаба, токи развиваются во внешней части радиационных поясов Земли;

DCF – нерегулярная часть поля, возникающая из-за токов на поверхности магнитосферы при обтекании ее солнечным ветром.

Специалисты отрасли с 1990-х годов исследуют возможности учета изменений магнитного поля в пространстве и времени для повышения точности траекторий скважин. Одним из решений было наблюдение магнитного поля в нескольких точках в районе месторождения на протяжении определенного периода для установления базовых различий между магнитометром на месте установки и одной или несколькими стационарными обсерваториями, которые могут находиться на расстоянии нескольких сотен километров от места бурения. Данный подход получил название IFR (Interpolated In-Field Referencing или IFR2) и позволил существенно повысить точность проводки скважин [20].

Развитием метода интерполяции магнитного поля является учет изменений магнитного поля в реальном времени в процессе бурения. Такие интерполированные поправки в замеры MWD могут предоставлять обсерватории или вариационные станции, оснащенные оборудованием для определения компонент МПЗ и соответствующей сетевой инфраструктурой [25]. Метод эффективен, если буровая находится между двумя обсерваториями, расстояние до которых не превышает 300 км.

Качество компенсации ошибок возмущения магнитного поля в IFR зависит от четырех факторов:

1. Широты используемой обсерватории и буровой площадки.
2. Удаленности буровой площадки / вариационной станции от обсерватории.
3. Количества обсерваторий, используемых для интерполяции.
4. Качества данных обсерваторий или вариационных станций.

Метод функции возмущения (DF) является дальнейшим развитием метода IFR и устраняет некоторые его недостатки [26], используя более сложные алгоритмы обработки данных.

Авроральные электроджеты и их влияние на замеры MWD

Важной особенностью магнитосферы являются суббури, создающие значительные геомагнитные возмущения на авроральных широтах. Авроральной зоной называют широты, на которых наблюдается северное сияние. Они приурочены к области ~ с 65° по 75° геомагнитной широты вокруг се-

верного и южного полюсов, в которой электрическое поле магнитосферы проникает вдоль магнитных силовых линий в ионосферу.

В определенных условиях, когда в хвосте магнитосферы на ночной стороне накапливается много частиц солнечного ветра, ток в хвосте магнитосферы «замыкается» в ионосфере продольными токами. Внутри овала полярных сияний в полуночном секторе ионосферы формируется токовый канал, текущий с востока на запад, так называемый суббуревой электроджет (или авроральная электроструя), который и создает самые сильные вариации магнитного поля [27–28].

На рисунке 4 представлены результаты синхронных измерений магнитного склонения на разных широтах в обсерваториях Норвегии 13 июля 2025 года. Справа приведены трехбуквенные коды обсерваторий и значения их широты. На диаграмме отчетливо видна область возмущений магнитного поля в диапазоне широт, соответствующих авроральному овалу, характер возмущения типичен для суббуревой электроджета.

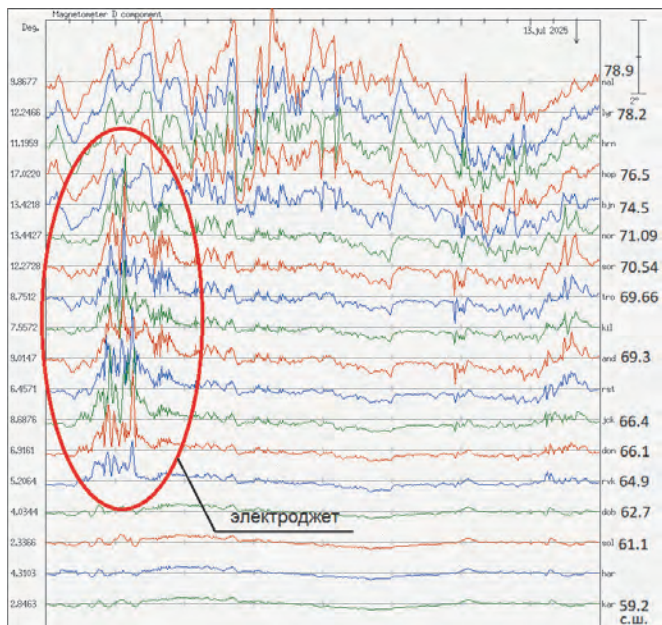


Рис. 4. Сводная диаграмма синхронных наблюдений магнитного склонения на различных широтах в обсерваториях Норвегии 13 июля 2025 года / Fig. 4. Summary diagram of synchronous observations of magnetic declination at different latitudes in observatories in Norway on 13.07.2025

В авроральных зонах магнитные суббури могут происходить ежедневно с амплитудами в сотни нТл и длиться более пяти часов. Зона влияния суббури вытянута вдоль геомагнитной широты.

Кроме суббурь в северных широтах наблюдаются пульсации сверхнизкой частоты, они обычно имеют периоды в несколько минут, могут быть непрерывными в течение всего дня и имеют амплитуды от 5 до 20 нТл.

В высоких широтах амплитуды возмущения в 50 нТл могут вызывать угловое изменение на $\frac{1}{3}$ градуса. Фактически во время возмущений, вызванных магнитными бурями, склонение может изменяться на несколько градусов и более [25].

Значительные геомагнитные колебания создают искажения параметров опорного поля и снижают точность определения направления скважины при навигации во время бурения. В регионе Баренцева моря периоды, когда нерегу-

лярный шум во внешнем магнитном поле превышает пределы погрешностей, заданных моделью MWD, составляют от 50 до 80 % дней [29]. Направление вектора магнитного поля в авроральной зоне может измениться на несколько градусов менее чем за час. Средние значения вариаций относительно спокойного уровня имеют смещение приблизительно на $0,5^\circ$, что может привести к значительной азимутальной ошибке. Величина и знак смещения склонения меняются в зависимости от долготы, широты и времени суток¹.

В высоких широтах горизонтальная компонента составляющей геомагнитного поля уменьшается, что усугубляет влияние большинства источников ошибок азимута в процессе съемки. Это крайне негативно сказывается на точности замеров MWD. Данные сети магнитных обсерваторий и вариационных станций очень важны для определения характеристик авроральных электроджетов и компенсации возмущений.

Вопросу поиска оптимального расстояния от буровой установки до обсерватории для обеспечения достаточного снижения помех на высокоширотной буровой установке посвящены независимые исследования различных групп экспертов [25–29, 33].

Выводы авторов сводятся к следующему:

1. Магнитные возмущения в Арктике имеют короткие корреляционные длины, поэтому обсерватории должны быть расположены достаточно близко к месторождению, чтобы обеспечить корректность поправок. Авроральные токи движутся вдоль геомагнитных широт, поэтому по направлению восток-запад корреляция лучше, чем по направлению север-юг.

2. Во время слабых или умеренных возмущений коррекция замеров может применяться на расстоянии до 500 км при условии, что буровая и обсерватория находятся на одной геомагнитной широте. Компенсация значительных возмущений (на $\sim 75\%$) может быть обеспечена при расстоянии до обсерватории < 100 км по направлению север-юг (или $\pm 1^\circ$ по геомагнитной широте), но в период, когда флуктуация электроджета происходит непосредственно над районом бурения и контрольной станцией, коррекция будет недоступна.

3. Компенсация возмущений по данным обсерватории, находящейся более чем в 600 км, вносит дополнительные ошибки, которые могут быть больше, чем некорректированное поле возмущений.

4. Возмущения магнитного склонения имеют большую корреляционную длину, чем искажения наклонения и общего поля. Поэтому корректировка значений склонения при использовании данных обсерватории будет более значительной, чем наклонения и модуля полной индукции.

Современные исследования [30] показывают, что в высоких широтах для достижения точности, предусмотренной стандартами ISCWSA для IIFR, необходимо использование поправок от удаленной не более чем на 100 км от буровой площадки обсерватории. При использовании вариационной станции, находящейся в районе буровой, необходимо чтобы

¹Значения вариаций склонения из-за суббуревой электроджета в Западной Сибири могут достигать значений от $-2,87^\circ$ до $1,84^\circ$, среднее отклонение – $0,48^\circ$. Вариации полного модуля индукции поля составляют более 1000 нТл, а средние отклонения – порядка 300 нТл [27].

она опиралась на данные обсерватории, удаленной от нее не более чем на 500 км. Вариационная станция без опоры на обсерваторию может в большей степени использоваться как индикатор возмущений для временной приостановки бурения. В связи с этим развертывание обсерваторий в северных областях авроральных геомагнитных возмущений является наиболее актуальной задачей [31, 32].

При использовании компонентных вариационных станций вместо обсерваторий в них необходимо обеспечить отдельный измерительный павильон со стабильным постаментом для феррозондового датчика, в котором поддерживается стабильная температура. Установка и ориентация датчика в этом случае выполняется после серии абсолютных наблюдений [29]. В процессе эксплуатации необходимы регулярное (не реже чем 1 раз в год) обслуживание вариационных станций профильными научными организациями, включающее абсолютные наблюдения, тщательную оценку точности получаемых с их помощью параметров магнитного поля и разработку соответствующих им отдельных моделей ошибок для расчета неопределенности положения скважин.

Основные рекомендации экспертов отрасли для проводки скважин в северной авроральной зоне:

1. Поскольку помехи от магнитного влияния буровой колонны (DSI) возрастают с увеличением широты, существует значительный потенциал для повышения точности позиционирования скважин за счет уменьшения DSI. Снижение DSI на 50 % улучшает латеральную точность позиционирования для горизонтально направленной скважины длиной 4 000 м примерно на 30 %.

2. Для обеспечения передачи данных о геомагнитном поле в реальном времени и их достоверности необходимо использовать одну или несколько обсерваторий как можно ближе к месту бурения (как это сделано на Аляске [25]). Для шельфовых месторождений это может включать установку магнитометрических датчиков на морском дне или на плавучем носителе.

3. Следует разрабатывать модели ошибок магнитного MWD, которые учитывают как случайные, так и систематические возмущения геомагнитного опорного поля.

4. Необходимо применять стандартные методики расчета азимута с достаточно хорошей магнитной изоляцией телесистемы в составе КНБК, особенно в восточно-западном направлении скважины. Метод MSA следует использовать преимущественно для статистической оценки качества замеров MWD.

5. Для обеспечения контрольных измерений азимутов целесообразно включать две независимые телесистемы MWD в КНБК с одинаковой точностью, а после завершения секции выполнять независимые замеры гироскопом [33].

Заключение и выводы

1. Магнитное поле Земли играет ключевую роль для навигации при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин, позволяя определять их траекторию, а также контролировать отклонение от проектного положения. Качество параметров, таких как магнитное склонение, наклонение и значение полного модуля индукции магнитного поля, оказывает прямое влияние на точность бурения и, следовательно, на эффективность добычи углеводородов и безопасность буровых операций. Использование точных геомагнитных данных в наклонно-направленном бурении является не только необходимостью, но и стратегическим преимуществом для компаний, стремящихся к оптимизации своих затрат.

2. Сложности использования магнитного поля Земли в качестве ориентира связаны с его изменчивостью во времени и пространстве, вызванной вековым ходом главного поля, магнитной неоднородностью земной коры и внешними возмущениями. При бурении скважин необходимо проводить оценку опорной модели магнитного поля, сравнивая ее параметры с данными MWD.

3. При повышенных требованиях к точности проводки скважин в сложных горно-геологических условиях или при уплотняющем бурении, снижение неопределенности их положения может быть достигнуто за счет уточнения параметров опорного магнитного поля. Внедрение моделей IFR1 и IFR2 позволяет учитывать влияние местных магнитных аномалий и внешних возмущений.

4. В настоящее время российские профильные научные центры готовы обеспечить отрасль геомагнитными данными высокого разрешения, а также предоставлять локальные геомагнитные модели (IFR1) и услуги коррекции геомагнитных данных в реальном времени (IFR2) для получения более точных параметров магнитного поля в процессе бурения. При этом в каждом случае создание IFR-моделей должно быть экономически обоснованным, а после внедрения созданные модели в обязательном порядке должны проходить валидацию на соответствие заявленным параметрам точности, так как необоснованное снижение параметров неопределенности несет в себе потенциальные угрозы безопасности.

5. При ведении буровых работ в высоких широтах необходимо учитывать особенности авроральных областей и обеспечивать наблюдения за изменениями магнитного поля по данным ближайшей обсерватории или вариационной станции, это позволит лучше понять причины несоответствия данных замеров приемочным критериям и принять обоснованные решения по дальнейшей проводке скважин. Поскольку от качества используемых моделей магнитного поля Земли напрямую зависит точность определения пространственного положения скважин, вопросы обеспечения геомагнитными данными наклонно-направленного бурения должны решаться маркшейдерскими подразделениями операторов добычи углеводородов.

80

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Яновский БМ. Земной магнетизм. Ленинград, 1978 [Yanovsky BM. Earth magnetism. Leningrad, 1978. (In Russ.)].
2. Малахов ВВ, Алексеев ВВ, Голубков ВС, и др. Магнитное поле во внутреннем околоземном пространстве. *Успехи физических наук*. 2023; 193: 1025–1046. [Malakhov VV, Alekseev VV, Golubkov VS, et al. Magnetic field in the inner near-Earth space. *Advances in physical sciences*. 2023; 193: 1025–1046. (In Russ.)]. DOI: 10.3367/UFNr.2022.12.039293.
3. Новиков КВ. Магниторазведка: Учебное пособие. Ч. 1. Москва, 2013. [Novikov K.V. Magnetic exploration: A tutorial. Part 1. Moscow, 2013. (In Russ.)].

4. Симонов ИМ. Опыт математической теории земного магнетизма. *Ученые записки Казанского университета*. 1835; 3. [Simonov IM. Experience of the mathematical theory of terrestrial magnetism. *Scientific notes of Kazan University*. 1835; 3. (In Russ.)].
5. Gauss CF. Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus. *Resultate aus den Beobachtung des magnetischen Vereins im Jahre 1838*. Gottingen: Dieterichsche Buchhandlung, 1839; 1: 1-57.
6. Maus S, Nair M, Poedjono B, et al. High Definition Geomagnetic Models: A New Perspective for Improved Wellbore Positioning. *Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012. DOI: 10.2118/151436-MS.
7. Thébaud E, Hulot G, Langlais B, et al. A spherical harmonic model of Earth's lithospheric magnetic field up to degree 1050. *Geophysical Research Letters*. 2021; 48: e2021GL095147. DOI: 10.1029/2021GL095147.
8. Thébaud E, Finlay C, Beggan C, et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*. 2015; 67: 79.
9. Maus S, Nair M, Carande B, (et al). Systematic and Random Contributions to the Disturbance Field (IFR 2). *Paper presented at the Conference and Exhibition*. Amsterdam, 2014. DOI: systematic-and-random-contributions-to-the-disturbance-field-ifr-2-.pdf
10. Definition of the ISCWSA Error Model Revision 5.13 January 2023.
11. International Association of Geomagnetism and Aeronomy. 2024. IGRF-14. Zenodo. DOI: 10.5281/ZENODO.14012303.
12. Alken P, Thébaud E, Beggan CD, et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space*. 2021; 73 (49). DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x.
13. Петров ВГ, Бондарь ТН. Построение пространственно-временной модели главного геомагнитного поля по спутниковым данным на эпоху 2015–2029 гг. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2024; 64 (1): 133-140 [Petrov VG, Bondar TN. Construction of a spatio-temporal model of the main geomagnetic field based on satellite data for the epoch 2015-2029 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024; 64 (1): 133-140. (In Russ.)].
14. Rytov RA. Artificial Neural Network for Downward Continuation of Anomalous Magnetic Fields. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025; 25 (2): 5. DOI: 10.2205/2025ES000996
15. Rytov RA, Petrov VG. Application of Artificial Neural Networks for Reconstruction of Vector Magnetic Field from Single-Component Data. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024; 64 (6): 912-919. DOI: 10.1134/S0016793224600425.
16. Rytov RA, Usov NA, Petrov VG. Vector Magnetic Field Reconstruction from Single-Component Data Using Evolutionary Algorithm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024; 64 (3): 427-435. DOI: 10.1134/S0016793224600164.
17. Копытенко ЮА, Петрова АА. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016; 9 (2): 88-96 [Kopytenko YuA, Petrova AA. Development and use of a component model of the Earth's magnetic field for magnetic cartography and geophysics. *Fundamental and applied hydrophysics*. 2016; 9 (2): 88-96. (In Russ.)].
18. Kabirzadeh H, Rangelova E, et al. Dynamic Error Analysis of Measurement While Drilling Using Variable Geomagnetic In-Field Referencing. *SPE J*. 2018; 23: 2327-2338. DOI: 10.2118/188653-PA.
19. Russell JP, Shiells G, Kerridge DJ. Reduction of Well-Bore Positional Uncertainty Through Application of a New Geomagnetic In-Field Referencing Technique. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, 1995. DOI: 10.2118/30452-MS.
20. Maus S. Managing Main & Crustal Magnetic Fields and New Developments in Global Magnetic Modeling. *Paper presented at the Conference ISCWSA-41*. London, 2015. URL: <https://www.iscwsa.net/media/files/files/a97d5291/managing-main-crustal-magnetic-fields-and-new-developments-in-global-magnetic-modeling.pdf>
21. Poedjono B, Montenegro D, Clark P, et al. Successful Application of Geomagnetic Referencing for Accurate Wellbore Positioning in a Deepwater Project Offshore Brazil. *Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012. DOI: 10.2118/150107-MS
22. Waag T, Torkildsen T, Inderhaug O, et al. Local Geomagnetic Field Modelling Closes the Gap Between MWD and Gyro Directional Surveying. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Houston, Texas, 1999. DOI: 10.2118/56699-MS.
23. Амиантов АС, Зайцев АН, Одинцов ВИ и др. Вариации магнитного поля Земли. Москва, 2001 [Amiantov AS, Zaitsev AN, Odintsov VI, et al. Variations of the Earth's magnetic field. Moscow, 2001. (In Russ.)].
24. Poedjono B, Beck N, Buchanan A, et al. Geomagnetic Referencing in the Arctic Environment. *Paper presented at the OTC Arctic Technology Conference*. Houston, Texas, USA, 2012. DOI: 10.4043/23729.
25. Mitkus A, Willerth M, Reetz A, et al. Challenges and Solutions for Accurate Wellbore Placement in the Barents Sea. *Paper presented at the SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*. Hague, Netherlands, 2019. DOI: 10.2118/194067-MS.
26. Edvardsen I, Johnsen MG, Løvhaug UP. Effects of substorm electrojet on declination along concurrent geomagnetic latitudes in the northern auroral zone. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2016; 6:37. DOI: 10.1051/swsc/2016031
27. Edvardsen I. Effects of Geomagnetic Disturbances on Offshore Magnetic Directional Wellbore Positioning in the Northern Auroral Zone. *A dissertation for the degree of Philosophiae*. 2015.
28. Edvardsen I, Nyrnes E, Johnsen M, et al. Improving the Accuracy and Reliability of MWD Magnetic Wellbore Directional Surveying in the Barents Sea. *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, 2013. DOI: 10.2118/166226-MS.
29. Beggan C, Clarke E, Knight, P, et al. Assessing the Absolute and Relative Accuracy of Magnetic Variometers Compared to Observatory Data for IFR2. DOI: 10.2118/223681-MS.
30. Соловьев АА. Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения. *Вестник РАН*. 2024; 94: 10: 871-877. [Soloviev AA. Geomagnetic support of directional drilling. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2024; 94: 10: 871-877. (In Russ.)]. DOI: 10.31857/S0869587324100023.
31. Соловьев АА, Сидоров РВ, Ощенко АА, Зайцев АН. О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в российской Арктике. *Физика Земли*. 2022; 3: 136-152. [Soloviev AA, Sidorov RV, Oshchenko AA, Zaitsev AN. On the need for high-precision monitoring of the geomagnetic field during directional drilling in the Russian Arctic. *Physics of the Earth*. 2022; 3: 136-152. (In Russ.)]. DOI: 10.31857/S0002333722020120.
32. Poedjono B, Chandrasekharan M. Effective Monitoring of Auroral Electrojet Disturbances to Enable Accurate Wellbore Placement in the Arctic. *Paper presented at the OTC Arctic Technology Conference*. Houston, Texas, 2014. DOI: 10.4043/24583-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

Валерий Григорьевич Петров –

канд. физ.-мат. наук, научный руководитель направления
«Магнетизм Земли и планет», Институт земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
имени Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), 108840, г. Москва,
г. Троицк, Российская Федерация, e-mail: vpetrov@izmiran.ru

Дмитрий Владимирович Кудин –

канд. техн. наук, заведующий сектором геофизического
мониторинга, Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), 119296,
г. Москва, Российская Федерация, e-mail: d.kudin@gcras.ru

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

Критерии авторства / Contribution:

Б. Н. Бухтояров – написание текста статьи, сбор и анализ данных, выполнение работы по систематизации материала; В. Г. Петров – написание текста статьи в части описания создания моделей, описание моделей ИЗМИРАН; Д. Г. Кудин – написание статьи в части описания моделей ГЦ РАН, учета влияния внешнего поля; О. Р. Старикова – участие в создании концепции статьи, сборе и анализе данных, редактирование текста статьи; А. А. Виноградова – сбор и анализ исходных данных, перевод зарубежных материалов. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи / B.N. Bukhtoyarov – writing the text of the article, collecting and analyzing data, performing work on the systematization of the material; V. G. Petrov – writing the text of the article in terms of describing the creation of models, describing models from the Russian Academy of Sciences; D. G. Kudin – writing the article in terms of describing models of the GC RAS, taking into account the influence of the external field; O. R. Starikova – participation in creating the concept of the article, collecting and analyzing data, editing the text of the article; A. A. Vinogradova – collecting and analyzing source data, translating foreign materials. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 31.07.2025.

Поступила после рецензирования: 02.08.2025.

Принята к публикации: 09.08.2025.

Article info

Received: 31.07.2025.

Revised: 02.08.2025.

Accepted: 09.08.2025.

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

Valery G. Petrov –

Cand. Sci. (Phys. and Math.), Scientific Director of the
Department Magnetism of the Earth and Planets, Pushkov
Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave
Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN),
108840, Moscow, Troitsk, Russian Federation, e-mail: vpetrov@
izmiran.ru

Dmitry V. Kudin –

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Geophysical Monitoring Sector,
Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (GC
RAS), 119296, Moscow, Russian Federation,
e-mail: d.kudin@gcras.ru

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