ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Геомагнитные данные и новые отечественные модели для инклинометрии горизонтальных нефтяных и газовых скважин в районах Крайнего Севера и арктического шельфа

В.Н.Глинских[1], **П.Г.Дядьков**[1,2], **О.В.Жданеев**[3,4,5], **А.В.Зайцев**[6]✉, **Д.В.Кудин**[7], **А.А.Соловьев**[7]

[1] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука, Новосибирск, Россия*
[2] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[3] *Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия*
[4] *Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Россия*
[5] *Центр компетенций технологического развития ТЭК при Минэнерго России, Москва, Россия*
[6] *Российское энергетическое агентство Минэнерго России, Москва, Россия*
[7] *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Глинских В.Н., Дядьков П.Г., Жданеев О.В., Зайцев А.В., Кудин Д.В., Соловьев А.А. Геомагнитные данные и новые отечественные модели для инклинометрии горизонтальных нефтяных и газовых скважин в районах Крайнего Севера и арктического шельфа // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 160-174. EDN MINJHJ

Аннотация

Статья посвящена решению важной задачи обеспечения точности инклинометрических измерений при строительстве наклонно направленных и горизонтальных скважин в условиях Крайнего Севера и арктического шельфа России. В этих регионах традиционные методы инклинометрии, основанные на акселерометрах и магнитометрах, сталкиваются с существенными сложностями, вызванными значительными изменениями геомагнитного поля (магнитными бурями, вековыми вариациями и прочими возмущениями). Погрешности измерения азимута ствола скважины из-за искажений геомагнитного поля приводят к рискам отклонения от проектной траектории, что ведет к финансовым и технологическим потерям. Проведен детальный анализ и сформулированы требования к использованию актуальных геомагнитных данных и высокоточных математических моделей, являющихся основой для коррекции инклинометрических замеров при горизонтальном бурении в условиях экстремальных широт. Для компенсации внешних магнитных возмущений в Арктике недостаточно использовать устаревшие или глобальные модели (IGRF), необходимы локальные, регулярно обновляемые модели высокого разрешения (аналогичные HRGM, IFR-1, IFR-2), учитывающие региональную специфику и локальные магнитные аномалии земной коры. Представлены отечественные геомагнитные модели (CAMPUS-C, CAMPUS-A, CAMPUS-CA, DIF-1), разрабатываемые Геофизическим центром РАН и Институтом нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН для нефтегазового комплекса, и впервые обоснована их применимость в качестве замены зарубежных моделей BGGM/HDGM для задач наклонно направленного бурения в арктических условиях. Предложены новые отечественные геомагнитные модели и детальное обоснование оптимального количества и расположения геомагнитных обсерваторий, необходимых для обеспечения надежного мониторинга магнитной обстановки. Применение таких специализированных моделей и данных позволяет нивелировать влияние геомагнитных помех, обеспечивая достоверность определения пространственного положения бурового инструмента при горизонтальном бурении. Это способствует оптимизации процессов бурения, повышению безопасности и эффективности освоения месторождений Арктики, что имеет стратегическое значение для Российской Федерации.

Ключевые слова

инклинометр; магнитометры; геомагнитная модель; горизонтальное бурение; высокоточный мониторинг; ИНТЕРМАГНЕТ; Арктическая зона РФ; вариации магнитного поля; геомагнитные аномалии

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственных заданий Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (№ FWZZ-2026-0051) и Геофизического центра РАН (№ 75-00444-26-01).

Поступила: 07.08.2025 ***Принята: 28.04.2026*** ***Онлайн: 02.07.2026*** ***Опубликована: 20.07.2026***

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Введение

Добыча нефти в России по итогам 2024 г. составляет 520-530 млн т, что соответствует 10,3-10,5 млн баррелей в сутки. Добыча газа в России достигла 685 млрд м^3 [1]. Поддержание текущего уровня добычи углеводородов является одним из приоритетов, обозначенных в Энергетической стратегии Российской Федерации до 2050 года* [2]. Планируется, что сохранение этого уровня будет обеспечено за счет разработок месторождений Крайнего Севера и Арктики, где прогнозируется рост нефтедобычи до 25 %. К 2035 году ожидается добыча не менее 200 млн т нефти и 1 трлн м^3 газа [3].

Около 60 % разведанных запасов углеводородов сосредоточено в новых арктических проектах, которые расположены севернее 60° северной широты [4]. Из-за сложной логистики, неразвитой транспортной инфраструктуры и суровых природных условий разработку этих месторождений экономически целесообразно проводить с применением современных технологий бурения высокодебитных горизонтальных и наклонно направленных скважин протяженностью от 4-5 до более 10 км. При этом в районах Крайнего Севера разбуривание месторождений характеризуется высокой плотностью сетки скважин из-за ограниченных площадей для размещения бурового оборудования. В связи с этим требуется высокая точность позиционирования ствола скважины [5], которая достигается с помощью методов подземной навигации и управления траекторией. Например, при добыче нефти и газа на шельфе Охотского моря, где прокладываются рекордно длинные субгоризонтальные скважины, попадание в заданную точку под землей обеспечивается на расстоянии до 15 км от устья [5, 6].

Специфические трудности инклинометрии при горизонтальном бурении в условиях Крайнего Севера

Влияние геомагнитных факторов на инклинометрию в высоких широтах. Российские арктические месторождения находятся на широтах выше 60°, что вызывает дополнительные сложности при бурении скважин с применением магнитометрических инклинометров. Основные сложности связаны с [7]: естественным уменьшением горизонтальной составляющей геомагнитного поля при движении к полюсам; магнитными бурями и суббурями, вызванными вспышками на Солнце и коронарными выбросами массы; дрейфом северного магнитного полюса со скоростью 55-60 км/год; высокоширотными авроральными возмущениями в пределах авроральной зоны (60-75° широты).

Критическое повышение чувствительности к геомагнитным помехам при горизонтальном бурении. При горизонтальном бурении точность инклинометрических измерений еще более критична, чем при наклонно направленном бурении, поскольку результаты измерений скважинными инклинометрами становятся максимально чувствительными к магнитным помехам [8]. Когда пространственная траектория скважины приближается к истинно горизонтальному направлению, вертикальная компонента гравитационного поля (используемая акселерометрами) становится минимальной и практически неинформативной, в то время как зависимость от правильности определения азимута возрастает экспоненциально.

При горизонтальном бурении в направлении запад-восток (магнитный азимут близок к 90° и 270°) горизонтальная компонента магнитного поля в этом направлении существенно меньше, и инструмент становится максимально чувствительным к помехам. Даже небольшие вариации магнитного поля приводят к ошибкам в определении азимута, достигающим нескольких градусов, что может вызвать отклонение скважины от проектной траектории на десятки метров на глубине.

Точность измерения азимута инклинометров в этих широтах снижается, и погрешность может возрастать до ±3-8° (против ±0,5-1,5° в умеренных широтах) [9]. Это в два-три раза выше допустимых значений при бурении высокодебитных горизонтальных скважин в условиях плотной сети.

* Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. URL: https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-strategy (дата обращения 07.08.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Дрейф магнитного полюса и его последствия. На северных широтах увеличение погрешности при инклинометрических измерениях азимута обусловлено изменениями характеристик магнитного поля Земли, которое подвержено внешним воздействиям, вызванными космическими явлениями. В периоды геомагнитных бурь и суббурь геомагнитная навигация становится затруднительной. Чем выше широта, тем интенсивнее эти воздействия, так как дипольная конфигурация магнитосферы направляет линии магнитного поля к полюсам, и поля возмущений в приполярных областях значительно интенсивнее, чем на низких широтах [9].

Интенсивность дрейфа магнитного поля в Арктике определяется смещением магнитного полюса на 55-60 км/год, изменением магнитного склонения до 0,2-0,3° в год, суммарное отклонение за 5 лет может достигать 1,5° [10]. При этом погрешность измерения азимутального угла увеличивается до 3-8° при стандартных измерениях, а дополнительная погрешность из-за дрейфа магнитного поля Земли составляет ±0,5-1,2° [9]. В результате суммарная ошибка позиционирования ствола на глубине 3000 м достигает 15-30 м бокового отклонения, а на расстоянии 8000 м от устья скважины – 40-80 м [11]. Это критично для горизонтальных скважин, где допустимые отклонения ствола составляют ±10 м по вертикали и ±20 м по горизонтали, а в сложных условиях (например, рядом с соляными куполами или при разработке низкопроницаемых коллекторов) до ±5 м.

Выход ствола скважины за проектные нормы при горизонтальном бурении сопряжен с рисками аварий при пересечении соседних скважин и выхода ствола скважины из продуктивного пласта. Это приводит к экономическим потерям в 10-15 % (перебуривание скважины), что составляет 0,5-2 млн дол. (средние потери на одну скважину). На месторождениях Крайнего Севера и арктического шельфа, где скважины имеют протяженность 8-15 км, стоимость бурения доходит до 30-50 млн дол. Ошибки при бурении высокодебитных скважин в этих районах могут привести к полной потере инвестиций на разработку месторождений. Поэтому для минимизации рисков важно производить учет вариаций магнитного поля Земли, постоянный высокоточный мониторинг магнитного поля в месте бурения для обеспечения эталонных текущих значений и постоянной коррекции измерений магнитометра, установленного в буровой колонне [12].

Важно отметить, что существуют скважинные приборы, не подверженные влиянию магнитных помех. К таким приборам относят гироскопические системы (Gyro-While-Drilling, GWD), которые используются при уточнении траектории скважины. Однако магнитометрические системы экономически эффективнее гироскопических при условии применения надлежащей коррекции измерения азимута, в связи с чем скважинные инклинометры, основанные на архитектуре применения трех акселерометров и трех магнитометров, получили подавляющее распространение на нефтегазовых месторождениях не только в России, но и за рубежом [12, 13]. В табл.1 приведено сравнение точностных характеристик технологий инклинометрии на высоких широтах.

Таблица 1

Точностные характеристики технологий инклинометрии на высоких широтах

Параметр	Магнитные системы (без коррекции)	Гироскопические системы	Магнитные системы + HRGM/IFR
Точность на 70° с.ш.	0,1-0,3° (±2-5° во время бурь)	0,1-0,5°	0,05-0,15°
Стоимость (на скважину)	50000-100000 дол.	500000-800000 дол.	100000-200000 дол.
Непрерывность	Требует коррекции	Ограничена (4-6 ч)	Непрерывная
Требование остановок	Нет	Да	Нет

Распространенная на российских месторождениях архитектура датчиков инклинометров включает три акселерометра и три магнитометра, обеспечивающие регистрацию трех компонент вектора гравитационного и магнитного полей Земли [14]. Данная архитектура позволяет с высокой точностью измерять инклинометрические данные в нормальных условиях проведения измерений. В скважинах инклинометры подвержены влиянию магнитных помех, вызванных намагниченностью

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

буровой колонны и элементов компоновки низа бурильной колонны (КНБК), а также намагниченностью обсадных колонн соседних скважин, выполненных из магнитных материалов. Для обеспечения точности в подземной навигации при бурении высокодебитных наклонно направленных и горизонтальных скважин помимо использования в КНБК немагнитных металлов и сплавов также применяются математические методы коррекции инклинометрических данных.

Без использования математических алгоритмов коррекции инклинометры не способны обеспечить паспортную точность в скважинных условиях (в составе КНБК), и погрешность определения азимута может превышать ±20°, а точностные характеристики скважинных приборов имеют ключевое значение для обеспечения показателей коэффициента извлечения нефти и газа [14]. Поэтому при работе с магнитометрическими инклинометрами требуется обязательное применение специализированных алгоритмов математической обработки данных, использующих в качестве входной информации трехкомпонентные измерения магнитного поля Земли, а также истинные значения параметров геомагнитного поля в точке замера.

Система коррекции траектории ствола бурящейся нефтегазовой скважины по геомагнитным данным основана на сопоставлении результатов измерений магнитометра, размещенного в немагнитной части КНБК, с эталонными значениями, полученными из геомагнитной модели или по результатам прямых измерений поля в районе бурения [15, 16]. При горизонтальном бурении алгоритмы коррекции становятся чрезвычайно чувствительными к погрешностям значений магнитного поля, поэтому требуется использование высокочастотных данных (ежеминутные или даже непрерывные измерения) вместо традиционных суточных обновлений [16].

Существуют несколько методов определения параметров геомагнитного поля Земли: по математической модели для координат местности и по непосредственным измерениям в точке проведения работ, по данным магнитных обсерваторий. На практике основным источником получения геомагнитных данных являются математические модели магнитного поля Земли.

Согласно классификации международного комитета по точности бурения (Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy, ISCWSA) существующие математические модели геомагнитного поля Земли делятся на пять категорий разрешения по качеству описания внутреннего поля (табл.2).

Таблица 2

Классификация моделей магнитного поля Земли (ISCWSA)

Категория	Описание	Примеры
LRGM (Low Resolution)	Основное поле; диапазон 40 000-4000 км; обновление один раз в 5 лет	IGRF-14, WMM-2025, CGRF
SRGM (Standard Resolution)	Основное и крупномасштабное литосферное поле; обновление ежегодно	BGGM, MVSD, CHAOS-8, WMMHR-2025
HRGM (High Resolution)	Основное поле + региональные магнитные аномалии; диапазон до ~28 км; обновление ежегодно	HDGM, MVHD, BGGM-HD, ИЗМИРАН, CAMPUS-CA
IFR-1 (In-Field Referencing)	Основное поле + региональные и локальные аномалии; диапазон до первых километров; данные обсерватории на расстоянии до 200 км	IFR-1 (BGS), DIF-1 (ИНГГ СО РАН)
IFR-2 / IIFR (Interpolated IFR)	IFR-1 с интеграцией ежеминутных данных из обсерватории; обновление в реальном времени	HDGM-RT, IFR-2, BGS IFR-2

На российских месторождениях для бурения горизонтальных, субгоризонтальных и наклонно направленных скважин долгое время использовали данные моделей IGRF (International Geomagnetic Reference Field) и BGGM/HDGM (BGS Global Geomagnetic Model/High Definition Geomagnetic Model). У IGRF низкое пространственное разрешение и частота обновления примерно один раз в 5 лет, тогда как BGGM/HDGM имеет высокое разрешение и обновляется ежегодно. Однако в РФ не было собственных полнофункциональных баз геомагнитных данных для топливно-энергетического комплекса, способных покрыть все северные месторождения. С 1 января 2023 г. иностранные модели официально не поставляются в РФ, а доступ через интернет закрыт. В связи

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

с этим разработка собственных моделей геомагнитного поля Земли приобрела критическую актуальность для российского топливно-энергетического комплекса [17].

Потребность в такой процедуре обусловлена тем, что инклинометрические измерения выполняются в условиях действия паразитных магнитных полей, существенно искажающих определение азимута и магнитного отклонителя. Основные источники геомагнитных полей и сопутствующих погрешностей приведены в табл.3.

Таблица 3

Основные источники погрешностей магнитного инклинометра

Тип погрешности	Причина возникновения
Несоосность	
Датчики относительно корпуса	Допуски при изготовлении или неполная калибровка
Приборы относительно оси скважины в составе немагнитной КНБК	Плохая центровка или ее отсутствие
Колонны относительно ствола скважины	Смещение КНБК
Магнитные помехи	
Соседние скважины	Расстояние между стволами менее 50 м
Бурильная колонна/ВЗД	Близость датчика менее 12 м к магнитной массе
Помехи от магнитных включений в буровой раствор	Стальная стружка в буровом растворе, образовавшаяся в результате трения буровой колонны об обсадную колонну, износ породоразрушающего инструмента и т.д.
Магнитные пласты	Наличие магнитных масс в разрезе
Дефекты НУБТ	Магнитные включения в немагнитных утяжеленных трубах
Геомагнитные помехи	Вариации магнитного поля от внешних источников ионосферно-магнитосферных и внутренних (вековой вариации в жидком ядре Земли и обусловленные неоднородностью распределения электрической проводимости и магнитных свойств в литосфере Земли)

При горизонтальном бурении необходимо использование результатов непрерывных наблюдений на магнитной обсерватории с интервалом не более 1 мин, а при прохождении критических участков – с интервалом в несколько секунд [18]. Это позволяет в реальном времени отслеживать изменения магнитного поля и корректировать траекторию скважины до того, как отклонение превысит допустимые пределы.

Важно отметить, что математические алгоритмы способны частично компенсировать влияние паразитных магнитных полей и достичь точности измерения азимутного угла до ±1,5° при расстоянии от инклинометра до намагниченных масс от 3,5 м. К основным методам относят метод короткой утяжеленной бурильной трубы (УБТ), для которого обязательны истинные геомагнитные параметры с точностью для склонения – не более ±0,1°, для наклонения – не более ±0,05°, для вектора магнитной индукции – не более ±50 нТл [19].

Распространение погрешностей инклинометрии на высоких широтах и обоснование применения локальных геомагнитных моделей

Точность инклинометрических измерений при горизонтальном бурении в Арктике определяется не только качеством скважинных приборов, но в первую очередь точностью геомагнитных данных, используемых для коррекции азимутальных погрешностей. Стандартные глобальные модели магнитного поля Земли (IGRF, BGGM) обеспечивают определение компонент магнитного поля с точностью, достаточной для умеренных широт, но недостаточной для условий Крайнего Севера и арктического шельфа [20].

Фундаментальная проблема инклинометрии в Арктике связана с резким уменьшением горизонтальной компоненты магнитного поля Земли при приближении к магнитным полюсам [20]. На широте 30° горизонтальная компонента составляет примерно 15000 нТл, тогда как на широте 70°

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

она снижается до 8100 нТл. Это уменьшение в 1,85 раз приводит к нелинейному возрастанию погрешности определения азимута, поскольку случайная погрешность измерения горизонтальной компоненты магнитного поля приводит к погрешности азимута, обратно пропорциональной значению самой горизонтальной компоненты:

$$\delta Az \approx \sigma(BH) / BH,$$

где δAz – ошибка азимута, град; $\sigma(BH)$ – стандартное отклонение ошибки в измерении горизонтальной компоненты магнитного поля, нТл; BH – значение горизонтальной компоненты, нТл.

Численный расчет показывает, что при погрешности измерения горизонтальной компоненты $\sigma(BH)$ = 500 нТл (что в среднем характерно для внешних геомагнитных возмущений в периоды магнитной активности) на широте 30° получаем погрешность азимута $\delta Az \approx 1{,}9°$, тогда как на широте 70° погрешность составляет $\delta Az \approx 3{,}5°$ [20]. На расстоянии 8000 м от устья скважины это соответствует боковому отклонению ствола скважины от проектной траектории: на широте 30° – примерно 266 м, а на широте 70° – примерно 490 м. Таким образом, одинаковая величина геомагнитного возмущения приводит к погрешности позиционирования, примерно в два раза большей в Арктике, чем на умеренных широтах. Погрешность измерения азимутального угла особенно критична при зарезке наклонного ствола и в интервале набора зенитного угла до 10-15°. Горизонтальная проекция измерительной оси инклинометра в этом диапазоне незначительна, а погрешность измерения азимута носит систематический характер и накапливается по всей длине интервала набора угла. В результате азимутальное смещение забоя от проектной траектории при типовом может превысить допустимый коридор попадания в продуктивный пласт и даже привести к пересечению соседних стволов скважин.

Для более детального анализа распространения погрешности при инклинометрии применен международный стандарт ISCWSA Error Model (Revision 5.13), утвержденный комитетом Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy и получивший поддержку Общества инженеров-нефтяников (Society of Petroleum Engineers, SPE). Данная модель широко используется в нефтегазовой промышленности для оценки точности [19] и позволяет рассчитать, как различные источники погрешностей (погрешность скважинных приборов, магнитные помехи от бурильной колонны, неточности геомагнитной модели, геомагнитные возмущения) комбинируются и приводят к погрешностям в определении пространственного положения ствола скважины.

Согласно модели ISCWSA, погрешность позиции в каждой точке измерения определяется соотношением

$$e_{i,l,k} = \sigma_{il} \left(d\Delta r_k / dp_k + d\Delta r_k + 1 / dp_k \right) dp_k / d\varepsilon_i,$$

где $e_{i,l,k}$ – вектор ошибки позиции; σ_{il} – величина i-й ошибки источника; $d\Delta r_k$ – геометрический якобиан, отражающий преобразование угловых ошибок в позиционные; $dp_k / d\varepsilon_i$ – весовые функции, показывающие чувствительность угловых измерений к ошибкам различных источников.

Критическое значение имеют весовые функции для магнитометрических погрешностей, которые содержат в знаменателе горизонтальную компоненту магнитного поля BH. В частности, две основные составляющие магнитометрических ошибок – AMIL (аксиальное магнитное влияние) и DBH (зависимость вектора наклонения от горизонтального поля) имеют весовые функции, пропорциональные $1/BH$. Это означает, что на высоких широтах, где BH мала, все магнитные погрешности усиливаются одновременно, создавая критическую ситуацию для навигации.

Расчет полной погрешности с использованием модели ISCWSA для конкретного случая горизонтальной скважины, ориентированной в направлении запад-восток (азимут близок к 90 или 270°, где наблюдаются максимальные погрешности измерения азимута магнитными инклинометрами), на широте 70°, при расстоянии 8000 м от устья скважины показывает следующие результаты. При использовании исключительно глобальной модели IGRF без каких-либо локальных коррекций

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и без учета текущих геомагнитных возмущений комбинированная погрешность азимута составляет примерно 2,8° (в терминах одного стандартного отклонения) или ±8,4° при 3σ-интервале. Это приводит к боковому отклонению ствола скважины на расстоянии 8000 м от устья скважины в пределах ±720 м. Такая погрешность в 90 раз превышает допустимое отклонение ±5 м для сложных коллекторов и в 36 раз превышает стандартный допуск ±20 м.

При использовании модели BGGM высокого разрешения, которая была доступна до 2023 г., точность определения склонения улучшается до ±1° (1σ), что снижает боковую погрешность до ±285 м. Это улучшение примерно в 2,5 раза, однако остается недостаточным для обеспечения безопасного позиционирования в плотной сетке скважин.

Применение российской модели CAMPUS-CA (разработана Геофизическим центром РАН), которая обеспечивает разрешение около 38 км с ежегодным обновлением, приводит к дальнейшему улучшению. Погрешность определения склонения по ней снижается до ±0,17°, что является улучшением в 14,7 раз по сравнению с IGRF. При использовании CAMPUS-CA комбинированная погрешность азимута составляет ±1,1° (3σ), что соответствует боковой погрешности примерно ±100 м. Хотя это значение остается выше оптимального, оно становится приемлемым для скважин в стандартных коллекторах (допуск ±20 м) при условии принятия дополнительных мер.

Качественный скачок в точности достигается при применении локальной модели DIF-1 (разработана в ИНГГ СО РАН), которая является российским аналогом международного стандарта IFR-1. Модель обеспечивает точность ±0,1° для склонения, ±0,05° для наклонения и ±50 нТл для модуля вектора напряженности магнитного поля Земли. При применении DIF-1 комбинированная погрешность определения азимута снижается до ±0,28° (3σ), что соответствует боковой ошибке ±32 м.

Реальность обеспечения такой точности подтверждается опытом внедрения модели DIF-1 на одном из месторождений в Западной Сибири с плотной сетью скважин горизонтального бурения, расположенном на широте 65°N, где эта модель используется с 2022 г.

Практическое внедрение высокоточных геомагнитных моделей строится в Российской Федерации на трехуровневой архитектуре.

• Первый уровень представлен глобальной моделью CAMPUS-CA, разработанной Геофизическим центром РАН, с пространственным разрешением около 38 км и ежегодным обновлением. Эта модель основана на данных спутниковых магнитометрических миссий (CryoSat-2, Ørsted, CHAMP, Swarm), наземных обсерваторских наблюдений и исторических аэромагнитных данных. Модель CAMPUS-CA достаточна для основного описания магнитного поля и может использоваться как базовая модель на всех месторождениях.

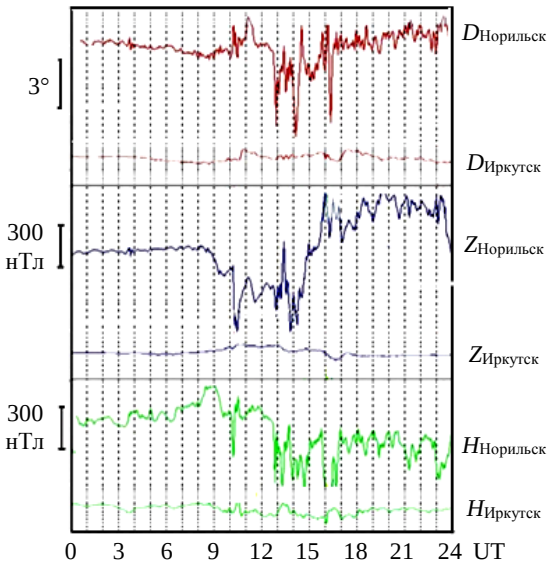
• Второй уровень образован локальными моделями DIF-1, разрабатываемыми индивидуально для каждого крупного месторождения. Построение таких моделей требует проведения специальных аэромагнитных съемок (если они отсутствуют) или использования имеющихся данных, интерпретации полученных карт аномального магнитного поля с привлечением геолого-геофизической информации, трехмерного моделирования распределения магнитных свойств в земной коре района месторождения. Модель DIF-1 обеспечивает пространственное разрешение менее 1 км и позволяет учитывать региональные и локальные магнитные аномалии, которые игнорируются глобальными моделями. Развитие этих моделей сопровождается ежегодными повторными наблюдениями абсолютных значений компонент магнитного поля в контрольных точках, что позволяет своевременно учитывать вековую вариацию (на высоких широтах она составляет 0,2-0,3° в год и не может быть проигнорирована).

• Третий уровень представлен сетью геомагнитных обсерваторий российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ, управляемой Геофизическим центром РАН. Эта сеть обеспечивает ежеминутный мониторинг компонент геомагнитного поля в реальном времени и позволяет выявлять и корректировать внешние геомагнитные возмущения, которые невозможно предсказать заранее. В частности, в авроральной зоне (60-75° широты), где расположены основные российские месторождения, происходят интенсивные и непредсказуемые магнитные суббури, генерирующие

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© В.Н.Глинских, П.Г.Дядьков, О.В.Жданеев, А.В.Зайцев, Д.В.Кудин, А.А.Соловьев, 2026

возмущения амплитудой 1000-3000 нТл с временным масштабом 15-60 мин [9]. На рисунке приведен пример вариаций магнитного склонения *D*, вертикальной *Z* и горизонтальной *H* составляющих вектора магнитной индукции во время магнитной бури 22 марта 2026 г. на магнитных обсерваториях в Норильске и Иркутске. Амплитуды вариаций по *D* достигали 6-7°, по *Z* и *H* – более 1000 нТл. Таким образом, для данной магнитной бури интенсивность вариаций в северных широтах (Норильск) примерно в семь раз превышает интенсивность вариаций в средних широтах (Иркутск)*. Использование метода DF, основанного на данных ближайшей обсерватории (в пределах 200 км), позволяет изолировать и компенсировать локальную компоненту возмущения с эффективностью 80-90 %, существенно повышая точность навигации даже в периоды геомагнитной активности.



Вариации магнитного склонения *D*, вертикальной *Z* и горизонтальной *H* составляющих во время магнитной бури 22 марта 2026 г.

Из приведенного анализа следует, что требуемая точность определения геомагнитного поля для горизонтального бурения в Арктике составляет не менее ±0,1° для склонения, ±0,05° для наклонения и ±50 нТл для модуля полного вектора [20]. Эти требования могут быть удовлетворены только при использовании локальных моделей высокого разрешения (типа DIF-1) в комбинации с системой реального мониторинга геомагнитных возмущений. Глобальные модели высокого разрешения, даже такие, как BGGM или CAMPUS-CA, остаются полезными для других применений, но для критичного горизонтального бурения в плотной сетке скважин они должны рассматриваться как вспомогательный инструмент, дополняемый локальными моделями и данными магнитных обсерваторий [20].

Практическое значение правильного выбора геомагнитной модели подтверждается экономическими показателями. Выход ствола скважины за допустимые пределы из-за ошибок навигации приводит либо к пересечению соседних скважин (потеря скважины, расходы на повторное бурение заменяющей скважины 0,5-2 млн дол.), либо к выходу из продуктивного пласта (снижение дебита на 10-15 %, потеря доходов 5-10 млн дол. за весь период продуктивности скважины). На месторождении с типичным количеством горизонтальных скважин (20-50 объектов) ежегодные потери от ошибок навигации без применения специальных мер составляют 100-150 млн дол. при вероятности двух-трех инцидентов в год [2].

Внедрение системы CAMPUS-CA + DIF-1 + ИНТЕРМАГНЕТ требует инвестиций в размере 10-17 млн дол. (включая разработку локальных моделей, установку обсерваторий и обучение персонала). Возвращаемость инвестиций составляет 28-54 млн дол. в год за счет исключения погрешностей навигации и увеличения дебита благодаря точному позиционированию в продуктивных пластах. Таким образом, коэффициент возврата инвестиций составляет 165-540 % в год, а полная окупаемость инвестиций достигается за 2-7 мес. Это свидетельствует о высокой экономической целесообразности развертывания предложенной системы [17].

Стратегическое значение развития локальных геомагнитных моделей для Российской Федерации определяется необходимостью обеспечения технологической независимости в критической области нефтегазовой геофизики. В условиях вышеупомянутого прекращения доступа к зарубежным моделям разработка и внедрение отечественных моделей (CAMPUS, DIF-1) и системы мониторинга (ИНТЕРМАГНЕТ) приобрели критическую актуальность. Российские модели не только решают текущую задачу импортозамещения, но и превосходят западные аналоги по точности

* Комплексная магнитно-ионосферная обсерватория. URL: http://magnit.iszf.irk.ru/ (дата обращения 07.08.2025).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и адаптированности к местным условиям [21]. Это создает условия для развития экспортных услуг в области геомагнитного моделирования для других стран с арктическими месторождениями (Канада, Норвегия, Гренландия), а также повышает инвестиционную привлекательность российских арктических проектов благодаря доказанной возможности безопасного бурения в условиях высокой плотности скважин.

Отечественные геомагнитные модели CAMPUS и DIF-1

Построение модели главного магнитного поля Земли выполнялось Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова (ИЗМИРАН) как основным институтом по земному магнетизму. Однако переход на цифровые технологии и запуск низкоорбитальных космических аппаратов для измерения магнитного поля привели к переоценке подходов. В 2022 г. Геофизический центр РАН начал работы по адаптации научных результатов в области моделирования главного поля Земли к требованиям нефтегазового сектора и индустриального стандарта ISCWSA. Были собраны данные всех спутниковых магнитометрических миссий [21]: CryoSat-2 [22-24], Ørsted [25, 26], CHAMP [27], Swarm [28, 29]. Затем, с использованием наземных обсерваторских измерений и исторических аэромагнитных данных [30, 31], была построена модель CAMPUS. Серия моделей магнитного поля CAMPUS (ГЦ РАН) включает модель главного поля (CAMPUS-C) и литосферного/аномального поля (CAMPUS-A). Полная модель обозначается как CAMPUS-CA с максимальной степенью разложения 1050 сферических гармоник, обеспечивая пространственное разрешение ~38 км.

В основе модели главного поля лежит модель-кандидат IGRF-14 [21], подготовленная в Геофизическом центре РАН в 2024 г. Модель-кандидат прошла все этапы верификации рабочей группой IGRF и использована при расчете коэффициентов итоговой международной модели на 2025-2030 гг.

В 2022 г. в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука разработана модель DIF-1 (аналог международной модели IFR-1), которая в течение трех лет успешно используется на одном из северных месторождений с плотной сеткой скважин при наклонно направленном и горизонтальном бурении. Модель DIF-1 разрабатывается индивидуально для конкретного месторождения на основе имеющихся карт аномального магнитного поля или специально выполняемых аэромагнитных съемок. Интерпретация этих данных о распределении аномалий модуля вектора магнитной индукции с привлечением другой геолого-геофизической информации позволяет восстановить распределение магнитных свойств горных пород в земной коре района месторождения и на следующем этапе рассчитать пространственное распределение компонент магнитного поля *D, I, F*. Это позволяет построить детальную 3D геомагнитную модель верхней части земной коры в районе месторождения, включая данные о главном поле и его вековых вариациях, достигая пространственного разрешения в первые километры. Преимущество модели DIF-1 – высокая степень пространственного разрешения и высокая точность определения компонент магнитного поля – погрешности определения абсолютных значений компонент *D, I* и *F* составляют 0,1°, 0,05° и 50 нТл соответственно. Проведение ежегодных повторных наблюдений абсолютных значений компонент магнитного поля позволяет осуществлять ежегодную коррекцию модели посредством учета вековой вариации. В настоящее время модель DIF-1 разрабатывается еще для трех месторождений углеводородов Арктической зоны.

Параллельно ИЗМИРАН разрабатывает модели со степенью разложения до 790 гармоник (категория HRGM), а его Санкт-Петербургское отделение совместно с нефтегазовыми компаниями ведет исследования по построению локальных моделей IFR-1 [32].

Физические основы моделирования магнитного поля и их применение при инклинометрии в Арктике

Магнитное поле, измеряемое на поверхности Земли, включает несколько практически независимых источников сигнала:

$$B(r,t) = B_m(r,t) + A(r) + D(r,t) + e(t),$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

где $B_m(r,t)$ – поле ядра (главное поле); $A(r)$ – поле литосферных источников; $D(r,t)$ – поле магнитосферных и ионосферных токов; $e(t)$ – погрешность измерений.

Поле литосферных источников включено как независимое от времени, так как вариации литосферного поля проявляются в геологических масштабах времени. Остальные компоненты зависят от времени и требуют построения математических моделей, описывающих временную и пространственную изменчивость магнитного поля Земли. Сложность моделирования источников поля существенно различается: низкоорбитальные спутниковые наблюдения упростили построение моделей главного поля [33], глобальные карты аномалий позволили построить сферическое разложение литосферного поля. Очень плохо поддаются моделированию внешние поля. При этом, если ионосферное среднеширотное поле довольно успешно аппроксимируется сферическими моделями на основе спутниковых данных [34], то высокоширотные суббуревые возмущения предсказать практически невозможно*, так как они связаны с нестационарными процессами в хвосте магнитосферы.

При горизонтальном бурении в Арктике критически важным является учет компоненты $D(r,t)$, поскольку геомагнитные возмущения на высоких широтах достигают амплитуд 1000-3000 нТл и более, что превышает сам сигнал горизонтальной компоненты магнитного поля [35].

Моделирование главного поля выполняется с помощью сферического гармонического анализа, впервые предложенного Гауссом. Поле внутренних источников представляется в виде градиента скалярного потенциала V:

$$B = -\nabla V.$$

Для вычисления V используется разложение в ряд по сферическим функциям через присоединенные полиномы Лежандра:

$$V(r,\theta,\phi) = a\sum_{n=1}^{k}\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1}\sum_{m=0}^{n}(g_n^m\cos m\phi + h_n^m \sin m\phi)\,P_n^m(\theta),$$

где a – средний радиус Земли (6371,2 км); g_n^m и h_n^m – гауссовы коэффициенты разложения; и r,θ,ϕ – расстояние до центра, коширота (дополнение широты до 90°) и долгота.

В этом случае пространственное разрешение модели можно оценить через минимальную длину волны сферического разложения

$$\lambda = \frac{2\pi R}{k},$$

где k – максимальная степень разложения.

В табл.4 представлена информация по основным источникам магнитного поля Земли и их временным масштабам при инклинометрии в Арктике.

Таблица 4

Основные источники магнитного поля Земли и их временные масштабы

Источник	Амплитуда, нТл	Период изменения	Описание
Внутренние			
Ядро (главное поле)	~50 000	Годы	Сферическое разложение, модели IGRF/WMM
Литосфера (аномалии)	100-1000	Века	Карты аномального поля, модели HRGM
Внешние			
Высокоширотные эффекты	>1000	Часы-дни	Авроральные суббури, непредсказуемы
Среднеширотные эффекты	10-100	Дни	Ионосферное поле, аппроксимируется моделями

* *Saltus R., Alken P., Balmes A. et al.* Magnetic Maps and Models for Alternative Navigation // 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 24-27 April 2023, Monterey, CA, USA. IEEE, 2023. P. 805-813. DOI: 10.1109/PLANS53410.2023.10140025

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Современные модели высокого разрешения типа CAMPUS-CA и BGGM обеспечивают пространственное разрешение 28-38 км, что достаточно для учета региональных аномалий, но недостаточно для локальных эффектов в пределах месторождения. По этой причине для критичного горизонтального бурения в Арктике необходимо использование моделей типа IFR-1 и DIF-1 с пространственным разрешением в первые километры [36].

Обеспечение точностных показателей разработанных моделей и их оперативного обновления требует непрерывных обсерваторских наблюдений общероссийской сети, позволяющих использовать актуальные данные для своевременного учета геомагнитных вариаций, генерируемых процессами во внешних оболочках Земли (ионосфере, магнитосфере). Сильные возмущения магнитного поля в северных широтах приводят к погрешностям измерения азимута скважинными инклинометрами более чем на 2° из-за различия относительно спокойных значений параметров магнитного поля.

В условиях горизонтального бурения в плотной сетке скважин такое изменение азимута неприемлемо и может привести к пересечению соседних скважин. Критическая важность обсерватории возникает при прохождении участков скважины, требующих максимально точного позиционирования (вход в продуктивный пласт, горизонтальная секция, целевая зона). В связи с этим необходимо развертывание в районах Крайнего Севера полноценных геомагнитных обсерваторий вблизи крупных месторождений нефти и газа в дополнение к существующим, а также непрерывное развитие отечественных математических моделей высокого разрешения.

История развития российской сети ИНТЕРМАГНЕТ. Отставание отечественной приборной базы в 1990-е годы и недостаток ресурсов привели к существенной деградации сети магнитных обсерваторий России. Первая российская обсерватория (Иркутск, IRT) вошла в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ только в 1998 г., через 7 лет после основания сети. Дальнейшее восстановление проходило в начале 2000-х годов при поддержке зарубежных институтов, были доведены до уровня ИНТЕРМАГНЕТ обсерватории Борок (BOX), Новосибирск (NVS), Якутск (YAK), Магадан (MGD), Паратунка (PET), Арти (ARS).

Существенные изменения произошли в 2011 г., когда на базе Геофизического центра РАН был создан российский сегмент сети ИНТЕРМАГНЕТ. С этого момента ГЦ РАН установил оборудование мирового уровня в пяти обсерваториях, обеспечив их соответствие международным стандартам.

На сегодняшний день в России действуют 12 магнитных обсерваторий, включая Климовскую (KLI) и Михнево (MHV). Наблюдения обсерваторского класса в заполярных регионах осуществляются на обсерваториях «Белое море» (WSE, Республика Карелия) и «Мыс Шмидта» (CPS, Чукотский АО). Все данные собираются в ЦКП «Аналитический центр геомагнитных данных» ГЦ РАН, являющимся центром российского сегмента ИНТЕРМАГНЕТ.

В последнее время активно ведется развитие обсерваторий «Остров Самойловский» (Республика Саха) и «Сабетта» (п-ов Ямал) силами ГЦ РАН и ИНГГ СО РАН. Тем не менее, текущего покрытия Арктики геомагнитными обсерваториями недостаточно для обеспечения данными всех российских северных месторождений.

Требования к обсерваториям и рекомендации по их размещению для поддержки горизонтального бурения. Основные сложности развития высокоточных пунктов наблюдений в Арктике связаны с труднодоступностью региона, отсутствием требуемой инфраструктуры и необходимостью постоянного присутствия персонала, что выражается в высокой стоимости функционирования. На проекте Ямал СПГ ежегодные затраты на коррекцию магнитных моделей оцениваются в 200000-500000 дол. Стоимость одной полнофункциональной обсерватории составляет не менее 100 млн руб.

При горизонтальном бурении эффективная разработка геомагнитных моделей требует организации сети пунктов векового хода для проведения регулярных наблюдений не реже одного раза в год. Необходимость такой сети следует из анализа ситуации с геомагнитными наблюдениями в России, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке. Исследования показывают, что из-за редкой сети наземных геомагнитных наблюдений в этих регионах современные модели, опирающиеся

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в основном на спутниковые данные, не обеспечивают необходимой точности определения компонент геомагнитного поля.

Оптимальное качество коррекции замеров при горизонтальном бурении достигается на удаленности обсерватории от места проведения работ не более 200 км. Этот радиус обеспечивает надлежащую интерпретацию локальных магнитных аномалий и вариаций.

Рекомендуется размещение не менее пяти специализированных геомагнитных обсерваторий в непосредственной близости к основным арктическим месторождениям нефти и газа, что обеспечит:

- непрерывное обновление региональных моделей в реальном времени;
- интеграцию с существующими системами мониторинга;
- повышение надежности навигационных данных до уровня ±0,5-1,0°;
- снижение рисков аварийных ситуаций на 15-20 %.

Анализ пространственных и временных изменений геомагнитного поля в Арктике для горизонтального бурения. Анализ характера и величин изменений компонент магнитного поля (склонение *D*, наклонение *I*, модуль вектора магнитной индукции *F*) в северных регионах России показывает:

- Магнитное наклонение *I* и модуль вектора F испытывают относительно небольшие и медленные изменения в последние 10-15 лет в северных районах Сибири и Арктике, в то время как магнитное склонение *D* испытывает гораздо более интенсивные пространственные и временные изменения в этих районах.
- Наблюдается более быстрый рост абсолютных значений магнитного склонения, особенно после 2010 г.
- Резкие скачки в годовых изменениях модельной вековой вариации *D* каждые 5 лет обусловлены сменой модели IGRF в эти годы и не являются отображением реальных изменений.
- Даже модели высокого разрешения (WMMHR) дают погрешности определения абсолютного значения магнитного склонения *D* в арктических районах до 0,8°, что подчеркивает необходимость разработки и использования высокоточных локальных моделей.

Эти данные указывают на критическую необходимость развития плотных сетей пунктов векового хода [35] для учета вековой вариации с точностью, необходимой для разработки HRGM и IFR-моделей. В этом контексте особое значение имеют модели уровня IFR-1, такие как DIF-1, разработка которых сопровождается непосредственными высокоточными измерениями компонент *D*, *I* и *F* в районе конкретного месторождения.

Результаты применения высокоточных методов инклинометрии в Арктике

Применение методов геомагнитной коррекции при горизонтальном бурении в условиях Крайнего Севера показало значительные результаты на нескольких месторождениях [32, 37].

Успех внедрения модели DIF-1 на месторождении в Северной Сибири стимулировал разработку аналогичных моделей еще для трех крупных месторождений Арктической зоны РФ. Ежегодная коррекция моделей осуществляется на основе повторных абсолютных наблюдений компонент магнитного поля в контрольных пунктах.

Модель CAMPUS-CA (ГЦ РАН) проходит тестирование и адаптацию на ряде месторождений, в том числе расположенных в Арктической зоне РФ. На арктических месторождениях развертывание специализированных обсерваторий привело к повышению эффективности горизонтального бурения за счет более точного позиционирования ствола в целевых пластах, что позволило увеличить длину продуктивной части скважины и, соответственно, дебит [38, 39]. Применение непрерывного высокочастотного мониторинга магнитного поля с ежеминутным обновлением позволило продолжить процесс извлечения продукта при геомагнитных возмущениях со скоростью изменения более 10 нТл/мин [40].

Заключение

В рамках работы созданы геомагнитные модели CAMPUS-C, CAMPUS-A, CAMPUS-CA и DIF-1. Модель CAMPUS-CA относится к классу HRGM и построена по данным спутников CryoSat-2, Ørsted, CHAMP и Swarm; степень разложения – 38 (1050 коэффициентов Гаусса); модель актуализирована до

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

2024 г. и экстраполирована на 2025-2030 гг. Модель DIF-1 соответствует классу IFR-1 с точностью $D = \pm 0{,}1°$, $I = \pm 0{,}05°$, $F = \pm 50$ нТл.

Разработка и внедрение моделей магнитного поля Земли CAMPUS-CA (ГЦ РАН) и DIF-1 (ИНГГ СО РАН), обеспеченных сетью геомагнитных обсерваторий, является ключевым фактором повышения точности инклинометрических измерений при бурении нефтегазовых скважин в Арктической зоне Российской Федерации, особенно при горизонтальном бурении в условиях плотной сетки скважин. В условиях отсутствия зарубежных поставок, данных о геомагнитном поле и высокой нестабильности магнитного поля на Крайнем Севере, применение российских моделей полностью удовлетворяет жестким требованиям топливно-энергетического комплекса по точности геомагнитных данных при горизонтальном бурении.

Ожидаемые практические результаты:

- Повышение точности инклинометрии на 67-85 % (сокращение погрешности определения азимута при горизонтальном бурении с ±2-3 до ±0,5-1,0°).
- Снижение рисков аварийных ситуаций на 15-20 % за счет более точного позиционирования скважин [32].
- Увеличение нефтеотдачи на 10-15 % благодаря точному размещению горизонтальных участков траектории скважины в продуктивных пластах.
- Повышение эффективности освоения низкопроницаемых коллекторов с коэффициентом извлечения нефти до 40 % и более [41].
- Снижение экологического воздействия на Арктическую зону за счет сокращения числа вертикальных скважин и площади кустовых площадок на 30-40 % [2].
- Повышение технологической независимости России в области геомагнитного обеспечения нефтегазовых проектов горизонтального бурения [42].

Рекомендации по дальнейшему развитию высокоточных геомагнитных наблюдений и моделей магнитного поля:

- Развернуть не менее пяти специализированных геомагнитных обсерваторий в непосредственной близости к основным арктическим месторождениям.
- Организовать сеть пунктов векового хода (не менее 10-15) для мониторинга вековой вариации магнитного поля.
- Обеспечить ежегодное обновление моделей CAMPUS-CA и разработку локальных моделей DIF-1 для каждого крупного месторождения.
- Интегрировать данные российских обсерваторий в Аналитический центр геомагнитных данных ГЦ РАН с ежеминутной периодичностью.
- Организовать подготовку специалистов для обслуживания обсерваторий и интерпретации геомагнитных данных при решении задач горизонтального бурения.
- Включить требования к использованию высокоточных геомагнитных моделей в технологические регламенты бурения горизонтальных скважин на всех арктических месторождениях.

Таким образом, внедрение интегрированной системы геомагнитного мониторинга и высокоточных моделей магнитного поля Земли формирует устойчивую технологическую базу для успешного и безопасного развития нефтегазового потенциала России в Арктике и имеет стратегическое значение для национальной безопасности и экономического развития.

Авторы выражают благодарность Е.С.Коняеву, инженеру Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука, за замечания и уточнения, способствовавшие улучшению рукописи; Д.А.Кулешову, научному сотруднику Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука, за ценные замечания по использованной геомагнитной модели DIF-1; Р.В.Сидорову, канд. физ.-мат. наук, ведущему научному сотруднику Геофизического центра РАН, за перевод статьи на английский язык.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др.* Снижение устойчивости инфраструктуры ТЭК России в Арктике как следствие повышения среднегодовой температуры приповерхностного слоя криолитозоны // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 4. С. 303-314. DOI: 10.31857/S0869587322040053

2. *Zhdaneev O.V., Frolov K.N.* Technological and institutional priorities of the oil and gas complex of the Russian Federation in the term of the world energy transition // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 58. P. 1418-1428. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.285

3. *Новак А.* Российский ТЭК 2022: вызовы, итоги и перспективы // Энергетическая политика. 2023. № 2 (180). С. 4-11. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_2180_4

4. *Rylance M., Aliyev S.A., Makarov A. et al.* Paradigm Shift: Pad Optimisation for a Potential Tight-Gas Development in Russia // SPE Russian Petroleum Technology Conference, 26-29 October 2020. OnePetro, 2020. № SPE-201989-MS. DOI: 10.2118/201989-MS

5. *El Sabeh K., Gaurina-Međimurec N., Mijić P. et al.* Extended-Reach Drilling (ERD) – The Main Problems and Current Achievements // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 7. № 4112. DOI: 10.3390/app13074112

6. *Gupta V.P., Yeap A.H., Fischer K.M. et al.* Expanding the Extended Reach Envelope at Chayvo Field, Sakhalin Island // IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 4-6 March 2014, Fort Worth, TX, USA. OnePetro, 2014. № SPE-168055-MS. DOI: 10.2118/168055-MS

7. *Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Ощенко А.А., Зайцев А.Н.* О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в российской Арктике // Физика Земли. 2022. № 3. С. 136-152. DOI: 10.31857/S0002333722020120

8. *Onovughe E., Otobong T.* Geomagnetic Referencing Techniques as Vital Directional Reference in Hydrocarbon Drilling // Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies. 2016. Vol. 2. Iss. 8. P. 836-841.

9. *Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю.* Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Физика Земли. 2018. № 4. С. 19-30. DOI: 10.1134/S0002333718040051

10. *Livermore P.W., Finlay C.C., Bayliff M.* Recent north magnetic pole acceleration towards Siberia caused by flux lobe elongation // Nature Geoscience. 2020. Vol. 13. Iss. 5. P. 387-391. DOI: 10.1038/s41561-020-0570-9

11. *Ziehm T., Pare A., Willerth M. et al.* Eliminating Drilling and Surveying Delays from Solar Storms with a Deployed Magnetic Observatory and Modern Workflow // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 20-22 October 2025, Houston, TX, USA. OnePetro, 2025. № SPE-228045-MS. DOI: 10.2118/228045-MS

12. *Ledroz A.G., Weston J.L.* Patent № US 11041376 B2. Gyro-Magnetic Wellbore Surveying. Publ. 22.06.2021.

13. *Жданеев О.В., Зайцев А.В., Продан Т.Т.* О возможностях создания российской высокотехнологичной компоновки низа бурильной колонны // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 872-884. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.9

14. *Жданеев О.В., Зайцев А.В., Лобанков В.М.* Метрологическое обеспечение аппаратуры для геофизических исследований // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 667-677. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.9

15. *Khomutov S.Yu.* Problems of Processing of Raw Data from Magnetic Observatories: Will Modern Mathematical Technologies Help? // Russian Journal of Earth Sciences. 2025. Vol. 25. № 2. № ES2022. DOI: 10.2205/2025ES000994

16. *Califf S., Nair M., Weimer D. et al.* Assessment of the Weimer Geomagnetic Perturbation Model for High-Latitude Positioning and Navigation // Space Weather. 2024. Vol. 22. Iss. 10. № e2024SW004005. DOI: 10.1029/2024SW004005

17. *Жданеев О.В., Овсянников И.Р.* От импортозамещения к технологическому лидерству: как политика местного содержания ускоряет развитие нефтегазовой отрасли // Записки Горного института. 2025. Т. 274. С. 177-194.

18. *Соловьев А.А., Сидоров Р.В., Ощенко А.А., Зайцев А.Н.* О необходимости высокоточного мониторинга геомагнитного поля при наклонно-направленном бурении в российской Арктике // Физика Земли. 2022. № 3. С. 136-152. DOI: 10.31857/S0002333722020120

19. *Ruifeng Yu, Binbin Diao, Deli Gao.* Calculation for Wellbore Trajectory Measurement Error Incorporating Magnetic Azimuth Correction // Petroleum Drilling Techniques. 2023. Vol. 51. № 6. P. 25-31. DOI: 10.11911/syztjs.2023056

20. *Momot F., Humbled F., Garbers M. et al.* First Onsite Automatic Geomagnetic Observatory Improves Well-Bore Positioning // International Petroleum Technology Conference, 26-28 March 2019, Beijing, China. OnePetro, 2019. № IPTC-19395-MS. DOI: 10.2523/IPTC-19395-MS

21. *Firsov I., Kudin D., Soloviev A. et al.* GCRAS candidate field models for IGRF-14 // Earth, Planets and Space. 2026. Vol. 78. № 9. DOI: 10.1186/s40623-025-02318-2

22. *Hammer M.D., Finlay C.C., Olsen N.* Applications for CryoSat-2 satellite magnetic data in studies of Earth's core field variations // Earth, Planets and Space. 2021. Vol. 73. № 73. DOI: 10.1186/s40623-021-01365-9

23. *Park J., Stolle C., Yamazaki Y. et al.* Diagnosing low-/mid-latitude ionospheric currents using platform magnetometers: CryoSat-2 and GRACE-FO // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. № 162. DOI: 10.1186/s40623-020-01274-3

24. *Olsen N., Albini G., Bouffard J. et al.* Magnetic observations from CryoSat-2: calibration and processing of satellite platform magnetometer data // Earth, Planets and Space. 2020. Vol. 72. № 48. DOI: 10.1186/s40623-020-01171-9

25. *Neubert T., Mandea M., Hulot G. et al.* Ørsted satellite captures high-precision geomagnetic field data // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2001. Vol. 82. Iss. 7. P. 81-88. DOI: 10.1029/01EO00043

26. *Nielsen O.V., Petersen J.R., Primdahl F. et al.* Development, construction and analysis of the 'OErsted' fluxgate magnetometer // Measurement Science and Technology. 1995. Vol. 6. № 8. P. 1099-1115. DOI: 10.1088/0957-0233/6/8/004

27. *Reigber C., Lühr H., Grunwaldt L. et al.* CHAMP Mission 5 Years in Orbit // Observation of the Earth System from Space. Springer, 2006. P. 3-15. DOI: 10.1007/3-540-29522-4_1

28. *Olsen N., Finlay C.C., Kotsiaros S., Tøffner-Clausen L.* A model of Earth's magnetic field derived from 2 years of Swarm satellite constellation data // Earth, Planets and Space. 2016. Vol. 68. № 124. DOI: 10.1186/s40623-016-0488-z

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

29. *Yi Jiang, Holme R., Yong Jiang.* Investigation of the consistency of Swarm data and CHAOS-6 towards crustal magnetic field studies in China // Applied Geophysics. 2023. Vol. 20. Iss. 4. P. 422-431. DOI: 10.1007/s11770-021-0968-1

30. *Meyer B., Chulliat A., Saltus R.* Derivation and Error Analysis of the Earth Magnetic Anomaly Grid at 2 arc min Resolution Version 3 (EMAG2v3) // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2017. Vol. 18. Iss. 12. P. 4522-4537. DOI: 10.1002/2017GC007280

31. *Lesur V., Hamoudi M., Yujin Choi et al.* Building the second version of the World Digital Magnetic Anomaly Map (WDMAM) // Earth, Planets and Space. 2016. Vol. 68. № 27. DOI: 10.1186/s40623-016-0404-6

32. *Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Петров В.Г. и др.* Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 25. № 4. С. 71-82. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-4-71-82

33. *Chulliat A., Vigneron P., Thébault E. et al.* Swarm SCARF Dedicated Ionospheric Field Inversion chain // Earth, Planets and Space. 2013. Vol. 65. Iss. 11. P. 1271-1283. DOI: 10.5047/eps.2013.08.006

34. *Sado P., Clausen L.B.N., Miloch W.J., Nickisch H.* Substorm Onset Prediction Using Machine Learning Classified Auroral Images // Space Weather. 2023. Vol. 21. Iss. 2. № e2022SW003300. DOI: 10.1029/2022SW003300

35. *Кулешов Д.А., Дядьков П.Г., Плоткин В.В.* Методика выделения и учета вековой вариации при проведении высокоточных геомагнитных наблюдений (на примере Алтайского геодинамического полигона) // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 2. С. 312-321. DOI: 10.15372/GiG2019161

36. *Califf S., Nair M., Weimer D. et al.* Assessment of the Weimer Geomagnetic Perturbation Model for High-Latitude Positioning and Navigation // Space Weather. 2024. Vol. 22. Iss. 10. № e2024SW004005. DOI: 10.1029/2024SW004005

37. *Бухтояров Б.Н., Старикова О.Р., Виноградова А.А.* Коррекция азимута скважин в наклонно-направленном бурении // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 25. № 5. С. 55-67. DOI: 10.56195/20793332-2025-25-5-55-67

38. *Ziehm T., Pare A., Willerth M. et al.* Eliminating Drilling and Surveying Delays from Solar Storms with a Deployed Magnetic Observatory and Modern Workflow // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 20-22 October 2025, Houston, TX, USA. OnePetro, 2025. № SPE-228045-MS. DOI: 10.2118/228045-MS

39. *Beggan C.D., Clarke E., Knight P. et al.* Assessing the Absolute and Relative Accuracy of Magnetic Variometers Compared to Observatory Data for IFR2 // SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, 4-6 March 2025, Stavanger, Norway. OnePetro, 2025. № SPE-223681-MS. DOI: 10.2118/223681-MS

40. *Marr T., Schiermeier P.* Application of MWD Survey Corrections in Real Time // SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 26-28 January 2016, Abu Dhabi, UAE. OnePetro, 2016. № SPE-178172-MS. DOI: 10.2118/178172-MS

41. *Жданеев О.В.* Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 1061-1078. DOI: 10.31897/PMI.2022.107

42. *Соловьев А.А.* Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения // Вестник РАН. 2024. Т. 94. № 10. С. 871-877. DOI: 10.31857/S0869587324100023

***Авторы*: Вячеслав Николаевич Глинских,** *д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, директор* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука, Новосибирск, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-6275-3612, **Петр Георгиевич Дядьков,** *канд. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука, Новосибирск, Россия*), *доцент* (*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*), https://orcid.org/0000-0001-5345-9331, **Олег Валерьевич Жданеев,** *д-р техн. наук, профессор* (*Казанский* (*Приволжский*) *федеральный университет, Казань, Республика Татарстан, Россия*), *профессор* (*Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Россия*), *руководитель* (*Центр компетенций технологического развития ТЭК при Минэнерго России, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-5287-4397, **Александр Викторович Зайцев,** *эксперт* (*Российское энергетическое агентство Минэнерго России, Москва, Россия*), *zaycev@rosenergo.gov.ru*, https://orcid.org/0000-0002-3985-0382, **Дмитрий Владимирович Кудин,** *канд. техн. наук, заведующий сектором* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-9174-224X, **Анатолий Александрович Соловьев,** *д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН, директор* (*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0002-6476-9471.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0