

ГЕОМАГНИТНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ

© 2024 г. А.А. Соловьёв^{a,b,*}

^aГеофизический центр РАН, Москва, Россия

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*E-mail: a.soloviev@gcras.ru

Поступила в редакцию 09.07.2024 г.

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 04.08.2024 г.

Высокотехнологичная процедура наклонно-направленного бурения (ННБ) при освоении углеводородных ресурсов требует большой точности позиционирования буровой колонны. Такая точность может быть достигнута с помощью навигации по магнитному полю Земли (МПЗ), что обеспечивает попадание в заданную цель с погрешностью 3 м на расстоянии 15 км. Однако МПЗ характеризуется разномасштабной вариабельностью как по пространству, так и по времени. Поэтому полный цикл геомагнитного сопровождения ННБ включает детальную оценку пространственно-временной изменчивости МПЗ в окрестности месторождения в реальном времени и прогноз геомагнитной активности. Особенно строгий контроль ориентации буровой колонны необходим при бурении в Арктическом регионе. Автор рассматривает современные технологии эффективного учёта особенностей пространственно-временной структуры МПЗ для обеспечения прецизионной навигации буровой колонны. Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на заседании президиума РАН 11 июня 2024 г.

Ключевые слова: наклонно-направленное бурение, шельф, углеводороды, геомагнитное сопровождение, геомагнетизм, модели, магнитные обсерватории.

DOI: 10.31857/S0869587324100023, **EDN:** ESNEDD

В условиях истощения углеводородных ресурсов нашей планеты требуются всё более инновационные методы их добычи. Так, половина добытой с конца 1990-х годов нефти стала результатом не освоения новых месторождений, а оптимизации разработки уже разведанных. Для извлечения труднодоступных залежей углеводородного сырья с недавних пор в практику вводится технология наклонно-направленного бурения. При навигации по магнитному полю Земли (МПЗ) в реальном времени

этот высокотехнологичный процесс бурения позволяет достигать максимальной точности попадания в нефтегазоносный пласт на больших расстояниях. Соответствующая наукоёмкая технология впервые была внедрена компанией Schlumberger около 15 лет назад при добыче углеводородного сырья на арктической Аляске [1]. Геофизический центр РАН стоял у истоков внедрения этой технологии в России по заказу российского филиала компании Schlumberger (2011 г.).

Наклонно-направленное бурение (ННБ) позволяет планомерно отклоняться от вертикали по заранее заданной кривой с выходом практически в горизонтальную плоскость и строить скважины протяжённостью свыше 10 км. Горизонтальными называются такие скважины, которые вскрывают продуктивный пласт на интервале, не менее чем вдвое превышающем толщину пласта. Их ствол может иметь сложный пространственный профиль, причём как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях. Это, в свою очередь, открывает возможность многоствольного или кустового бурения, при котором с одной кустовой площадки бурятся



СОЛОВЬЁВ Анатолий Александрович — член-корреспондент РАН, директор ГЦ РАН, главный научный сотрудник ИФЗ РАН.

десятки скважин. Кустовое бурение востребовано на шельфовых месторождениях, где ввиду сложных природно-климатических условий (например, на сильно заболоченной территории) расширение промысловой инфраструктуры затруднено и требует больших капиталовложений. Технология широко применима при добыче углеводородного сырья на арктическом шельфе в связи с тем, что стоимость бурения с суши, при котором целевой пласт достигается на большом удалении от устья скважины, в разы ниже, чем затраты на возведение морской платформы, с которой осуществляется классическое вертикальное бурение.

На рисунке 1 приведён реальный пример кустового бурения в условиях плотной сетки. Характерные расстояния между скважинами составляют несколько десятков метров, поэтому одна из основных особенностей их проводки кустами — необходимость соблюдения условий непересечения стволов скважин. Таким образом, технология ННБ неизбежно требует высокой точности позиционирования и навигации, которую не способны обеспечить традиционные гироскопические измерения. С этой целью буровая колонна оснащается специальной инклинометрической системой. Она включает в себя трёхосный акселерометр для контроля зенитного угла и трёхосный магнитометр для контроля азимута. Именно по этим двум углам и оцениваются текущие траекторные параметры скважины относительно их проектных значений.

Однако на практике скважинный магнитометр измеряет как естественное магнитное поле, так

и магнитные помехи, создаваемые буровой колонной и другими техногенными источниками. Задача состоит в непрерывной коррекции показаний скважинной инклинометрии и, таким образом, минимизации влияния техногенных помех при определении траекторных параметров скважины. Следовательно, для достижения высокой точности позиционирования необходимо привлекать всю возможную информацию о сложной пространственно-временной структуре естественного магнитного поля в окрестности месторождения.

В первом приближении, чтобы определить генеральное направление на северный магнитный полюс и вычислить истинный азимут буровой колонны, используются модели главного магнитного поля Земли, слабо изменчивого во времени. Модель главного магнитного поля обеспечивает пространственное разрешение порядка 800 км. На рисунке 2а представлено распределение значений магнитного склонения на одном из месторождений. Видно, что на площадке 100×100 км значение склонения главного МПЗ является константой. Однако в действительности магнитное поле сильно изменчиво по пространству ввиду неоднородной намагничённости земной коры. Для оценки таких аномалий привлекаются модели литосферного магнитного поля, которые характеризуются пространственным разрешением порядка 10 км (рис. 2б). В совокупности с моделями главного поля они позволяют выявлять локализованные аномалии склонения магнитного поля, вызванные литосферными источниками, которые

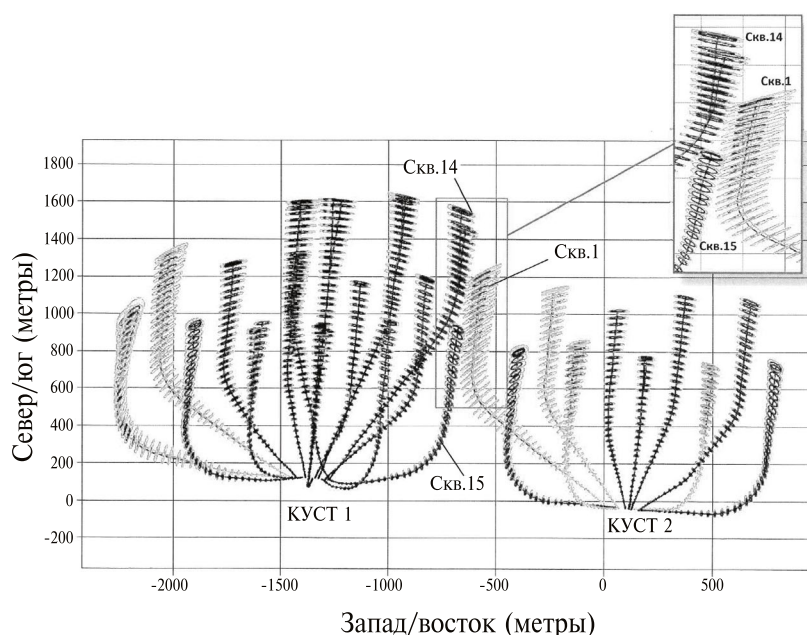


Рис. 1. Кустовое бурение в условиях плотной сетки (горизонтальная проекция):

чёрным цветом обозначены эллипсы пространственной неопределённости существующих стволов, светло-серым — планируемых к проводке

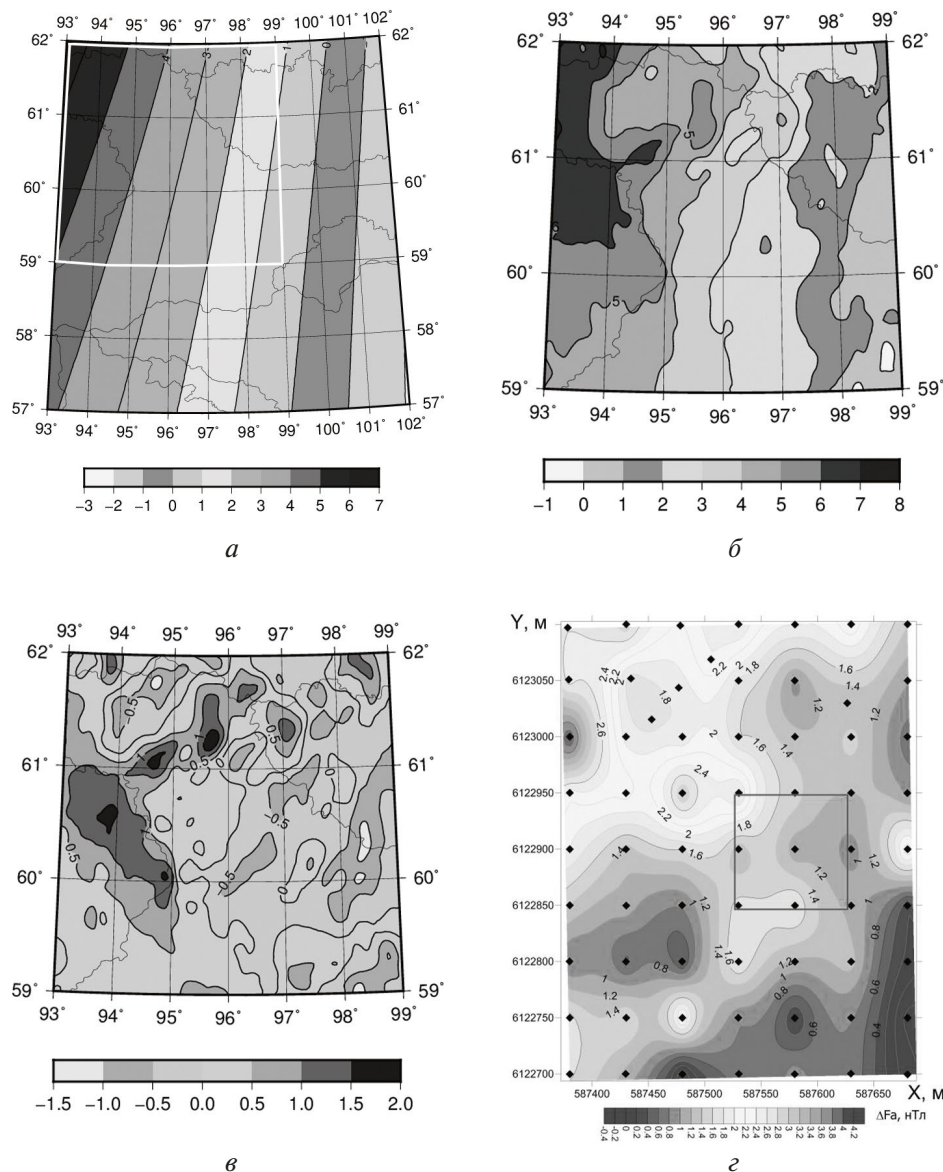


Рис. 2. Точностные характеристики квазистатических моделей МПЗ на поверхности Земли:

магнитное склонение (градусы) главного МПЗ на январь 2016 г. (разрешение ~ 800 км) (а), магнитное склонение полного МПЗ, включая главное и литосферное поля (разрешение ~ 10 км) (б), аномалия склонения МПЗ, вызванная литосферными источниками (разрешение ~ 10 км) (в), локальные измерения аномальной составляющей полной напряжённости МПЗ (разрешение ~ 10 – 100 м) (г)

в приведённом примере могут достигать значений до 2° (рис. 2в). Неучёт таких аномалий недопустим, поскольку точность определения азимута буровой колонны при ННБ не должна превышать 1.5 – 2° . Для учёта локальных неоднородностей магнитного поля непосредственно в окрестности месторождения дополнительно проводится региональная магнитная съёмка для локализации соответствующих источников. Пространственное разрешение таких съёмок составляет 10 – 100 м (рис. 2г). Построение аналитических моделей для адекватного описания полного вектора магнитной индукции в любой за-

данной точке трёхмерной среды представляет собой отдельную наукоёмкую область исследований.

Помимо пространственной неоднородности магнитное поле Земли крайне изменчиво и во времени, особенно сейчас, когда Солнце находится на пике активности — в 2023–2024 гг. магнитные бури происходят в среднем раз в две недели. Для эффективного учёта временной изменчивости МПЗ необходима непрерывная оценка влияния геомагнитных возмущений на показания скважинного магнитометра в реальном времени. Высшее достижение — краткосрочный прогноз мест возникновения сильных

магнитных вариаций и их примерных амплитуд путём создания соответствующих прогнозных моделей.

Таким образом, полный цикл геомагнитного сопровождения ННБ включает в себя следующие этапы:

1. создание моделей главного МПЗ;
2. учёт пространственной изменчивости МПЗ:
 - 2.1. применение моделей литосферного МПЗ;
 - 2.2. моделирование локальных магнитных аномалий земной коры (1-й международный уровень точности IFR1 — In-Field Referencing) [2];
3. учёт временной изменчивости МПЗ:
 - 3.1. оценка влияния геомагнитных возмущений в реальном времени (2-й международный уровень точности IFR2);
 - 3.2. применение прогнозных моделей геомагнитных вариаций.

Для построения высокоточных трёхмерных моделей среды, описывающих пространственную структуру магнитного поля, используется обширный комплекс измерительных систем. Так, низкоорбитальные спутниковые наблюдения с полным географическим охватом планеты обеспечивают получение наилучших данных для построения моделей главного магнитного поля Земли. В настоящее время на такой орбите находится лишь одна спутниковая группировка Swarm, запущенная в 2013 г. Европейским космическим агентством с космодрома Плесецк российской ракетой-носителем [3]. При помощи аэромагнитной и гидросъёмки выполняются измерения, позволяющие строить высокоточные

модели литосферного аномального поля, которое имеет значительно более сложную пространственную структуру. Наконец, для локализации региональных аномалий на месторождении выполняется пешая и беспилотная съёмка магнитного поля.

Как отмечалось выше, помимо пространственной изменчивости необходим учёт временных вариаций геомагнитного поля для достижения требуемой точности позиционирования. Неучёт геомагнитных возмущений может приводить к существенным погрешностям при навигации по магнитному полю. Так, на высоких широтах во время сильных магнитных бурь вариации магнитного склонения могут превышать 10° . Вместе с тем допустимое отклонение азимута скважины от проектного, измеряемое скважинным магнитометром, не должно превышать 2° . Единственный способ учёта вариаций магнитного поля с последующей оперативной коррекцией данных инклинометрии — параллельный высокоточный мониторинг МПЗ на развёрнутой поблизости магнитной обсерватории. Такой мониторинг уменьшает эллипс неопределённости, который описывает ошибку пространственного позиционирования буровой колонны (см. рис. 1), до 70% [1] и позволяет достичь высочайшей точности навигации в режиме реального времени. При такой точности погрешность попадания в цель составляет 3 м на расстоянии 15 км от устья скважины [4].

Магнитная обсерватория представляет собой высокотехнологичную научную инфраструктуру, которая включает два павильона, выполненных из немагнитных материалов. Главное свойство обсерватории — непрерывная регистрация полных

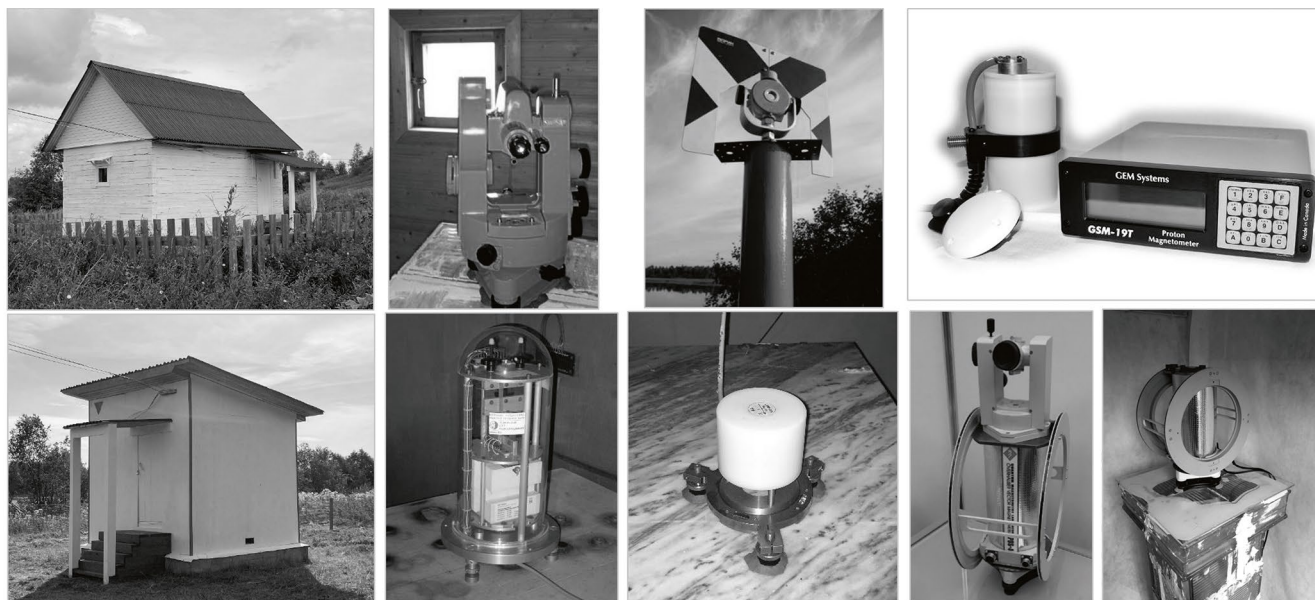


Рис. 3. Современная магнитная обсерватория (на примере обсерватории «Климовская», Архангельская обл.): немагнитные павильоны и измерительная аппаратура

Источник: [6]

значений компонент вектора магнитной индукции. Базовое приборное оснащение обсерватории состоит из векторного феррозондового магнитометра, размещаемого в одном павильоне, скалярного магнитометра и абсолютного магнитометра, размещаемых в другом павильоне, и системы сбора данных. Наивысший стандарт качества измерений регламентируется международной сетью магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ (<http://intermagnet.org>), которая объединяет порядка 150 обсерваторий по всему миру [5]. На рисунке 3 представлены основные элементы современной магнитной обсерватории.

Завершающим звеном полного цикла геомагнитного сопровождения ННБ служит прогнозная компонента. Сами вариации геомагнитного поля на поверхности Земли прогнозировать крайне затруднительно ввиду неоднозначности и сложности порождающих их промежуточных процессов в магнитосфере и ионосфере. Однако хорошо известно, что источником самых сильных возмущений оказывается авроральный овал¹, а именно его южная граница, представляющая собой область дискретных высыпаний. Таким образом, прогноз положения границ аврорального овала может косвенно быть использован для преждевременной локализации сильных возмущений магнитного поля. Такой онлайн-сервис краткосрочного прогноза интенсивности и пространственного распределения полярных сияний был разработан в Геофизическом центре РАН (<http://aurora-forecast.ru>) [7]. Горизонт прогноза составляет 30–70 мин., а входными параметрами служат данные о солнечном ветре, регистрируемые в реальном времени межпланетными спутниками в точке Лагранжа L1. На рисунке 4 показан пример работы онлайн-системы.

На рисунке 5 представлена карта месторождений углеводородного сырья, на которых силами Геофизического центра РАН эффективно внедряется описанная технология полного цикла геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения. Оказываемые услуги включают проведение разновременной и многомасштабной магнитной съёмки, развёртывание магнитных обсерваторий, разработку сервисов передачи данных в реальном времени из обсерватории на буровую, трёхмерное моделирование магнитного поля, экстраполяцию временных вариаций, создание онлайн-сервисов оперативной коррекции скважинной инклинометрии². Данный пример ярко демонстрирует синергетический эффект от связи науки с индустрией. Развёртывание

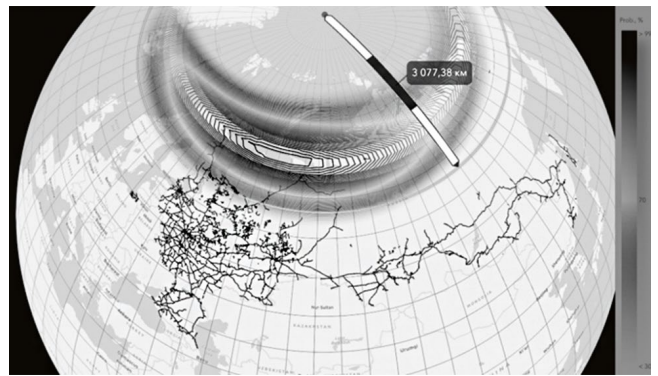


Рис. 4. Моделирование положения аврорального овала на виртуальном глобусе с нанесённой схемой железных дорог РФ

Источник: <http://aurora-forecast.ru>

новых обсерваторий становится вдвойне востребовано и для решения прикладных задач, связанных с освоением месторождений углеводородов, и в фундаментальных исследованиях электромагнитных процессов во всех оболочках Земли — от ядра до околоземного пространства.

* * *

Геомагнитный мониторинг необходим для проведения наклонно-направленного бурения скважин, поскольку геомагнитные возмущения могут оказывать существенное влияние на безопасность процесса и точное вскрытие целевых пластов. Российскими учёными освоен полный цикл геомагнитного сопровождения ННБ, который включает в себя наземную и воздушную геомагнитную съёмку, установку обсерватории, оценку статического и изменчивого во времени магнитных полей в каждой точке телеметрических измерений и в каждый момент времени, а также прогноз геомагнитных возмущений. Технологический суверенитет Российской Федерации в области высокотехнологичного процесса наклонно-направленного бурения будет полностью обеспечен при выполнении следующих трёх условий.

Первое условие — реализация запуска российской спутниковой миссии для высокоточных измерений электромагнитного поля Земли на низкой приполярной орбите. Это позволит получать данные, необходимые не только для построения высокоточной отечественной модели главного МПЗ, но и для решения широкого спектра задач, связанных с навигацией по магнитному полю. На данный момент на такой орбите находится лишь одна спутниковая миссия Европейского космического агентства, которая в скором времени прекратит своё существование.

Второе условие — проведение полномасштабной аэромагнитной съёмки территории Российской Федерации на современном уровне. Последний

¹ Авроральный овал — область атмосферы шириной в несколько градусов, в которой наиболее часто наблюдаются полярные сияния и регистрируются самые мощные магнитные возмущения.

² В работе используются данные и сервисы ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<https://ckp.gcras.ru/>).

- resources in the Arctic and subarctic regions of Russia // All-Russian conference with international participation “Global problems of the Arctic and Antarctic”, dedicated to the 90th anniversary of academician Nikolai Pavlovich Laverov (2–5 November 2020, Arkhangelsk). Materials. FITZ for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov of the RAS, 2020, pp. 15–20. (In Russ.).
5. Love J.J., Chulliat A. An International Network of Magnetic Observatories. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94, 373–374. <https://doi.org/10.1002/2013EO420001>
 6. Соловьёв А.А., Сидоров Р.В., Краснощёров Р.И. и др. Новая геомагнитная обсерватория “Климовская” // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. Т. 56. № 3. С. 365–379.
 7. Воробьёв А.В., Соловьёв А.А., Пилипенко В.А., Воробьёва Г.Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 2. С. 93–100. DOI: 10.12737/szf-82202213
- Soloviev A.A., Sidorov R.V., Krasnoperov R.I. et al. “Klimovskaya”: A New Geomagnetic Observatory // Geomagnetism and Aeronomy. 2016, vol. 56, no. 3, pp. 342–354. <https://doi.org/10.1134/S0016793216030154>*
- Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis // Solar-Terrestrial Physics. 2022, vol. 8, iss. 2, pp. 84–90. DOI: 10.12737/stp-82202213*

GEOMAGNETIC SUPPORT FOR DIRECTIONAL DRILLING

A.A. Soloviev^{a,b,*}

^a*Geophysical Center RAS, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: a.soloviev@gcras.ru

The high-tech directional drilling (DD) procedure for the development of hydrocarbon resources requires high precision positioning of the drill string. Such accuracy can be achieved by navigation based on the Earth’s magnetic field (EMF), which ensures hitting a given target with an error of 3 m at a distance of 15 km. However, the EMF is characterized by multi-scale variability both in space and time. Therefore, the full stack of DD geomagnetic support includes a detailed, real-time estimation of the EMF spatio-temporal variability in the deposit region and geomagnetic activity forecast. Particularly strict control of a drill string orientation is required when drilling in the Arctic region. The article is devoted to modern technologies for effective accounting of the features of the EMF space-time structure to ensure precise navigation of the drill string.

The paper is based on the report delivered at the RAS Presidium meeting on 11 June 2024.

Keywords: directional drilling, shelf, hydrocarbons, geomagnetic support, geomagnetism, models, magnetic observatories.