ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2):156-170
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.27:004.9 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_156

ПОДХОД К ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОМ БУРЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВАРИАБЕЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

А.В. Воробьев[1], Н.К. Ханнанов[2], Г.Р. Воробьева[2]

[1] Геофизический центр РАН, Москва, Россия
[2] Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, e-mail: nael20000@yandex.ru

Аннотация: Арктическая зона РФ, содержащая свыше 20% запасов нефти и 75% запасов газа, характеризуется высокой вариабельностью геомагнитного поля, что создает значительные риски при разработке трудноизвлекаемых запасов углеводородов методами наклонно-направленного бурения. Геомагнитные возмущения, вызванные изменениями космической погоды, снижают точность магнитной инклинометрии, что требует разработки методов оперативного прогнозирования и учета этих возмущений для минимизации технологических рисков. Предложен научно обоснованный подход к поддержке принятия решений при наклонно-направленном бурении в высокоширотных регионах. Подход основан на прогнозировании дополнительной погрешности магнитных инклинометров, вызванной экстремальными вариациями геомагнитного поля. Проанализированы взаимосвязи между параметрами солнечного ветра, геомагнитными возмущениями и погрешностью магнитных измерений, что позволило установить ключевые корреляции, используемые в качестве основы для принятия решений. Разработана система поддержки принятия решений, включающая интеллектуальный анализ данных для прогнозирования погрешности инклинометрии. Наибольшую точность прогноза продемонстрировали алгоритмы градиентного бустинга, обеспечивающие среднюю абсолютную ошибку ~0,18° и коэффициент детерминации R^2~0,85. Полученные результаты способствуют снижению рисков, связанных с недостаточной изученностью механизмов формирования геомагнитных вариаций в авроральном овале, а также с отсутствием оперативных данных о состоянии геомагнитного поля. Предлагаемый подход открывает новые возможности для повышения точности и безопасности наклонно-направленного бурения в условиях высокой геомагнитной активности.

Ключевые слова: геомагнитные возмущения, наклонно-направленное бурение, магнитная инклинометрия, машинное обучение, прогнозирование геомагнитных возмущений.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010-П).

Для цитирования: *Воробьев А. В., Ханнанов Н. К., Воробьева Г. Р.* Подход к поддержке принятия решений при наклонно-направленном бурении в условиях вариабельной геомагнитной обстановки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2. – С. 156–170. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_156.

An approach to decision support in directional drilling in variable geomagnetic conditions

A.V. Vorobev[1], N.K. Hannanov[2], G.R. Vorobeva[2]

[1] Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2] Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, e-mail: nael20000@yandex.ru

Abstract: The Arctic zone of Russia, holding over 25% of oil reserves and 75% of gas reserves, features a high variability of the geomagnetic field, which implies added risks in production of hard-to-recover hydrocarbons using the methods of directional drilling. Geomagnetic perturbations due to changes in the space weather reduce accuracy of magnetic inclinometer survey. This calls for new methods of fast prediction and recording of these perturbations for the minimization of technological hazards. This article proposes a science-based approach to support decision-making in directional drilling in the high-latitude regions. The approach involves prediction of a complementary error of magnetic inclinometers due to the extreme variations in the geomagnetic field. The analysis of the interrelation between parameters of solar wind, geomagnetic perturbations and magnetometry errors allowed determining key correlations to be used as a framework for the decision-making. The system of the decision support is developed, including the data mining for the prediction of the inclinometer survey errors. The best prediction accuracy belongs in the gradient boosting algorithms which provide an average absolute error of ~0.18° at the coefficient of determination R^2 ~0.85. The results facilitate reduction of risks connected with the understudy of mechanisms of geomagnetic variations in the auroral zone, and with the lack of the immediate data on the condition of the geomagnetic field. The proposed approach opens up new opportunities of enhancing precision and safety of directional drilling under high geomagnetic activity.

Key words: geomagnetic perturbations, directional drilling, magnetic inclinometer survey, machine learning, geomagnetic perturbation prediction.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 21-77-30010-P).

For citation: Vorobev A. V., Hannanov N. K., Vorobeva G. R. An approach to decision support in directional drilling in variable geomagnetic conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2):156-170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_2_0_156.

Введение

Основная проблема, с которой сталкивается мировая нефтегазовая промышленность — это истощение легкодоступных месторождений при продолжающемся росте глобального спроса на углеводороды. Эта тенденция четко прослеживается в прогнозах энергопотребления: если в 2014 г. нефть обеспечивала около 3,6 трлн т нефтяного эквивалента, то к 2035 г. этот показатель может превысить 4 трлн т [1]. В таких условиях особую значимость приобретает освоение трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), особенно в арктических регионах. Для России стратегическим приоритетом становится минимизация рисков при разработке месторождений арктического шельфа в пределах Арктической зоны РФ (АЗРФ) [2]. По оценкам экспертов, к 2050 г. до 20—30% российской добычи углеводородов будет обеспечиваться именно за счет арктических ресурсов [3].

Современное освоение ТРИЗ активно использует технологию наклонно-направленного бурения (ННБ), где критически важна высокая точность позиционирования бурового инструмента, обеспечиваемая в том числе магнитными инклинометрическими системами [4—6]. Однако точность таких измерений существенно снижается из-за воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли [7], приводящего даже при умеренных геомагнитных вариациях (ГМВ) к ошибкам в определении азимутального и зенитного углов, превышающим 12,5° [8], что особенно критично для арктических и субарктических месторождений в пределах аврорального овала.

Несмотря на существенный прогресс в развитии современных методов оценки техносферных рисков в АЗРФ, включающих анализ влияния геомагнитных возмущений на системы железнодорожной автоматики в Арктике [9], системную оценку геофизических факторов для транспортной инфраструктуры [10], платформы хранения и обработки больших данных для геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения [11], интерпретацию природных индикаторов космической погоды для оценки рисков в высокоширотных энергосистемах [12], реализацию мониторинга магнитного поля для оперативных приложений [13], применение машинного обучения для распознавания экстремальных геомагнитных событий [14] и геоинформационный анализ климатических изменений для развития железнодорожной сети в АЗРФ [15], создание полнофункциональной проблемно-ориентированной системы поддержки принятия решений (СППР), остается актуальной научно-технической задачей с высоким прикладным значением для нефтегазовой отрасли.

Таким образом, целью работы является создание научно обоснованного подхода к поддержке принятия решений в процессе управления технологическими процессами разработки нефтегазовых ТРИЗов, реализуемых на высоких широтах. Целью разрабатываемого подхода является снижение рисков, вызванных систематическим отсутствием актуальных данных о состоянии геомагнитного поля (ГМП), их фрагментарности и несформировавшимся пониманием механизмов возникновения и развития геомагнитных вариаций (ГМВ) внутри аврорального овала. Также подход нацелен на повышение уровня ситуационной осведомленности о потен-

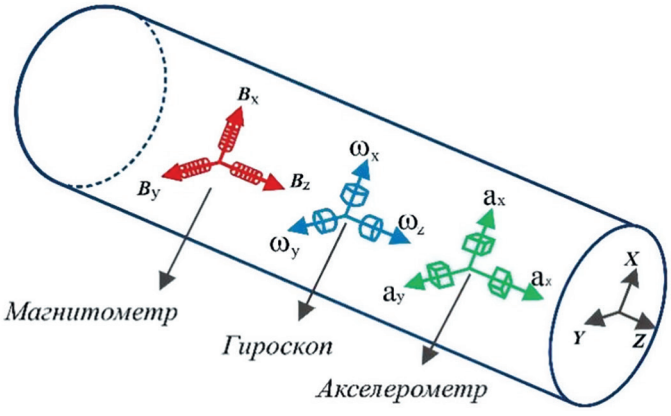


Рис. 1. Схема инклинометрической системы, используемой в процессе ННБ [4]
Fig. 1. Diagram of the inclinometer system used in the directional drilling process [4]

циальном воздействии солнечного ветра на метрологические характеристики магнитных инклинометров путем прогнозирования соответствующей составляющей дополнительной погрешности.

Методология прогнозирования экстремальной дополнительной погрешности магнитных инклинометров

В процессе ННБ контроль траектории ствола скважины проводится с использованием инклинометрических систем, как правило, состоящих из набора трехосных приборов: гироскопа, акселерометра и магнитометра (рис. 1).

Инклинометрическая система размещается соосно с основной осью бурового инструмента в привязанной системе координат *XYZ*, где ось *Z* направлена вдоль продольной оси инструмента, а поперечные оси *X* и *Y* образуют ортогональную плоскость, перпендикулярную этой оси. При этом критически важным параметром пространственной ориентации выступает азимутальный угол, определяемый как угол в горизонтальной плоскости между направлением на магнитный север и проекцией оси инструмента, отсчитываемый против часовой стрелки в соответствии с общепринятыми геодезическими стандартами. Данный угол рассчитывается в соответствии с выражением (1) и служит ключевым параметром при управлении траекторией бурения, обеспечивая точность пространственного позиционирования бурового инструмента в процессе выполнения наклонно-направленных скважин.

$$\psi = \arctan \frac{\|G\|\left(B_z g_x - B_x g_z\right)}{B_y\left(g_x^2 + g_z^2\right) - g_y\left(B_x g_x + B_z g_z\right)}, \text{ град}, \qquad (1)$$

где $\|G\|$ — норма вектора ускорения свободного падения, м/с^2; g_x, g_y, g_z — составляющие вектора ускорения свободного падения акселерометра, м/с^2; B_x, B_y, B_z — индукция магнитного поля вдоль осей *X*, *Y* и *Z* магнитометра соответственно, нТл.

Показания трехосного магнитометра, входящего в состав инклинометрической системы при определении ориентации бурового инструмента в пространстве, учитываются также согласно выражению (1). Из него же следует, что точность измерений магнитометра имеет определяющую значимость в процессе ННБ.

Согласно действующей руководящей документации (РД 153-39.0-072-01), допустимая основная погрешность измерения азимута для зенитных углов более 3° не должна превышать ±2°, а основная погрешность измерения зенитного угла должна укладываться в диапазон ±0,5°. При этом, как показывают исследования [4 — 6, 13], в периоды ГМВ дополнительная погрешность магнитных инклинометров может существенно превышать данный предел. Экстремальные же возмущения ГМП (например, магнитосферные суперсуббури или SSS-события [16]) могут создавать погрешности, превышающие максимальный порог в 2 и более раза (см. табл. 2).

Для оценки погрешностей предложено использовать индексы геомагнитной активности (SML, SMU, SME), которые рассчитываются по данным наземных станций и коррелируют с суббуревой активностью. Однако, как показывает опыт, наиболее значимым является SML-индекс (от англ. SuperMAG Lower), имеющий наивысшую корреляцию с фазами развития магнитосферных суббурь. SSS-событие характеризуется значением SML ⩽ –2500 нТл [17 — 20].

При этом одним из ключевых предикторов SSS-событий является функция скорости переноса магнитного потока на дневной стороне магнитопаузы $d\Phi_{MP}/dt$ [21].

В качестве альтернативного предиктора часто используется параметр vB_s, где v — полный вектор скорости частиц солнечного ветра, а $B_s = B_z$, если $B_z < 0$. Функция $d\Phi_{MP}/dt$ рассчитывается согласно [21] по эмпирической формуле

$$d\Phi_{MP} / dt = v^{4/3} B_T^{2/3} \sin^{8/3}\left(\theta_c / 2\right),$$

км/с$^{4/3}$·нТл$^{2/3}$, (2)

где v — полный вектор скорости частиц солнечного ветра, км/с; B_T — полный вектор магнитной индукции межпланетного магнитного поля (ММП), нТл; θ_C — часовой угол ММП, рассчитываемый согласно выражению $\theta_C = \arctan(B_y/B_z)$, где B_y, B_z — составляющие вектора магнитной индукции ММП в геоцентрической солнечно-магнитной системе координат по оси Y и по оси Z соответственно, нТл.

Методика поддержки принятия решений при магнитных измерениях во время бурения

Поддержка принятия решений при проведении магнитных измерений реализуется поэтапно в соответствии с разработанной методикой (табл. 1).

Так, согласно предлагаемой методике, на первом этапе реализуется сбор данных о состоянии ГМП в окрестности эксплуатации магнитного инклинометра

Таблица 1

Основные этапы методики поддержки принятия решений при магнитных измерениях во время бурения
Main stages of the decision support methodology for magnetic measurements during drilling

№ п/п	Процесс	Результат
1	Сбор данных о ГМП	$\{B_N, B_E, B_V\}$
2	Расчет эмпирических значений магнитного склонения и магнитного наклонения	$\{B_N, B_E, B_V, D, I\}$
3	Расчет эталонных значений магнитного склонения и магнитного наклонения	$\{B_N, B_E, B_V, D, I, D_0, I_0\}$
4	Вычисление отклонений между эмпирическими и эталонными значениями магнитного склонения и магнитного наклонения	$\{\Delta I, \Delta D\}$
5	Сбор данных о солнечном ветре	$\{v, n, B_X, B_Y, B_Z\}$
6	Расчет времени распространения солнечного ветра	$\{v, n, B_X, B_Y, B_Z, t\}$
7	Формирование базы данных	$\{v, n, B_X, B_Y, B_Z, t, \Delta I, \Delta D\}$
8	Регистрация актуальных значений параметров солнечного ветра	$\{v', n', B'_X, B'_Y, B'_Z, t'\}$
9	Прогнозирование погрешности	$\{\Delta I', \Delta D'\}$

Примечание: B_N, B_E, B_V — северная, восточная и вертикальная компоненты ГМП соответственно, [нТл]; D, I — измеренные значения магнитного склонения и магнитного наклонения соответственно, [град]; D_0, I_0 — эталонные значения магнитного склонения и магнитного наклонения соответственно, [град]; ΔD, ΔI — абсолютные величины дополнительной погрешности магнитного склонения и магнитного наклонения соответственно, [град]; v — скорость солнечного ветра, [км/с]; n — плотность солнечного ветра, [см$^{-3}$]; B_X, B_Y, B_Z — составляющие вектора индукции ММП по осям X, Y и Z в системе GSM (Geocentric Solar Magnetic) соответственно, [нТл]; t — время преодоления расстояния от точки L_1 до поверхности Земли, [с]; v', [км/с]; n', [см], B'_X, [нТл]; B'_Y, [нТл]; B'_Z, [нТл]; t', [с]; $\Delta I'$, [град]; $\Delta D'$, [град.] — актуальные значения соответствующих параметров, зарегистрированные в реальном времени.

(B_N, B_E, B_V — северная, восточная и вертикальная компоненты ГМП соответственно, нТл), затем на основании полученных данных в соответствии с формулами (3) — (4) осуществляется расчет значений магнитного склонения D и магнитного наклонения I соответственно.

Далее на основе актуализированной модели главного поля производится расчет эталонных значений углов магнитного склонения D_0 и магнитного наклонения I_0 в окрестности эксплуатации магнитного инклинометра.

$$D = \frac{180}{\pi} \cdot \begin{cases} \arctan(B_N / B_E), \text{ если } B_E > 0 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan(B_E / B_N), \text{ если } B_N > 0 \\ -\frac{\pi}{2} - \arctan(B_E / B_N), \text{ если } B_N < 0 \\ \arctan(B_N / B_E) \pm \pi, \text{ если } B_E < 0 \\ \varnothing, \text{ если } B_E = 0 \text{ и } B_N = 0 \end{cases}, \text{ град.,} \quad (3)$$

где π = 3,1415; B_N и B_E — северная и восточная компоненты ГМП соответственно, нТл.

$$I = 90^\circ - \frac{180}{\pi} \cdot \begin{cases} \arctan\left(\sqrt{B_N^2 + B_E^2} / B_V\right), \text{если } B_V > 0 \\ \frac{\pi}{2} - \arctan\left(B_V / \sqrt{B_N^2 + B_E^2}\right), \text{если } \sqrt{B_N^2 + B_E^2} > 0 \\ -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(B_V / \sqrt{B_N^2 + B_E^2}\right), \text{если } \sqrt{B_N^2 + B_E^2} < 0 \\ \arctan\left(\sqrt{B_N^2 + B_E^2} / B_V\right) \pm \pi, \text{если } B_V < 0 \\ \varnothing, \text{если } B_N = 0 \text{ и } B_E = 0 \text{ и } B_V = 0 \end{cases}, \text{ град.,} \quad (4)$$

где B_N, B_E и B_V — северная, восточная и вертикальная компоненты магнитного поля соответственно, нТл.

На четвертом этапе в соответствии с формулами (5) — (6) производится вычисление отклонений между измеренными и эталонными значениями магнитного склонения и магнитного наклонения.

$$\Delta D = |D - D_0|, \text{ град.,} \quad (5)$$

где ΔD — абсолютная величина дополнительной погрешности магнитного склонения; D — магнитное склонение, рассчитанное по формуле (3); D_0 — эталонное значение магнитного склонения.

$$\Delta I = |I - I_0|, \text{ град.,} \quad (6)$$

где ΔI — абсолютная величина дополнительной погрешности магнитного наклонения; I — магнитное наклонение, рассчитанное по формуле (4); I_0 — эталонное значение магнитного наклонения.

Далее реализуется сбор данных о скорости солнечного ветра, регистрируемых в первой точке Лагранжа (L_1).

После чего в соответствии с выражением (7) производится расчет времени, затраченного на преодоление частицами солнечного ветра расстояния от точки L_1 до поверхности Земли:

$$t = \frac{S}{v}, \qquad (7)$$

где t — время преодоления расстояния от точки L_1 до поверхности Земли, с; S — расстояние от точки L_1 до поверхности Земли (1,5 млн км), км; v — скорость солнечного ветра, км/с.

На седьмом этапе выполняется формирование базы данных, содержащей не менее 10 000 замеров значений параметров солнечного ветра с соответствующими им вариациями дополнительной погрешности магнитных инклинометров, рассчитанной в соответствии с формулами (5)—(6), с учетом времени t, рассчитанного в соответствии с формулой (7).

На восьмом этапе выполняется сбор данных об актуальном состоянии параметров солнечного ветра, регистрируемых в точке L_1: v — скорость солнечного ветра, км/с; n — плотность солнечного ветра, $см^{-3}$; параметры ММП (BX, BY и B_z — составляющие вектора индукции ММП по осям X, Y и Z в системе GSM (от англ. Geocentric Solar Magnetic) соответственно, нТл).

На завершающем этапе выполняется сопоставление данных о состоянии солнечного ветра в режиме реального времени с вероятным уровнем дополнительной погрешности, наблюдаемой ранее при аналогичных условиях с учетом времени t, рассчитанного согласно формуле (7).

На основании сопоставления результатов прогноза с допустимыми значениями погрешности магнитного инклинометра принимается решение о целесообразности приостановки/продолжения технологического процесса бурения.

Алгоритм прогнозирования вариаций дополнительной погрешности магнитных инклинометров

На рис. 2 приведена схема алгоритма, формализующего предложенную методику. На начальном этапе запрашиваются необходимые данные, после чего анализируется их полнота и выбирается тип прогностической модели (соответствующей доступному набору параметров). В случае отсутствия данных не более 10 мин выполняется их экстраполяция. Далее рассчитывается горизонт прогнозирования и оценивается погрешность с использованием выбранной модели. Если прогнозируемая погрешность превышает допустимый порог, пользователь получает соответствующее уведомление через пользовательский интерфейс. При отсутствии данных выводится сообщение о невозможности осуществления прогноза.

Предложенный алгоритм адаптирован для реализации в виде проблемно-ориентированной системы поддержки принятия решений (СППР). Под СППР в общем случае понимается комплекс программно-аппаратных средств, использующий методы анализа данных для выработки рекомендаций по управлению процессом в условиях неопределенности [22—25].

Структура системы поддержки принятия решений магнитных измерений во время бурения

На рис. 3 схематически показана структура предлагаемой СППР. Данная система включает три основных уровня: уровень сбора и агрегации данных, уровень аналитической обработки и уровень взаимодействия с пользователем.

Уровень сбора и агрегации данных (блоки *1* и *2*) включает два основных источника данных: информация о параметрах солнечного ветра и пользова-

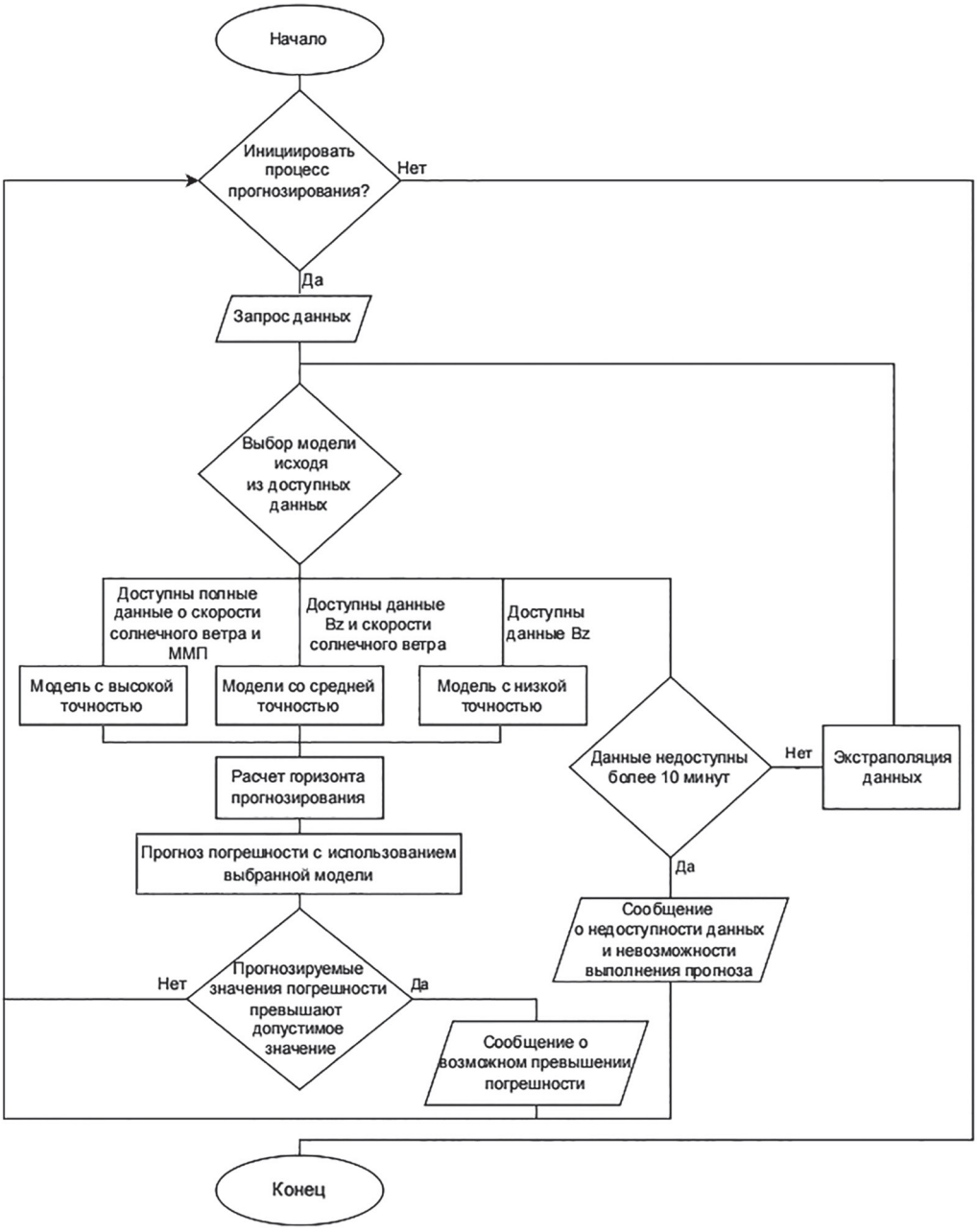
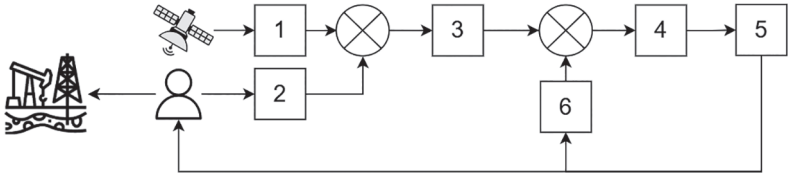


Рис. 2. Схема алгоритма прогнозирования вариаций дополнительной погрешности магнитных инклинометров

Fig. 2. Block diagram of the algorithm for predicting variations in the additional error of magnetic inclinometers



1 – прием спутниковых данных; 2 – прием пользовательских данных;
3 – предобработка данных; 4 – прогнозирование погрешности; 5 – представление результатов;
6 – логирование и адаптация результатов

Рис. 3. Структура СППР
Fig. 3. DSS structure

тельские данные. Блок *1* осуществляет прием и первичную обработку спутниковых данных о параметрах солнечного ветра, таких как скорость, плотность и состояние ММП. Источниками данных выступают космические аппараты (например, ACE, DSCOVR), подключенные через прикладные программные интерфейсы. В блок *2* поступают пользовательские данные, включающие географическое положение буровой установки, режим работы оборудования и иные параметры, вводимые вручную или в автоматизированном режиме.

Уровень аналитической обработки представлен модулями *3*, *4* и *6*, выполняющими функции предобработки и прогнозирования. Так, блок *3* отвечает за нормализацию, интерполяцию, устранение пропусков и синхронизацию входных данных по времени. Блок *6* содержит историческую базу геофизических и технологических параметров, а также параметры адаптивных моделей, обученных на ретроспективных данных. Эти данные используются для уточнения текущих расчетов и повышения точности прогнозирования. Блок *4* реализует итоговый прогноз анализируемых параметров.

Уровень взаимодействия с пользователем представлен блоком *5*, реализующим интерфейс СППР. В рамках данного модуля пользователю предоставляется возможность ввода уточняющих параметров, получения аналитической информации в табличной и графической форме, а также получения уведомлений при наступлении предопределенных событий, свидетельствующих о потенциальном превышении допустимых нормативов с определенной вероятностью.

Система предусматривает обратную связь для возможности дообучения моделей, что обеспечивает возможность ее адаптации к изменяющимся условиям.

Валидация результатов поддержки принятия решений на основе предлагаемого подхода

В качестве примера рассмотрим SSS-событие 24 августа 2005 г. В табл. 2 представлены максимальные значения погрешности, зарегистрированные на некоторых станциях во время SSS-события 24.08.2005.

На рис. 4 приведена временная диаграмма измеренных и спрогнозированных значений ΔI станции CNL (рис. 4, *а*) и BET (рис. 4, *б*), часть прогнозируемых значений пропущена в связи с отсутствием значений исходных параметров.

На рис. 5 приведена временная диаграмма измеренных и спрогнозированных значений ΔD станции CNL (рис. 5, *а*) и BET (рис. 5, *б*), часть прогнозируемых значений пропущена в связи с отсутствием значений исходных параметров.

Для оценки качества построенных прогностических моделей был проведен их сравнительный анализ на основе стандартных метрик: средней абсолют-

Таблица 2

Максимальные значения погрешности, зафиксированные на некоторых станциях во время SSS-события 24.08.2005
Maximum error values recorded at some stations during the SSS event on 24 August 2005

Станция	IAGA-код	GEOLON	GEOLAT	Разница между MLT и UTC, ч	ΔI_{max}, град.	ΔD_{max}, град.
Bettles	BET	208,45	66,90	12,5	1,88	4,22
Contwoyto Lake	CNL	248,75	65,75	15,4	2,11	6,82
Sodankyla	SOD	26,63	67,37	2,3	0,71	3,09
Kangerlussuaq	STF	309,28	67,02	-2,2	1,80	4,71
Zyryanka	ZYK	150,78	65,75	9,7	0,77	5,44

ной ошибки (MAE), среднеквадратичной ошибки (MSE), корня из среднеквадратичной ошибки (RMSE), а также коэффициента детерминации (R^2), отражающего адекватность синтезируемой модели. Результаты расчетов для моделей случайного леса, линейной регрессии и градиентного бустинга приведены в табл. 3. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о значительном превосходстве ансамблевых методов над классической линейной регрессией, что может быть объяснено отсутствием линейной зависимости между входными признаками и целевой переменной. Модель градиентного бустинга показала наименьшую ошибку (MAE = = 0,18°) и наивысший коэффициент детерминации (R^2 = 0,85) при прогнозировании погрешностей ΔI и ΔD.

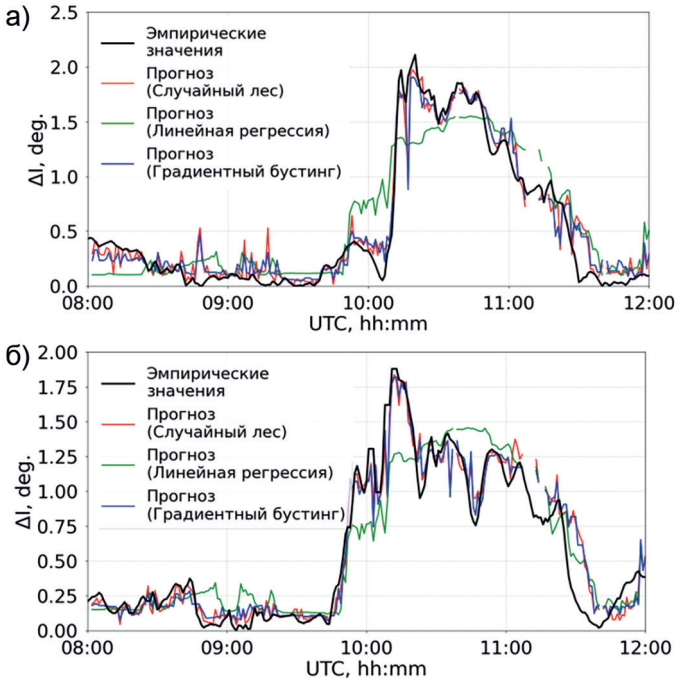


Рис. 4. Временная диаграмма измеренных и спрогнозированных значений ΔI станции CNL (а) и BET (б)
Fig. 4. Time diagram of actual and predicted ΔI values for stations CNL (a) and BET (b)

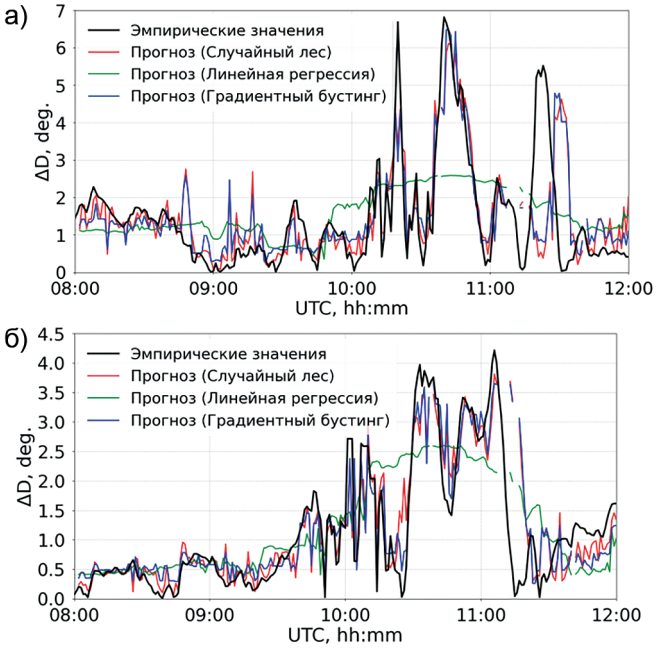


Рис. 5. Временная диаграмма измеренных и спрогнозированных значений ΔD станции CNL (а) и BET (б)
Fig. 5. Time diagram of actual and predicted ΔD values for stations CNL (a) and BET (b)

Обсуждение результатов

Практическая ценность предложенного подхода заключается в возможности заблаговременного предупреждения о ГМВ, способных повлиять на точность инклинометрических систем. При этом дополнительных исследований требуют вопросы, связанные с методологией обработки данных о состоянии солнечного ветра, касающиеся разработки алгоритмов динамической коррекции временных рядов данных о солнечном ветре для их сопоставления с наземными наблюдениями, что требует учета изменяющейся скорости частиц солнечного ветра при расчете времени достижения ими магнитосферы Земли.

Также отметим, что в работе апробация предложенного подхода проводилась на примере небольшого числа SSS-событий высокой интенсивности. Для более объективной оценки качества подхода необходимо расширять базу данных таких событий. Также включение в обучающую выборку событий меньшей интенсивности позволит более детально изучить характер корреляционных связей в широком диапазоне ГМВ и точнее определить границы применимости предложенного подхода.

Заключение

В работе представлен подход к поддержке принятия решений при ННБ в условиях высокой вариабельности ГМП, характерной для АЗРФ. Разработанный подход положен в основу прототипа СППР, предназначенной для прогнозирования дополнительной погрешности магнитных инклинометров и соответствия данных характеристик принятому регламенту.

Релевантность предложенного подхода была подтверждена результатами численного эксперимента на базе SSS-события 24.08.2005. Эксперимент показал, что прогнозирование экстремальной погрешности на основе градиентного

Таблица 3

Метрики качества прогностических моделей для различных моделей машинного обучения при прогнозировании ΔI и ΔD
Quality metrics of predictive models for various machine learning models when predicting ΔI and ΔD

Модель	Метрика	ΔI CNL	ΔI BET	ΔD CNL	ΔD BET
Случайный лес	MAE	0,20	0,13	0,94	0,57
	MSE	0,07	0,03	1,66	0,54
	RMSE	0,27	0,18	1,29	0,73
	R^2	0,83	0,88	0,44	0,56
Линейная регрессия	MAE	0,25	0,17	1,14	0,59
	MSE	0,09	0,06	2,40	0,67
	RMSE	0,31	0,25	1,55	0,81
	R^2	0,77	0,78	0,19	0,46
Градиентный бустинг	MAE	0,18	0,13	0,91	0,52
	MSE	0,06	0,04	1,52	0,47
	RMSE	0,25	0,19	1,23	0,69
	R^2	0,85	0,87	0,49	0,61

бустинга обеспечивает точность до 0,18°. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента для снижения рисков при разработке трудноизвлекаемых запасов в Арктической зоне РФ. Для дальнейшего совершенствования предложенного подхода необходимо проведение дополнительных исследований, касающихся алгоритмов динамического расчета времени распространения солнечного ветра от точки L_1 до Земли с учетом изменяющейся скорости частиц солнечного ветра, а также расширения исследуемой выборки за счет включения большего количества SSS-событий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nagy R., Hartyanyi M., Bejczi R., Bartha L., Puskas S.* Recent aspects of chemical enhanced oil recovery // Chemical Papers. 2025, vol. 79, pp. 2695 – 2716. DOI: 10.1007/s11696-025-03943-7.
2. *Zhang Y., Msangi S., Edmonds J., Waldhoff S.* Limited increases in Arctic offshore oil and gas production with climate change and the implications for energy markets // Scientific Reports. 2024, vol. 14, article 6699. DOI: 10.1038/s41598-024-54007-x.
3. *Cherepovitsyn A. E., Rutenko E., Yudin S.* Global challenges and opportunities for Arctic oil and gas projects // E3S Web of Conferences. 2023, vol. 378, article 06007. DOI: 10.1051/e3sconf/202337806007.
4. *Yang J., Cai J., Wang S.* Online compensation of geomagnetic measurement errors while drilling // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024, vol. 73, pp. 1 – 9. DOI: 10.1109/TIM.2024.3379082.
5. *Yang C., Zeng Q., Xiong Z., Yang J.* IMU/magnetometer-based azimuth estimation with norm constraint filtering // Sensors. 2024, vol. 24, no. 10, article 2982. DOI: 10.3390/s24102982.
6. *Chang J. L., Jung K. L.* Highly accurate accelerometer- and magnetometer-based elevation and azimuth estimation procedure under stationary conditions // Journal of Sensor Science and Technology. 2025, vol. 34, no. 1, pp. 8 – 18. DOI: 10.46670/JSST.2025.34.1.8.
7. *Buzulukova N., Tsurutani B.* Space weather: From solar origins to risks and hazards evolving in time // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. 2022, vol. 9. DOI: 10.3389/fspas.2022.1017103.

8. *Soloviev A. A.*, *Sidorov R. V.*, *Oshchenko A. A.*, *Zaitsev A. N.* On the need for accurate monitoring of the geomagnetic field during directional drilling in the Russian Arctic // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2022, vol. 58, pp. 420 – 434. DOI: 10.1134/S1069351322020124.

9. *Ягова Н. В.*, *Розенберг И. Н.*, *Гвишиани А. Д.*, *Сахаров Я. А.*, *Гаранин С. Л.*, *Воронин В. А.*, *Пилипенко В. А.*, *Дубчак И. А.* Исследование влияния геомагнитной активности на функционирование систем железнодорожной автоматики в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13. — № 3. — С. 341 – 352. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-341-352.

10. *Gvishiani A., Rozenberg I., Soloviev A.* Geophysical processes in the Arctic and the system analysis of their impact on operation and development of the transport infrastructure // World of Transport and Transportation. 2023, vol. 21, pp. 6 – 34. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-3-1.

11. *Kudin D., Gvishiani A., Nikitina I., Belov I., Dzeboev B., Grudnev A.*, *Dzeranov B. V., Krasnoperov R.* Storage and processing of big data for geomagnetic support of directional drilling // Applied Sciences. 2024, vol. 14, article 9730. DOI: 10.3390/app14219730.

12. *Vorobev A., Lapin A., Soloviev A., Vorobeva G.* An approach to interpreting space weather natural indicators to evaluate the impact of space weather on high-latitude power systems // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2024, vol. 60, pp. 604 – 611. DOI: 10.1134/S106935132470054X.

13. *Love J., Finn C.* Real-time geomagnetic monitoring for space weather-related applications: Opportunities and challenges // Space Weather. 2017, vol. 15. DOI: 10.1002/2017SW001665.

14. *Vorobev A. V.*, *Vorobeva G. R.* Machine learning for diagnostics of space weather effects for the Arctic Region // Moscow University Physics Bulletin. 2023, vol. 78 (Suppl 1), pp. 226 – S235. DOI: 10.3103/S0027134923070317.

15. *Kostianoy A. G.*, *Gvishiani A. D.*, *Rozenberg I. N.*, *Krasnoperov R. I.*, *Gvozdik S. A.*, *Lebedev S. A.*, *Nikitina I. M.*, *Dubchak I. A.*, *Shevaldysheva O. O.*, *Sergeev V. N.*, *Gvozdik G. A.* Geoinformation analysis of regional climatic changes in the central and western Russian Arctic for railway development // Russian Journal of Earth Sciences. 2025, vol. 1, pp. 1 – 34. DOI: 10.2205/2025ES000956.

16. *Kumar S.*, *Pulkkinen T. I.* Statistical analysis of magnetopause response during substorm phases // Annales Geophysicae. 2025, vol. 43, pp. 137 – 149. DOI: 10.5194/angeo-43-137-2025.

17. *Lao C., Forsyth C., Freeman M., Smith A., Mooney M.* On the association of substorm identification methods // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2024, vol. 129. DOI: 10.1029/2024JA032762.

18. *Boudouridis A., Weygand J., Zesta E.* Statistical comparison of southern and northern auroral electrojet indices as a function of solar wind and IMF conditions // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2024, vol. 129. DOI: 10.1029/2023JA032362.

19. *Bergin A., Chapman S., Gjerloev J.* AE, DST, and their SuperMAG counterparts: The effect of improved spatial resolution in geomagnetic indices // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020, vol. 125. DOI: 10.1029/2020JA027828.

20. *Nesse Tyssoy H., Partamies N., Babu E., Smith-Johnsen C., Salice J.* The predictive capabilities of the auroral electrojet index for medium energy electron precipitation // Frontiers in Astronomy and Space Sciences. 2021, vol. 8. DOI: 10.3389/fspas.2021.714146.

21. *Newell P., Sotirelis T., Liou K., Meng C., Rich F.* A nearly universal solar-wind magnetosphere coupling function inferred from ten magnetospheric state variables // Journal of Geophysical Research. 2007, vol. 112. DOI: 10.1029/2006JA012015.

22. *Shammi N. J.*, *Ashraf T.*, *Ifty R. A.*, *Rahman M. Z.* Forecasting geomagnetic storms for Earth using LSTM with solar wind and IMF features / 2024 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET), Chittagong, Bangladesh. 2024, pp. 1 – 6. DOI: 10.1109/ICISET62123.2024.10939246.

23. *Sierra Porta D., Petro-Ramos J. D., Ruiz-Morales D. J., Herrera-Acevedo D. D., García-Teheran A. F., Alvarado M.* Machine learning models for predicting geomagnetic storms across five solar cycles using dst index and heliospheric variables // Advances in Space Research. 2024, vol. 74. DOI: 10.1016/j.asr.2024.08.031.

24. *Park W., Lee J., Kim K., Lee J., Park K., Miyashita Y., Sohn J., Park J., Kwak Y.-S, Hwang J., Frias A., Kim J., Yi Y.* Operational Dst index prediction model based on combination of artificial neural network and empirical model // Journal of Space Weather and Space Climate. 2021, vol. 11. DOI: 10.1051/swsc/2021021.

25. *Воробьева Г. Р.*, *Воробьев А. В.*, *Фарваев Э. Ф.* Подход к решению проблемы дефицита геомагнитных данных в задачах поддержки принятия решений // Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики. — 2025. — Т. 25. — № 1. — С. 151—159. DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159. rus

REFERENCES

1. Nagy R., Hartyanyi M., Bejczi R., Bartha L., Puskas S. Recent aspects of chemical enhanced oil recovery. *Chemical Papers*. 2025, vol. 79, pp. 2695—2716. DOI: 10.1007/s11696-025-03943-7.

2. Zhang Y., Msangi S., Edmonds J., Waldhoff S. Limited increases in Arctic offshore oil and gas production with climate change and the implications for energy markets. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, article 6699. DOI: 10.1038/s41598-024-54007-x.

3. Cherepovitsyn A. E., Rutenko E., Yudin S. Global challenges and opportunities for Arctic oil and gas projects. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 378, article 06007. DOI: 10.1051/e3sconf/202337806007.

4. Yang J., Cai J., Wang S. Online compensation of geomagnetic measurement errors while drilling. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024, vol. 73, pp. 1—9. DOI: 10.1109/TIM.2024.3379082.

5. Yang C., Zeng Q., Xiong Z., Yang J. IMU/magnetometer-based azimuth estimation with norm constraint filtering. *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 10, article 2982. DOI: 10.3390/s24102982.

6. Chang J. L., Jung K. L. Highly accurate accelerometer- and magnetometer-based elevation and azimuth estimation procedure under stationary conditions. *Journal of Sensor Science and Technology*. 2025, vol. 34, no. 1, pp. 8—18. DOI: 10.46670/JSST.2025.34.1.8.

7. Buzulukova N., Tsurutani B. Space weather: From solar origins to risks and hazards evolving in time. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022, vol. 9. DOI: 10.3389/fspas.2022.1017103.

8. Soloviev A. A., Sidorov R. V., Oshchenko A. A., Zaitsev A. N. On the need for accurate monitoring of the geomagnetic field during directional drilling in the Russian Arctic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022, vol. 58, pp. 420—434. DOI: 10.1134/S1069351322020124.

9. Yagova N. V., Rozenberg I. N., Gvishiani A. D., Sakharov Y. A., Garanin S. L., Voronin V. A., Pilipenko V. A., Dubchak I. A. Study of geomagnetic activity impact on functioning of railway automatics in Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*. 2023, vol. 13, no. 3, pp. 341—352. [In Russ]. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-341-352.

10. Gvishiani A., Rozenberg I., Soloviev A. Geophysical processes in the Arctic and the System analysis of their impact on operation and development of the transport infrastructure. *World of Transport and Transportation*. 2023, vol. 21, pp. 6—34. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-3-1.

11. Kudin D., Gvishiani A., Nikitina I., Belov I., Dzeboev B., Grudnev A., Dzeranov B. V., Krasnoperov R. Storage and processing of big data for geomagnetic support of directional drilling. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, article 9730. DOI: 10.3390/app14219730.

12. Vorobev A., Lapin A., Soloviev A., Vorobeva G. An approach to interpreting space weather natural indicators to evaluate the impact of space weather on high-latitude power systems. *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2024, vol. 60, pp. 604—611. DOI: 10.1134/S106935132470054X.

13. Love J., Finn C. Real-time geomagnetic monitoring for space weather-related applications: Opportunities and challenges. *Space Weather*. 2017, vol. 15. DOI: 10.1002/2017SW001665.

14. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Machine learning for diagnostics of space weather effects for the Arctic Region. *Moscow University Physics Bulletin*. 2023, vol. 78 (Suppl 1), pp. 226—S235. DOI: 10.3103/S0027134923070317.

15. Kostianoy A. G., Gvishiani A. D., Rozenberg I. N., Krasnoperov R. I., Gvozdik S. A., Lebedev S. A., Nikitina I. M., Dubchak I. A., Shevaldysheva O. O., Sergeev V. N., Gvozdik G. A. Geoinformation analysis of regional climatic changes in the central and western Russian Arctic for railway development. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025, vol. 1, pp. 1—34. DOI: 10.2205/2025ES000956.

16. Kumar S., Pulkkinen T. I. Statistical analysis of magnetopause response during substorm phases. *Annales Geophysicae*. 2025, vol. 43, pp. 137—149. DOI: 10.5194/angeo-43-137-2025.

17. Lao C., Forsyth C., Freeman M., Smith A., Mooney M. On the association of substorm identification methods. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2024, vol. 129. DOI: 10.1029/2024JA032762.

18. Boudouridis A., Weygand J., Zesta E. Statistical comparison of southern and northern auroral electrojet indices as a function of solar wind and IMF conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2024, vol. 129. DOI: 10.1029/2023JA032362.

19. Bergin A., Chapman S., Gjerloev J. AE, DST, and their SuperMAG counterparts: The effect of improved spatial resolution in geomagnetic indices. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2020, vol. 125. DOI: 10.1029/2020JA027828.

20. Nesse Tyssoy H., Partamies N., Babu E., Smith-Johnsen C., Salice J. The predictive capabilities of the auroral electrojet index for medium energy electron precipitation. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2021, vol. 8. DOI: 10.3389/fspas.2021.714146.

21. Newell P., Sotirelis T., Liou K., Meng C., Rich F. A nearly universal solar-wind magnetosphere coupling function inferred from ten magnetospheric state variables. *Journal of Geophysical Research*. 2007, vol. 112. DOI: 10.1029/2006JA012015.

22. Shammi N. J., Ashraf T., Ifty R. A., Rahman M. Z. Forecasting geomagnetic storms for Earth using LSTM with solar wind and IMF features. 2*024 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET)*, Chittagong, Bangladesh. 2024, pp. 1 — 6. DOI: 10.1109/ICISET62123.2024.10939246.

23. Sierra Porta D., Petro-Ramos J. D., Ruiz-Morales D. J., Herrera-Acevedo D. D., García-Teheran A. F., Alvarado M. Machine learning models for predicting geomagnetic storms across five solar cycles using dst index and heliospheric variables. *Advances in Space Research*. 2024, vol. 74. DOI: 10.1016/j.asr.2024.08.031.

24. Park W., Lee J., Kim K., Lee J., Park K., Miyashita Y., Sohn J., Park J., Kwak Y.-S, Hwang J., Frias A., Kim J., Yi Y. Operational Dst index prediction model based on combination of artificial neural network and empirical model. *Journal of Space Weather and Space Climate.* 2021, vol. 11. DOI: 10.1051/swsc/2021021.

25. Vorobeva G. R., Vorobev A. V., Farvaev E. F. An approach to solving the problem of geomagnetic data scarcity in decision-making support. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025, vol. 25, no. 1, pp. 151 — 159. [In Russ]. DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-1-151-159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Андрей Владимирович — д-р техн. наук,
старший научный сотрудник,
Геофизический центр РАН, e-mail: geomagnet@list.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9680-5609,
Ханнанов Наиль Камилевич[1] — аспирант,
e-mail: nael20000@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0005-1132-3440,
Воробьева Гульнара Равилевна[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-7878-9724,
[1] Уфимский университет науки и технологий.
Для контактов: Ханнанов Н.К., e-mail: nael20000@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Vorobev, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences,
119296, Moscow, Russia, e-mail: geomagnet@list.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9680-5609,
N.K. Hannanov[1], Graduate Student, e-mail: nael20000@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0005-1132-3440,
G.R. Vorobeva[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-7878-9724,
[1] Ufa University of Science and Technology, 450076, Ufa, Russia.
Corresponding author: N.K. Hannanov, e-mail: nael20000@yandex.ru.

Получена редакцией 04.07.2025; получена после рецензии 13.10.2025; принята к печати 10.01.2026.
Received by the editors 04.07.2025; received after the review 13.10.2025; accepted for printing 10.01.2026.