

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ МАГНИТНЫХ ИНКЛИНОМЕТРОВ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Г.Р. Воробьева<sup>1</sup>, А.В. Воробьев<sup>1</sup>, Л.И. Шехтман<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия, e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com

**Аннотация:** Геомагнитные возмущения в высоких широтах, многократно превышающие порог чувствительности скважинных магнитных инклинометров, являются ключевым фактором снижения качества инклинометрических измерений, особенно при разработке трудноизвлекаемых запасов. В связи с этим целью работы является проведение статистического моделирования для количественной оценки влияния геомагнитной активности на дополнительную погрешность магнитных инклинометров в высокоширотных регионах. В основе предлагаемого подхода лежит статистический анализ минутных геомагнитных данных наземных магнитных станций в Арктической зоне РФ за 2015 г. (максимум солнечного цикла). Также выполняется исследование на основе данных, полученных со станций, расположенных в субавроральной зоне, за 2022–2024 гг. Установлено, что распределение вероятной дополнительной погрешности подчиняется логнормальному закону с «тяжелыми хвостами», аппроксимируемыми распределением Парето, что свидетельствует о высокой вероятности экстремальных отклонений (десятки градусов дляклонения). Выявлена тесная корреляция ( $\rho = 0,78$ ) между индексом суббуревой активности SME и долей бракованных замеров. Определены пороговый уровень риска ( $SME \geq 500$  нТл), а также характерные временные масштабы возмущений (сезонный ход с пиками в равноденствие, внутрисуточные периоды 2–6 ч). Главный вывод: продемонстрирована возможность перехода от реактивных методов парирования помех к проактивному вероятностному прогнозированию метрологических рисков для планирования буровых работ в Арктической зоне РФ.

**Ключевые слова:** магнитный инклинометр, геомагнитная активность, Арктическая зона РФ, наклонно-направленное бурение, статистическое моделирование, авроральный овал.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00569, <https://rscf.ru/project/25-21-00569/>.

**Для цитирования:** Воробьева Г. Р., Воробьев А. В., Шехтман Л. И. Исследование статистических взаимосвязей дополнительной погрешности магнитных инклинометров и геомагнитной активности в Арктической зоне РФ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 137–149. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_9\_0\_137.

---

## Statistical interdependence of additional errors of magnetic inclinometers and geomagnetic activity in the Arctic Zone of Russia

G.R. Vorobeva<sup>1</sup>, A.V. Vorobev<sup>1</sup>, L.I. Shekhtman<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com

---

**Abstract:** The geomagnetic disturbances on the northern high latitudes, many times higher than the threshold of sensitivity of borehole magnetic inclinometers, are the key impact on the quality of directional survey, particularly, in mining hard-to-recover reserves. In this connection, the objective of this research is statistical modeling aimed at the quantitative evaluation of influence exerted by geomagnetic activity on additional errors of magnetic inclinometers in the areas situated on the northern high latitudes. The proposed approach uses the statistical analysis of 1-minute geomagnetic data taken from earth-based magnetic stations in Russia's Arctic Zone in 2015 (solar maximum). Also, the data obtained from magnetic stations in the auroral oval in 2022–2024 are analyzed. It is found that the additional error probability distribution follows a heavy-tailed long-normal plot approximated by the Pareto distribution, which proves a high probability of extremal deviations (dozens of degrees). There is a strong correlation ( $\rho = 0.78$ ) between the SME index of magnetic storm and waste measurements. The threshold risk level (SME  $\geq 500$  nT) and the representative time scales of disturbances (seasonal trend with peaks at equinox, diurnal periods of 2–6 h) are determined. The main implication is the demonstrated possibility of transition from the reactive noise management to the proactive probabilistic prediction of metrological risks for drilling operation planning in the Arctic Zone of Russia.

**Key words:** magnetic inclinometer, geomagnetic activity, Arctic Zone of Russia, directional drilling, statistic modeling, auroral oval.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-21-00569, <https://rscf.ru/project/25-21-00569/>.

**For citation:** Vorobeva G. R., Vorobev A. V., Shekhtman L. I. Statistical interdependence of additional errors of magnetic inclinometers and geomagnetic activity in the Arctic Zone of Russia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):137-149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_9\_0\_137.

---

### Введение

Горизонтальное наклонно-направленное бурение является ключевой технологией освоения арктических месторождений, что предъявляет высокие требования к точности управления пространственной траекторией скважины. Для достижения проектной точности, до  $0,1^\circ$  по азимуту [1, 2], применяются забойные телеметрические системы (MWD), в которых функцию определения ориентации бурового инструмента выполняют магнитные инклинометры, калибруемые по вектору геомагнитного поля (ГМП) [3].

Точность магнитометрической навигации в высоких широтах снижается под влиянием комплекса факторов. Во-первых, геометрия главного магнитного поля в приполярных областях характеризуется малыми значениями горизонтальной составляющей и большими углами наклона. В результате полезный сигнал становится соизмеримым с магнитными помехами от буровой колонны, что усложняет или делает невозможной точную коррекцию собственного поля оборудования [4, 5]. Во-вторых, Арктический регион географически характеризуется максимальным воздействием

солнечной активности на магнитосферу, что отражается на технологических объектах высокоширотной инфраструктуры, развернутых в данном регионе. В периоды магнитных бурь и суббурь здесь возникают интенсивные возмущения ГМП, связанные с динамикой ионосферных токовых систем [6].

Амплитуда таких возмущений (сотни нанотесла) на порядки превышает порог чувствительности скважинных магнитометров. В результате локальные отклонения ключевых для навигации угловых параметров — магнитного склонения ( $D$ ) и наклонения ( $I$ ) — от значений, предсказанных глобальными моделями (IGRF), становятся сравнимыми или многократно превосходят требуемую точность [7, 8]. Эти отклонения формируют нескомпенсированную дополнительную погрешность ( $X_{\text{доп}}$ ) средства измерения. Согласно метрологическим стандартам (ГОСТ 8.395-80), в нормальных условиях  $X_{\text{доп}}$  не должна превышать 35% от основной погрешности ( $X_{\text{осн}}$ ) прибора [9]. В условиях авроральной зоны данное требование зачастую нарушается, что может приводить к выходу траектории за пределы проектного коридора, рискам столкновения скважин и значительным экономическим потерям [10, 11].

Существующие методы минимизации воздействия геомагнитных возмущений, такие как коррекция по данным ближайших обсерваторий или использование гибридных систем, носят преимущественно реактивный характер и требуют развитой наземной инфраструктуры, которая в условиях Арктической зоны РФ (АЗРФ) разрежена и не обеспечивает наличия станции в необходимом радиусе (~100 км) от места бурения [12]. Таким образом, сохраняется острый дефицит проактивных методов, позволяющих на этапе планирования давать вероятностную оценку рисков возникновения экстремальных погрешностей.

Для разработки таких методов необходимо установление статистических закономерностей между уровнем геомагнитной активности (ГМА) и метрологическими характеристиками инклинометров. В качестве универсальной количественной меры уровня возмущенности ГМП применяется SME-индекс (SuperMAG Electrojet index) [13]. Статистический анализ долговременных рядов вариаций ГМП, совместно с калибровочными данными инклинометрических систем, позволяет оценить влияние различных уровней ГМА на дополнительную погрешность измерений. Развитие специализированных баз данных геомагнитных наблюдений в российской Арктике предоставляет для этого необходимую эмпирическую основу [14]. Особое значение имеет анализ статистики экстремальных событий («тяжелых хвостов» распределений), представляющих наибольший риск для точности навигации [15].

Таким образом, целью настоящей работы является разработка методики статистического моделирования для оценки влияния геомагнитной активности в Арктическом регионе на дополнительную погрешность магнитных инклинометров. Результаты исследования, основанные на анализе исторических данных с использованием геомагнитных индексов, позволят осуществить переход к вероятностному прогнозированию метрологических рисков при буровых работах в условиях возмущенного ГМП, что необходимо для повышения точности и надежности навигационного сопровождения строительства скважин в АЗРФ.

### **Исходные данные**

#### **и их предварительная обработка**

В работе использовались геомагнитные данные высокоширотных магнитных обсерваторий, соответствующих стан-

Таблица 1

**Источники геомагнитных данных****Sources of geomagnetic data**

| IAGA-код | Магнитная станция | Географические координаты |                   |
|----------|-------------------|---------------------------|-------------------|
|          |                   | северная широта           | восточная долгота |
| LOZ      | Ловозеро          | 67.97°                    | 35.02°            |
| KHS      | Харасавэй         | 71.16°                    | 66.83°            |
| DIK      | Диксон            | 73.53°                    | 80.70°            |
| TIK      | Тикси             | 71.59°                    | 128.92°           |
| CHD      | Чокурдах          | 70.6°                     | 147.89°           |

дартам INTERMAGNET: «Ловозеро» (LOZ), «Харасавэй» (KHS), «Диксон», «Тикси», «Чокурдах» (табл. 1). Их расположение относительно района бурения (п-в Гыдан) показано на рис. 1. Соответствующие временные ряды минутных измерений получены через проект SuperMAG, который предоставляет унифицированный доступ к стандартизированным данным глобальной сети станций [13].

Для статистического моделирования распределений погрешности использовались минутные ряды измерений за 2015 г. — период максимума 24-го солнечного цикла, характеризующийся наибольшей амплитудой геомагнитных возмущений [16]. Для корреляционного анализа и верификации влияния возмущений использовались сопряженные данные за 2022–2024 гг: индекс SME как мера интенсивности аврорального электроджета [13] и фактические дан-

ные инклинометрических измерений на скважине (п-в Гыдан), предоставленные АО «Башнефтегеофизика» [11, 14]. Все геомагнитные данные получены через проект SuperMAG, обеспечивающий стандартизированный доступ к глобальной сети станций.

На основе исходных компонент магнитного поля (северная  $B_N$ , восточная  $B_E$ , вертикальная  $B_Z$ ) в соответствии с ГОСТ 25645 рассчитываются его угловые характеристики. Магнитное склонение  $D$ , определяющее направление на магнитный север, вычисляется через отношение горизонтальных компонент поля:

$$D = 180 / \pi \cdot \operatorname{atan}2(B_N, B_E). \quad (1)$$

Магнитное наклонение  $I$ , характеризующее угол наклона силовой линии к горизонту, по вертикальной  $B_Z$  и горизонтальной составляющим  $H$  рассчитывается следующим образом:

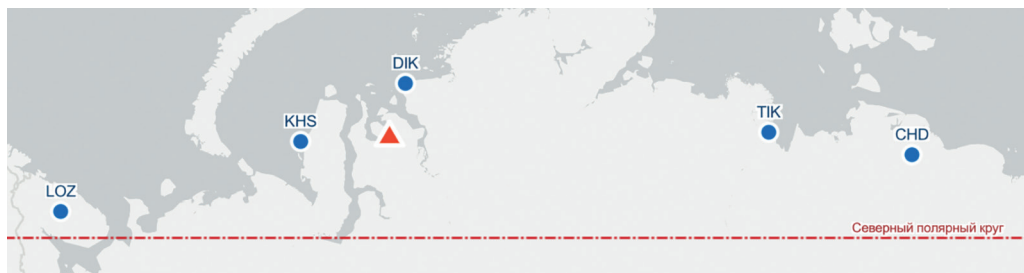


Рис. 1. География распределения источников данных (синие точки — магнитные станции, красный треугольник — район бурения)

Fig. 1. Geography of distribution of data sources (blue dots — magnetic stations, red triangle — drilling district)

$$I = 90^\circ - \frac{180}{\pi} \cdot \text{atan2}(H, B_z),$$

где  $H = \sqrt{B_N^2 + B_E^2}$  (2)

Предварительная обработка включала расчет по данным за 2015 г. отклонений наблюдаемых параметров от референсных значений модели IGRF:  $\Delta D(t) = D(t) - D_{\text{IGRF}}(t)$  и  $\Delta I(t) = I(t) - I_{\text{IGRF}}(t)$ . Модули этих отклонений ( $|\Delta D|$ ,  $|\Delta I|$ ) служили метрикой потенциальной дополнительной погрешности. Для данных 2022–2024 гг. проводилась синхронизация суточных максимумов индекса SME с данными о качестве замеров и расчет помесечных статистик.

### Статистика экстремальных значений дополнительной погрешности магнитных инклинометров в высокоширотных регионах

Количественная оценка воздействия геомагнитной активности на точность инклинометрических измерений выполнена на основе анализа данных за 2015 г. — период максимума 24-го солнечного цикла. Это позволило получить консервативные оценки рисков в наихудших с точки зрения возмущенности условиях. В качестве анализируемых метрик использовались модули отклонений измеренных значений магнитно-

го склонения и наклонения от референсных, рассчитанных по модели IGRF:  $|\Delta D(t)| = |D(t) - D_0(t)|$  и  $|\Delta I(t)| = |I(t) - I_0(t)|$ . Статистический анализ эмпирических распределений данных величин, выполненный с применением критерия согласия Колмогорова–Смирнова, показал, что они наилучшим образом аппроксимируются логнормальным законом распределения (3).

$$PDF(x, s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\log^2(x)}{2s^2}\right) \quad (3)$$

Выявлены статистически значимые «тяжелые хвосты» в распределениях  $|\Delta D|$  и  $|\Delta I|$ , аппроксимируемые обобщенным законом распределения Парето (4) и составляющие от 6% до 19% общей выборки в зависимости от местоположения обсерватории.

$$PDF(x, c) = (1 + cx)^{-1-\frac{1}{c}} \quad (4)$$

где  $s$  и  $c$  — параметры формы;  $x$  — значение погрешности ( $|\Delta D|$  или  $|\Delta I|$ ).

Количественные параметры данного распределения, характеризующие тяжесть хвостов для каждой из пяти анализируемых обсерваторий, представлены в табл. 2. Полученные значения параметра формы ( $\xi$ ) демонстрируют существенную пространственную вариацию, что указывает на различную статистическую выраженность экстремальных

Таблица 2

**Параметры обобщенного распределения Парето для «тяжелых хвостов» отклонений магнитного поля (данные 2015 г.)**  
**Parameters of the generalized Pareto distribution for the «heavy tails» of magnetic field deviations (2015 data)**

| Магнитная обсерватория (код) | $\xi$ для $ \Delta D $ | $\xi$ для $ \Delta I $ |
|------------------------------|------------------------|------------------------|
| Харасавэй (KHS)              | 0,30                   | 0,06                   |
| Диксон (DIK)                 | 0,19                   | 0,20                   |
| Ловозеро (LOZ)               | 0,21                   | 0,03                   |
| Тикси (TIK)                  | 0,24                   | 0,18                   |
| Чокурдах (CHD)               | 0,03                   | 0,07                   |

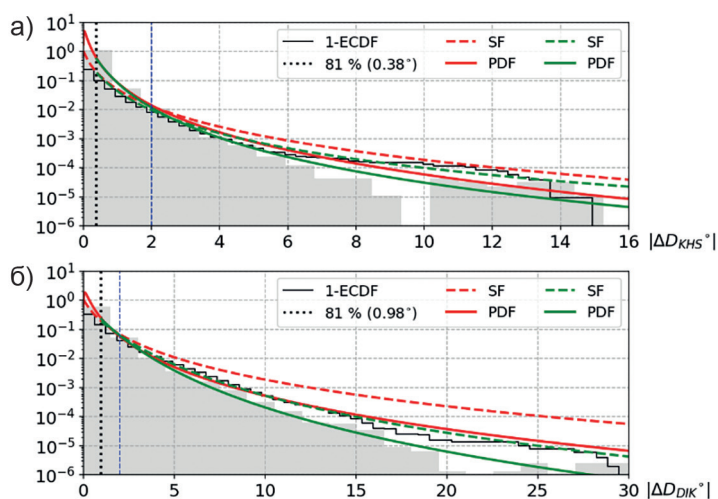


Рис. 2. Характер распределения вероятной дополнительной погрешности при измерении магнитного склонения ( $\Delta D$ ) магнитным инклинометром в окрестности магнитных обсерваторий KHS (a) и DIK (б)  
 Fig. 2. The nature of the distribution of the probable additional error in measuring the magnetic declination ( $\Delta D$ ) with a magnetic inclinometer in the vicinity of the KHS (a) and DIK (b) magnetic observatories

событий в разных районах высокоширотной зоны.

На рис. 2 и 3 функции плотности вероятности (PDF) и выживаемости (SF) для логнормального закона и закона Парето сопоставлены с эмпирической функцией выживаемости (красная сплошная

и пунктирная линии — PDF и SF логнормального закона; зеленая сплошная и пунктирная линии — PDF и SF обобщенного закона Парето; черная сплошная линия — эмпирическая функция выживаемости (1-ECDF). Синяя пунктирная линия — допустимый уровень

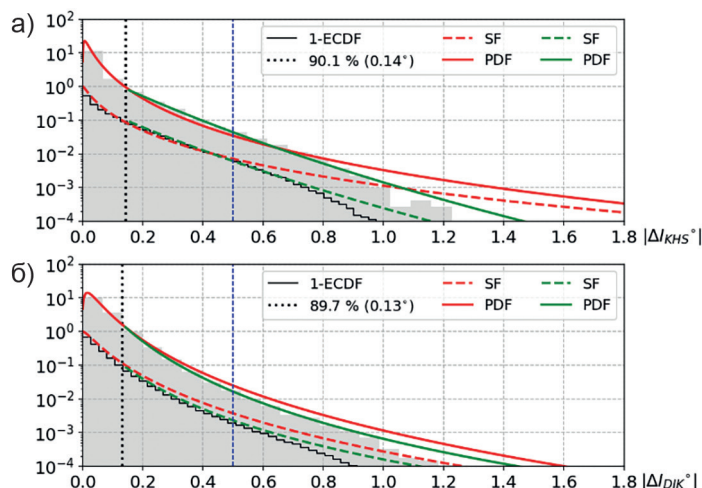


Рис. 3. Характер распределения вероятной дополнительной погрешности при измерении магнитного склонения ( $\Delta I$ ) магнитным инклинометром в окрестности магнитных обсерваторий KHS (a) и DIK (б)  
 Fig. 3. The nature of the distribution of the probable additional error in measuring the magnetic inclination ( $\Delta I$ ) with a magnetic inclinometer in the vicinity of the KHS (a) and DIK (b) magnetic observatories

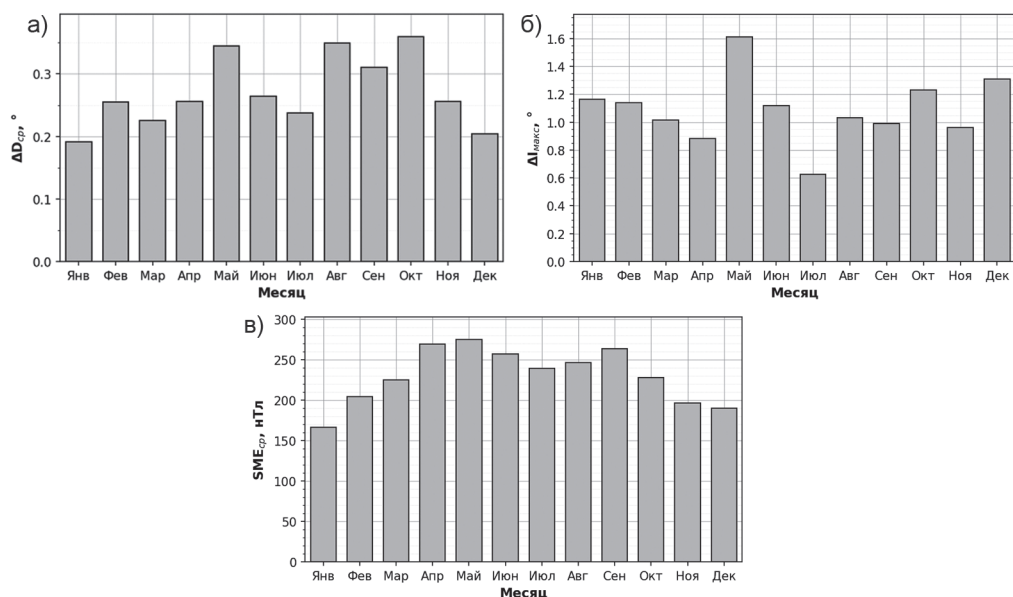


Рис. 4. Сезонный ход среднемесячных отклонений магнитного склонения ( $\Delta D$ ) (а), максимальных отклонений магнитного склонения ( $\Delta I$ ) (б), среднемесячных значений индекса SME (в)

Fig. 4. Seasonal variation of average monthly deviations of magnetic declination ( $\Delta D$ ) (а), maximum deviations of magnetic declination ( $\Delta I$ ) (б), average monthly values of the SME index (в)

дополнительной погрешности ( $X_{\text{доп}}$ ) для азимутального и зенитного углов).

Здесь  $X_{\text{доп}}$  — максимальное отклонение, возникающее дополнительно к основной погрешности средства измерения (РМГ 29-2013). Согласно техническим требованиям (РД 153-39.0-072-01), основная погрешность ( $X_{\text{осн}}$ ) для зенитного угла не должна превышать  $\pm 0,5^\circ$ , а для азимутального (при зенитных углах  $> 3^\circ$ ) —  $\pm 2^\circ$  [3, 4]. Для условий, отличных от нормальных (ГОСТ 8.395-80), суммарная  $X_{\text{доп}}$  от действия всех влияющих величин не должна превышать 35% от  $X_{\text{осн}}$ .

Анализ графических зависимостей и параметров распределений позволил установить, что в периоды повышенной ГМА  $X_{\text{доп}}$  можеткратно превышать соответствующее нормативное значение. В экстремальных условиях возмущений погрешность определения азимутального угла способна превышать допустимый уровень на порядки величин,

что делает навигацию в такие моменты практически невозможной. Уровень риска существенно варьирует в географическом пространстве.

Наличие тяжелых хвостов, описываемых распределением Парето, является индикатором высокой вероятности редких, но значительных по амплитуде погрешностей определения азимута. Пиковые значения  $|\Delta D|$ , достигающие десятков градусов, с высокой долей вероятности соответствуют максимальным фазам интенсивных геомагнитных суббурь.

Выраженный сезонный ход амплитуды возмущений был выявлен при анализе статистик отклонений. Среднемесячные значения  $\Delta D$  достигают максимума в октябре ( $0,36^\circ$ ), а абсолютные разовые максимумы  $\Delta D$  и  $\Delta I$  зафиксированы в мае ( $14,99^\circ$  и  $1,61^\circ$  соответственно) (рис. 4, а, б).

Выявленная асимметрия соответствует известному эффекту Рассела–Мак-

феррона. В равноденственные периоды геометрия межпланетного магнитного поля относительно магнитного поля Земли становится оптимальной для передачи энергии солнечного ветра в магнитосферу, что усиливает суббуревую активность [17].

Аналогичный сезонный ход с первичным пиком в мае и вторичным в сентябре продемонстрирован и для индекса SME (рис. 4, в), что согласуется с динамикой прямых магнитных отклонений. Таким образом, сезонная и суточная модуляция ГМА является ключевым внешним фактором, который должен учитываться в вероятностных моделях прогнозирования метрологических рисков.

### **Статистический и корреляционный анализ геомагнитных возмущений на качество инклинометрических исследований**

Для верификации влияния ГМА на эксплуатационные характеристики обсерватории были использованы фактические данные о качестве инклинометрических измерений, предоставленные АО «Башнефтегеофизика» за период 2022 – 2024 гг. В анализ включены только случаи, когда снижение качества не было обусловлено механическими неисправностями или ошибками оператора, что позволяет связать его с внешними геофизическими факторами. Динамика помесечной доли низкокачественных материалов, рассчитанная по отношению к общему числу исследований, представлена на рис. 5.

Для количественной оценки связи между этой динамикой и суббуревой активностью проведен сопряженный анализ временных рядов доли низкокачественных материалов и индекса SME за 2022 – 2024 гг. Рассчитанный коэффициент ранговой корреляции Спирмена

между суточными максимумами SME и количеством случаев снижения качества в соответствующие сутки составил  $\rho = 0,78$  ( $\rho < 0,01$ ), что указывает на статистически значимую и тесную нелинейную связь.

Пороговый эффект проявляется при значениях  $SME \geq 500$  нТл: при дальнейшем росте индекса наблюдается непропорционально резкое увеличение как амплитуды теоретических отклонений  $|\Delta D|$  (по данным 2015 г., см. рис. 4, а), так и частоты нештатных ситуаций при бурении, что отражается на росте доли бракованных замеров (см. рис. 5).

Пространственно-временной анализ подтвердил эту зависимость. Более 85% случаев значительного снижения качества измерений соответствует ночному и утреннему секторам (21–06 MLT) аврорального овала. Этот интервал соответствует фазе максимального развития суббури, когда западный электроджет, определяющий вариации SME, наиболее интенсивен и пространственно локализован [6, 18]. Именно в эти периоды регистрировались экстремальные отклонения магнитного склонения, достигавшие десятков градусов.

Для выявления преобладающих временных масштабов возмущений, влияющих на точность инклинометров, был выполнен спектральный анализ (вейвлет-анализ) рядов  $|\Delta D|$  по данным станций (см. табл. 1). Полученная периодограмма (рис. 6) выявляет несколько характерных диапазонов периодов. Помимо ожидаемых суточных (24 ч) и полусуточных (12 ч) гармоник, отчетливо проявляется пакет колебаний в диапазоне периодов 2 – 6 ч. Этот диапазон типичен для периодов развития отдельных фаз (активная фаза, восстановление) магнитосферных суббурь [6]. Наличие устойчивой спектральной мощности в этой полосе подтверждает, что основной вклад в формирование «тяжелых

хвостов» распределения погрешности и, как следствие, в увеличение доли низкокачественных материалов вносят именно суббуревые процессы.

Сезонная динамика также демонстрирует четкую корреляцию (см. рис. 4, а, в). Пики среднемесячных значений SME (см. рис. 4, в), наблюдаемые в равноденственные месяцы (май, сентябрь-октябрь), синхронны с периодами наибольшего количества зафиксированных отклонений  $|\Delta D|$  (см. рис. 4, а) и, как видно из рис. 5, с увеличением доли неудовлетворительных измерений. Этот сезонный ход, обусловленный эффектом Рассела-Макферрона, подтверждает, что статистика отказов качества измерений не является случайной, а детерминирована внешними геофизическими факторами.

Таким образом, комплексный статистический и корреляционный анализ указывает на то, что суббуревая активность, характеризуемая индексом SME,

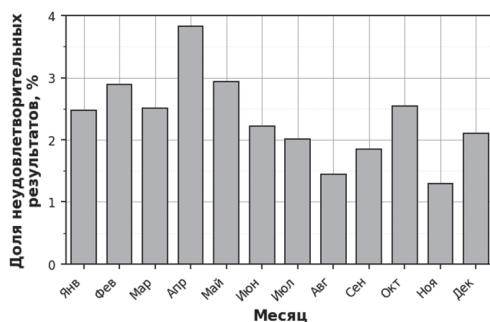


Рис. 5. Динамика доли низкокачественных инклинометрических материалов по месяцам за 2022–2024 гг.

Fig. 5. Dynamics of the share of low-quality inclinometric materials by month for 2022–2024

является значимым фактором, обуславливающим дополнительную погрешность и снижающим эксплуатационное качество магнитных инклинометров в высоких широтах. Выявленная зависимость носит пороговый характер и имеет выраженную суточную, внутрисуточную (2–6 ч) и сезонную модуляцию. Это позволяет использовать временные

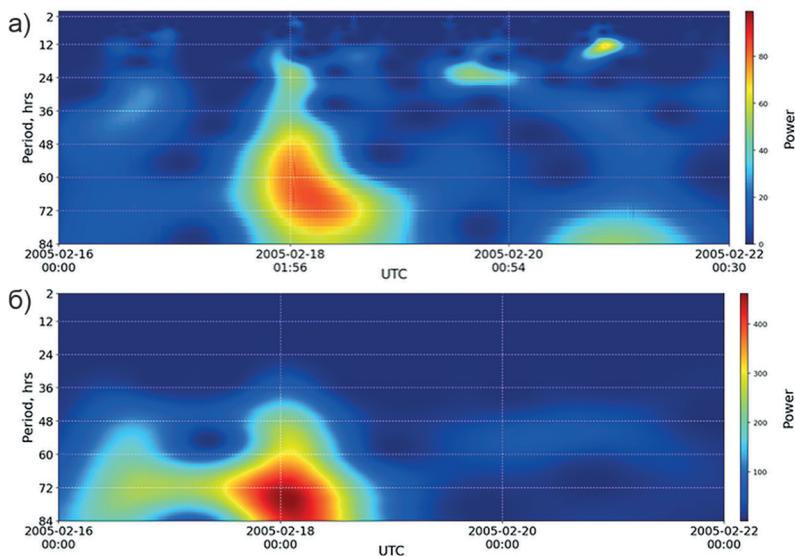


Рис. 6. Сравнение вейвлет-периодограмм модуля отклонения магнитного склонения  $|\Delta D|$  (а) и Dst-индекса, характеризующего уровень магнитной активности (б), по данным высокоширотных обсерваторий (2015 г.)

Fig. 6. Comparison of wavelet periodograms of the magnetic declination deviation modulus  $|\Delta D|$  (a) and the Dst index characterizing the level of magnetic activity (b) according to data from high-latitude observatories (2015)

ряды значений SME и данные спектрального анализа в качестве основы для вероятностного прогнозирования метрологических рисков. Построение регрессионной модели, связывающей уровень SME с вероятностью превышения порога  $X_{\text{доп}}$  и долей низкокачественных материалов, открывает возможность проактивного планирования буровых операций.

### Обсуждение результатов

Наблюдаемое логнормальное распределение отклонений  $|\Delta D|$  и  $|\Delta I|$  (см. рис. 2, 3) по данным 2015 г. подтверждает мультипликативную природу формирования погрешности, связанную со сложной динамикой ионосферных токов. «Тяжелые хвосты», аппроксимируемые обобщенным распределением Парето (см. табл. 2), свидетельствуют о высокой вероятности редких, но значительных по амплитуде отклонений во время интенсивных суббурь, когда значения  $|\Delta D|$  могут достигать десятков градусов. Выявленная пространственная вариация параметров распределения Парето отражает неоднородность магнитосферно-ионосферных возмущений в авроральной зоне: наибольшие значения  $\xi$  для  $|\Delta D|$  зафиксированы на обсерваториях Харасавэй (0,30) и Тикси (0,24), расположенных в области максимальной интенсивности электроджета.

Сезонный ход амплитуды отклонений по данным 2015 г. (см. рис. 4, а, б) и его согласованность с сезонной динамикой индекса SME за 2022–2024 гг. (см. рис. 4, в), а также выявленная корреляция между индексом SME и долей низкокачественных замеров ( $\rho = 0,78$ , см. рис. 5) подтверждают, что данный индекс является адекватным индикатором рисков для магнитной навигации. Спектральный анализ рядов  $|\Delta D|$  за 2015 г. (см. рис. 6) выявил характерные для суббурь периоды 2–6 ч, что указы-

вает на их ключевую роль в генерации экстремальных погрешностей. Пороговый эффект проявляется при значениях  $SME \geq 500$  нТл.

Отметим два ключевых ограничения. Во-первых, статистические модели экстремальных отклонений построены по данным за 2015 г. — период максимума 24-го солнечного цикла, в связи с чем полученные количественные оценки вероятностей (0,95–6,3%) следует рассматривать как консервативные. Экстраполяция на другие фазы цикла требует дополнительных исследований. Во-вторых, предполагается эквивалентность погрешности на поверхности и в стволе скважины без учета возможного экранирующего эффекта горных пород [19, 20].

### Заключение

На основе анализа данных магнитных обсерваторий за 2015 г. установлено, что распределение отклонений магнитного склонения и наклона от референсных значений ( $|\Delta D|$  и  $|\Delta I|$ ) подчиняется логнормальному закону, что указывает на мультипликативную природу формирования погрешности. Ключевым результатом является выявление и статистическая характеристика «тяжелых хвостов» этих распределений, составляющих от 6% до 19% выборки и наилучшим образом аппроксимируемых обобщенным распределением Парето.

Данные хвосты соответствуют экстремальным фазам геомагнитных суббурь, когда отклонения  $|\Delta D|$  могут достигать десятков градусов, что на порядок превышает допустимый уровень дополнительной погрешности.

Верификация на практических данных за 2022–2024 гг. подтвердила значимость выявленных закономерностей. Установлена статистически значимая корреляция ( $\rho = 0,78$ ,  $p < 0,01$ ) между

индексом SME и долей низкокачественных инклинометрических материалов. Выявлен пороговый эффект ( $SME \geq 500$  нТл), после которого риски резко возрастают. Пространственно-временной анализ показал, что наибольшая опасность возникает в ночном и утреннем секторах аврорального овала (21 – 06 MLT) и в равноденственные месяцы, что согласуется с эффектом Рассела–Макферрона. Спектральный анализ подтвердил, что основным источником экстремальных погрешностей являются суббуревые процессы с характерными периодами 2 – 6 ч.

Таким образом, результаты работы обосновывают переход от реактивных к проактивным методам управления метрологическими рисками при наклонно-

направленном бурении в Арктике. Предложенный подход, основанный на статистическом анализе рядов значений индекса SME и данных магнитных станций, позволяет осуществлять вероятностное прогнозирование периодов неприемлемо высокой погрешности без необходимости развертывания плотной сети вариационных станций. Это создает основу для планирования критических этапов строительства скважин, своевременного переключения на гироскопические системы навигации и оптимизации метрологического контроля. Внедрение данной методики будет способствовать повышению точности, надежности и экономической эффективности освоения арктических месторождений углеводородов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Соловьев А. А. Геомагнитное сопровождение наклонно-направленного бурения // *Вестник Российской академии наук*. — 2024. — Т. 94. — № 10. — С. 885 – 891. DOI: 10.31857/S0869587324100023.
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. Pilipenko V. A., Chernikov A. A., Soloviev A. A., Yagova N. V., Sakharov Y. A., Kudin D. V., Kostarev D. V., Kozyreva O. V., Belov A. V. Influence of space weather on the reliability of the transport system functioning at high latitudes // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023, vol. 23, no. 2, pp. 1 – 34. DOI: 10.2205/2023ES000824.
6. 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/S0002333722030074.
7. Poedjono B., Beck N., Buchanan A., Brink J., Longo J., Finn C. A., Worthington E. W. Geomagnetic referencing in the Arctic environment / *SPE Arctic and Extreme Environments Conference & Exhibition*. Moscow, Russia, 2011. SPE-149629-Pp. DOI: 10.2118/149629-MS.
8. Kudin D. V., Gvishiani A. D., Nikitina I. M., Belov I. O., Dzeboev B. A., Grudnev A. A., Dzeranov B. V., Krasnoperov R. I. Storage and processing of big data for geomagnetic support of directional drilling // *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 21, article 9730. DOI: 10.3390/app14219730.
9. Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2012, vol. 117, A9, article A09213. DOI: 10.1029/2012JA017683.
10. Kovalev D. V., Vorobev A. V., Valchuk A. S., Vorobeva G. R., Khannanov N. K. Assessment of the effects of space weather on the reliability of readings of magnetic inclinometers // *Cosmic Research*. 2025, vol. 63, no. 6, pp. 582 – 590. DOI: 10.1134/S001095252560177X.
11. Farcomeni A., Geraci M. Quantile ratio regression // *Statistics and Computing*. 2024, vol. 34, article 94. DOI: 10.1007/s11222-024-10406-8.

12. Trebault H., Finlay C., Beggan C. D., Alken P. International geomagnetic reference field: The 12th generation // *Earth, Planets and Space*. 2015, vol. 67, article 158. DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9.
13. Russell C. T., McPherron R. L. Semiannual variation of geomagnetic activity // *Journal of Geophysical Research*. 1973, vol. 78, no. 1, pp. 92 – 108. DOI: 10.1029/JA078i001p00092.
14. Vorobev A. V., Soloviev A. A., Pilipenko V. A., Vorobeve G. R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis // *Solar-Terrestrial Physics*. 2022, vol. 8, no. 2, pp. 81 – 87. DOI: 10.12737/stp-82202212.
15. 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.
16. Love J. J., Finn C. A. Real-time geomagnetic monitoring for space weather-related applications: Opportunities and challenges // *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 1 – 8. DOI: 10.1002/2017SW001665.
17. Фельдштейн Я. И. Открытие и первые исследования аврорального овала (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2016. — Т. 56. — № 2. — С. 139. DOI: 10.7868/S0016794016020048.
18. Love J. J., Chulliat A. An international network of magnetic observatories // *Eos Transactions American Geophysical Union*. 2013, vol. 94, no. 42, pp. 373 – 384. DOI: 10.1002/2013EO420001.
19. Бухтояров Б. Н., Старикова О. Р., Петров В. Г., Кудин Д. В., Виноградова А. А. Геомагнитные данные для направленного бурения и позиционирования скважин // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2025. — № 4. — С. 71 – 82. DOI: 10.56195/207933322025-25-4-71-82.
20. Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю., Соловьев А. А. Исследование геомагнитного поля и проблемы точности бурения наклонно-направленных скважин в Арктическом регионе // *Горный журнал*. — 2015. — № 10. — С. 94 – 99. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.17. **ПЛАБ**

## REFERENCES

1. 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.
2. 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.
3. Soloviev A. A. Geomagnetic support for directional drilling. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2024, vol. 94, no. 10, pp. 885 – 891. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0869587324100023.
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. Pilipenko V. A., Chernikov A. A., Soloviev A. A., Yagova N. V., Sakharov Y. A., Kudin D. V., Kostarev D. V., Kozyreva O. V., Belov A. V. Influence of space weather on the reliability of the transport system functioning at high latitudes. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023, vol. 23, no. 2, pp. 1 – 34. DOI: 10.2205/2023ES000824.
6. 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, no. 3, pp. 136 – 152. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333722030074.
7. Poedjono B., Beck N., Buchanan A., Brink J., Longo J., Finn C. A., Worthington E. W. Geomagnetic referencing in the Arctic environment. *SPE Arctic and Extreme Environments Conference & Exhibition*. Moscow, Russia, 2011. SPE-149629-Pp. DOI: 10.2118/149629-MS.
8. Kudin D. V., Gvishiani A. D., Nikitina I. M., Belov I. O., Dzeboev B. A., Grudnev A. A., Dzeranov B. V., Krasnoperov R. I. Storage and processing of big data for geomagnetic support of directional drilling. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, no. 21, article 9730. DOI: 10.3390/app14219730.
9. Gjerloev J. W. The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2012, vol. 117, A9, article A09213. DOI: 10.1029/2012JA017683.
10. Kovalev D. V., Vorobev A. V., Valchuk A. S., Vorobeve G. R., Khannanov N. K. Assessment of the effects of space weather on the reliability of readings of magnetic inclinometers. *Cosmic Research*. 2025, vol. 63, no. 6, pp. 582 – 590. DOI: 10.1134/S001095252560177X.
11. Farcomeni A., Geraci M. Quantile ratio regression. *Statistics and Computing*. 2024, vol. 34, article 94. DOI: 10.1007/s11222-024-10406-8.

12. Trebault H., Finlay C., Beggan C. D., Alken P. International geomagnetic reference field: The 12th generation. *Earth, Planets and Space*. 2015, vol. 67, article 158. DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9.
13. Russell C. T., McPherron R. L. Semiannual variation of geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research*. 1973, vol. 78, no. 1, pp. 92 – 108. DOI: 10.1029/JA078i001p00092.
14. 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, no. 2, pp. 81 – 87. DOI: 10.12737/stp-82202212.
15. 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, no. 2, pp. 156 – 170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_2\_0\_156.
16. Love J. J., Finn C. A. Real-time geomagnetic monitoring for space weather-related applications: Opportunities and challenges. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 1 – 8. DOI: 10.1002/2017SW001665.
17. Feldstein Ya. I. Discovery and first studies of the auroral oval (review). *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016, vol. 56, no. 2, pp. 139. [In Russ]. DOI: 10.7868/S0016794016020048.
18. Love J. J., Chulliat A. An international network of magnetic observatories. *Eos Transactions American Geophysical Union*. 2013, vol. 94, no. 42, pp. 373 – 384. DOI: 10.1002/2013EO420001.
19. Bukhtoyarov B. N., Starikova O. R., Petrov V. G., Kudin D. V., Vinogradova A. A. Geomagnetic data for directional drilling and well positioning. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025, no. 4, pp. 71 – 82. [In Russ]. DOI: 10.56195/207933322025-25-4-71-82.
20. Gvishiani A. D., Lukyanova R. Yu., Soloviev A. A. Study of the geomagnetic field and problems of directional drilling accuracy in the Arctic region. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 10, pp. 94 – 99. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.17.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Воробьева Гульнара Равиелевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, доцент,  
профессор, e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0001-7878-9724,

*Воробьев Андрей Владимирович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук,  
доцент, профессор АН РБ, зав. кафедрой,  
e-mail: geomagnet@list.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9680-5609,

*Шехтман Лидия Ивановна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент,  
доцент, e-mail: lidia.shehrman@yandex.ru,

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологий.

**Для контактов:** Воробьева Г.Р., e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*G.R. Vorobeva*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Professor, e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0001-7878-9724,

*A.V. Vorobev*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Professor of Academy of Sciences of Republic of Bashkortostan,  
Head of Chair, e-mail: geomagnet@list.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-9680-5609,

*L.I. Shekhtman*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Assistant Professor, e-mail: lidia.shehrman@yandex.ru,

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology, 450000, Ufa, Russia.

**Corresponding author:** G.R. Vorobeva, e-mail: gulnara.vorobeva@gmail.com.

Получена редакцией 24.02.2026; получена после рецензии 13.04.2026; принята к печати 10.08.2026.

Received by the editors 24.02.2026; received after the review 13.04.2026; accepted for printing 10.08.2026.