

Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем

А. В. ВОРОБЬЁВ, Г. Р. ВОРОБЬЁВА

Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия, e-mail: geomagnet@list.ru

Исследовано влияние геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем. Обоснована необходимость введения индексов геомагнитной активности с целью формализации этого влияния и уточнения метрологических характеристик инклинометрического оборудования. Предложена и описана поэтапная методика расчёта введённых индексов. Численно рассчитаны и оценены предложенные индексы на базе реальных моделей геомагнитной активности за 72-часовой период времени. Проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: инклинометрические исследования, геомагнитная активность, геофизические информационно-измерительные системы, индексы геомагнитной активности.

The influence of geomagnetic activity on metrological characteristics of inclinometric information measuring systems was investigated. The need of introducing the of geomagnetic activity for formalization of that influence ($I_{\text{err}}/D_{\text{err}}$ -indices). These indices are supposed for clarification of metrological and methodical support, which is used during calibration, verification and operation of inclinometric equipment. The detailed procedure of the indices calculation is also represented as well as the experiment of calculation and estimation of the suggested geomagnetic activity indices on the basis of real models of geomagnetic activity for 72-hour period. The obtained results are discussed.

Key words: inclinometric research, geomagnetic activity, geophysical information measuring systems, geomagnetic activity indices.

Эффективное освоение подземного пространства невозможно без использования современных систем подземной навигации. При этом проведение высокоточных инклинометрических исследований является одной из основных задач как для систем данного рода, так и для сложных буровых установок.

Порог чувствительности современных геофизических информационно-измерительных систем (ИИС) сопоставим, а во многих случаях ниже амплитудного диапазона вариаций геомагнитного поля, вызванных геомагнитной активностью (ГМА). Так, магнитные теодолиты, широко применяемые в магнитных станциях, обеспечивают возможность регистрации магнитной индукции с точностью до $\pm 0,001$ нТл, тогда как даже слабая магнитная буря (класса G1—G2) может исказить магнитосферу у поверхности Земли на 500 нТл и более [1].

В этой связи специалисты в области геофизики, геологии, приборостроения и других отраслей наукоёмкого производства, сопряжённых с процессами разведки и добычи полезных ископаемых, уделяют всё большее внимание контролю, прогнозу, анализу и минимизации дополнительных погрешностей, обусловленных ГМА [2].

Возникает актуальная технически сложная задача оценки влияния ГМА на метрологические характеристики инклинометрического оборудования в процессах его калибровки и эксплуатации. Решение этой задачи требует системного подхода, опирающегося на действующие в соответствующей отрасли стандарты и нормативные документы.

Метрологическое обеспечение инклинометрических ИИС. Под инклинометрическими исследованиями понима-

ют измерения зенитного и азимутального углов скважины в зависимости от её глубины [3]. Зенитный угол — угол θ между касательной к оси ствола в рассматриваемой точке и вертикалью, проходящей через данную точку, а азимутальный — угол между апсидальной и меридиональной плоскостями [3]. Координаты X, Y, Z точек оси ствола скважины вычисляют по дирекционным углам, для чего в измеренные магнитные азимуты вводят поправку на магнитное склонение и сближение меридианов. В настоящее время подобные исследования выполняют с помощью магнитных или гироскопических инклинометров с непрерывным или точечным характером измерений.

В общем виде погрешность инклинометрической системы определяется как $A = A_{\text{осн}} + A_{\text{доп}}$, где A , $A_{\text{осн}}$, $A_{\text{доп}}$ — фактическая, основная и дополнительная погрешности системы, соответственно. При этом критерием точности инклинометрических измерений является средняя квадратическая погрешность, вычисляемая по разностям двойных измерений. Эта погрешность не должна превышать основную погрешность инклинометра, т. е. [3]

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=2}^n (d_i^2 / 2n)},$$

где δ — средняя квадратическая погрешность измерения углов; d — разность двойных измерений угла в i -й точке; n — число двойных измерений.

Основной погрешностью считается погрешность средств измерений (СИ), используемых в нормальных условиях, а дополнительной — составляющая этой погрешности, возникающая комплементарно основной из-за отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального значения или вследствие её выхода за пределы нормальной области значений [5]. Согласно стандарту [6] нормальными для измерений считаются условия, при которых составляющая погрешности СИ от действия совокупности влияющих величин не превышает 35 % предела допускаемой основной погрешности этих средств:

$$0,35A_{\text{осн}} \leq A_{\text{доп}} = A_1 + A_2 + \dots + A_n, \quad (1)$$

где A_1, A_2, A_n — гетерогенные составляющие дополнительной погрешности СИ (инклинометрической системы — в частном случае).

Допускаемая основная погрешность измерения зенитного угла составляет не более $\pm 0,5^\circ$, а азимутального (для зенитных углов более 3°) — не более $\pm 2^\circ$ [4]. Дополнительные погрешности при определении зенитного угла, вызванные изменениями напряжения питания и температуры окружающей среды на каждые 10°C относительно стандартного значения температуры, равного 20°C , не должны превышать $0,2A_{\text{осн}}$ и $0,1A_{\text{осн}}$, соответственно:

$$A_{\text{доп}} = A_U + A_T + A_M + \dots + A_n, \quad (2)$$

где A_U, A_T, A_M — погрешности, вызванные изменениями напряжения питания, температуры окружающей среды и ГМА, соответственно.

Запишем неравенства с учётом (1), (2):

$$0,2A_{\text{осн}} + (|20 - T|/100)A_{\text{осн}} + A_M \leq 0,35A_{\text{осн}}; \quad (3)$$

$$k_U A_{\text{осн}} + k_T A_{\text{осн}} + A_M \leq k_F A_{\text{осн}} \text{ или } A_M \leq A_{\text{осн}} [k_F - (k_U + k_T)], \quad (4)$$

где T — температура; k_U, k_T — коэффициенты допустимого уровня погрешности, вызванной изменениями напряжения питания относительно основной погрешности и температуры окружающей среды относительно нормальных условий, соответственно; k_F — коэффициент допустимого уровня дополнительной погрешности относительно основной погрешности (k_F выбирают из ряда 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 согласно [6]).

В условиях окружающей среды, параметры которой приближены к идеальным, т. е. когда коэффициенты k_U, k_T равны нулю, можно определить максимально допустимый уровень погрешности, вызванной только ГМА и имеющей важное практическое значение при проверке и калибровке инклинометрических систем в лабораторных условиях:

$$A_M \leq k_F A_{\text{осн}}. \quad (5)$$

Для дальнейших исследований введём понятие тестового инклинометра — виртуальной модели прибора, обладающего набором параметров, численно равных аналогичным характеристикам и усреднённым по ряду наиболее распространённых инклинометрических систем. Рассмотрим метрологические характеристики такого прибора: основная погрешность $A_{\text{осн}} = \pm 0,25^\circ$ при измерениях зенитного угла в диапазоне измерений $0-180^\circ$; $A_{\text{осн}} = \pm 1,6^\circ$ при определе-

нии азимута, когда $\theta > 3^\circ$ и диапазон составляет $0-360^\circ$; температурная погрешность $A_T = \pm 0,1A_{\text{осн}}/10^\circ\text{C}$ в диапазоне $-10 \dots 120^\circ\text{C}$. Таким образом, при измерениях зенитного угла максимальный уровень дополнительной погрешности инклинометра, обусловленной ГМА, согласно условию (5) и его метрологическим характеристикам составит $\pm 0,0875^\circ$, а при определении азимутального $\pm 0,56^\circ$.

Для тестового инклинометра при отсутствии прочих воздействующих факторов имеем

$$\Delta T = 0,35A_{\text{осн}} / 0,1A_{\text{осн}} \cdot 10^\circ\text{C} = \pm 35^\circ\text{C},$$

где ΔT — допустимое отклонение температуры среды эксплуатации тестового прибора относительно 20°C , сопровождаемое дополнительной погрешностью, которая не превышает $0,35A_{\text{осн}}$.

Аналогичные выводы справедливы и относительно погрешности, вызванной изменением напряжения питания инклинометрической системы.

Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрического оборудования. Если при вариациях температуры окружающей среды или напряжения питания проблему минимизации погрешностей, обусловленных этими факторами, можно эффективно решить с помощью систем климат-контроля и стабилизаторов напряжения, то минимизация воздействия ГМА на магниточувствительные СИ представляет задачу, решать которую предлагается посредством прогноза и оценки степени негативного воздействия ГМА на инклинометрические системы [7].

Под $I_{\text{err}} / D_{\text{err}}$ -индексами будем понимать степень отклонения показаний инклинометрической ИИС в результате ГМА, наблюдаемую при регистрации параметров магнитного наклона зенитного угла (или азимута), ранжированную по 10-балльной квазилогарифмической шкале от 0 до 9. Нижнюю границу отклонения показаний инклинометрической системы по зенитному углу в результате ГМА (при $\Delta T \leq 10^\circ\text{C}$) определим из выражений (3), (4), откуда следует, что $k_M = k_F - k_U - k_T = 0,05$, где k_M — коэффициент уровня погрешности, определяемой ГМА; $A_M = k_M A_{\text{осн}}$.

С учётом предела допускаемого значения основной погрешности при измерениях зенитного угла тестового инклинометра, отклонение параметра магнитного наклона от истинного значения в результате ГМА при $I_{\text{err}} = 0$ составит $\pm 0,0125^\circ$. Остальные уровни примут значения, представленные в табл. 1. Рассуждения по D_{err} -индексу производятся в полной аналогии с I_{err} -индексом. В предлагаемой авторами методике вычисления $I_{\text{err}}/D_{\text{err}}$ -индексов ГМА допускается, что изменение намагниченности грунта во времени мало и им можно пренебречь. Рассмотрим эту методику.

Этап 1. Выбор актуальной точки географического пространства, для которой планируется вести расчёт и регистрацию $I_{\text{err}}/D_{\text{err}}$ -индексов ГМА. Здесь же имеет смысл определить технические средства регистрации параметров геомагнитного поля и проанализировать их технико-метрологические характеристики.

Этап 2. Определение параметров составляющей геомагнитного поля внутриземных источников. Эта составляющая обусловлена ненулевыми магнитными свойствами горных пород в точке географического пространства регистрации $I_{\text{err}}/D_{\text{err}}$ -индексов ГМА. При этом допускается, что изменение магнитных свойств земного грунта с течением времени мало и им также можно пренебречь.

Таблица 1

Ранжировка и комментарии к значениям $I_{\text{егг}}/D_{\text{егг}}$ -индексам ГМА

$I_{\text{егг}}/D_{\text{егг}}$ -индекс	Отклонение от истинного значения под действием ГМА		K_m	Рекомендации
	магнитного наклоения, °	магнитного склонения, °		
0	> 0,0125	> 0,08	> 0,05	Нормальные условия
1	0,0125—0,025	0,08—0,16	0,10	Незначительные отклонения
2	0,025—0,050	0,16—0,32	0,20	
3	0,05—0,10	0,32—0,64	0,40	Поверка, калибровка не рекомендуются, эксплуатация допускается
4	0,1—0,2	0,64—1,28	0,8	
5	0,2—0,4	1,28—2,56	1,6	Поверка, калибровка, эксплуатация не рекомендуются
6	0,4—0,8	2,56—5,12	3,2	Поверка, калибровка неэффективны, эксплуатация не рекомендуется
7	0,8—1,6	5,12—10,24	6,4	
8	1,6—3,2	10,24—20,48	12,8	Поверка, калибровка, эксплуатация неэффективны
9	< 3,2	< 20,48	< 12,8	

В магнитоспокойный день в непосредственной близости от используемой магнитометрической ИИС составляющие $B_{\text{техн}}$, $B_{\text{внешн}}$ близки к нулю, т. е. $B_{\text{ГЕ}} = B_{\text{вн}}$, где $B_{\text{вн}}$ — вектор индукции геомагнитного поля внутриземных источников, таких как главное поле, магнетизм земной коры и т. п. Тогда

$$B_r = B_{\text{вн}} - B_0, \quad (6)$$

где B_r — составляющая геомагнитного поля внутриземных источников в заданной точке географического пространства, обусловленная магнитными свойствами горных пород; B_0 — магнитная индукция главного поля.

Вектор индукции геомагнитного поля внутриземных источников $B_{\text{вн}}$ можно вычислить как среднее арифметическое числовых значений зарегистрированных параметров геомагнитного поля за несколько магнитоспокойных периодов. Составляющая B_0 в выражении (6) определяется согласно стандарту [8].

Этап 3. Расчёт составляющих $B_{0\text{акт}}$ для актуального периода наблюдений $I_{\text{егг}}/D_{\text{егг}}$ -индексов ГМА, а также опорных значений $BX_{\text{оп}}$, $BY_{\text{оп}}$, $BZ_{\text{оп}}$, $B_{\text{оп}}$. При этом $B_{\text{оп}} = B_r + B_{0\text{акт}}$,

$B_{\text{оп}}^2 = BX_{\text{оп}}^2 + BY_{\text{оп}}^2 + BZ_{\text{оп}}^2$, где $B_{\text{оп}}$, $BX_{\text{оп}}$, $BY_{\text{оп}}$, $BZ_{\text{оп}}$ — эталонные значения полного вектора индукции геомагнитного поля внутриземных источников и его составляющих; $B_{0\text{акт}}$ — расчётное значение главного поля по состоянию на исследуемый период.

Этап 4. Расчёт параметров магнитного наклоения и магнитного склонения по данным значений внутриземных источников геомагнитного поля, определённых на предыдущем этапе:

$$I_{\text{оп}} = \text{asin}(BZ_{\text{оп}}/B_{\text{оп}}); D_{\text{оп}} = \text{atan}(BY_{\text{оп}}/BX_{\text{оп}}),$$

где $I_{\text{оп}}$, $D_{\text{оп}}$ — параметры магнитного наклоения и магнитного склонения, соответственно, принимаемые за эталонные.

Этап 5. Регистрация фактических значений параметров магнитного наклоения и склонения по экспериментальным данным, полученным с помощью трёхкомпонентной магнитометрической ИИС:

$$I_{\text{акт}} = \text{asin}(BZ_{\text{акт}}/B_{\text{акт}}); D_{\text{акт}} = \text{atan}(BY_{\text{акт}}/BX_{\text{акт}}),$$

где $I_{\text{акт}}$, $D_{\text{акт}}$ — фактические значения параметров магнитного наклоения и склонения, соответственно, найденные по экспериментальным данным с помощью трёхкомпонентной магнитометрической ИИС.

Этапы 6—8. Определение абсолютного отклонения наблюдаемых параметров магнитного склонения и наклоения от их эталонных значений:

$$\Delta I_{\text{акт } i} = |I_{\text{оп}} - I_{\text{акт } i}|; \Delta D_{\text{акт } i} = |D_{\text{оп}} - D_{\text{акт } i}|,$$

где $\Delta I_{\text{оп}}$, $\Delta D_{\text{оп}}$ — абсолютные отклонения наблюдаемых параметров магнитного склонения и наклоения, соответственно, от их эталонных значений.

Этап 9. Усреднение временных рядов по трёхчасовым интервалам и ранжировка значений в соответствии с табл. 2:

$$\overline{\Delta I_{\text{акт}}} = \frac{1}{180m} \sum_{i=0}^{180m} \Delta I_{\text{акт } i}; \overline{\Delta D_{\text{акт}}} = \frac{1}{180m} \sum_{i=0}^{180m} \Delta D_{\text{акт } i},$$

где $\overline{\Delta I_{\text{акт}}}$, $\overline{\Delta D_{\text{акт}}}$ — усреднение временных рядов $\Delta I_{\text{акт}}$, $\Delta D_{\text{акт}}$ по трёхчасовым интервалам; m — число измерений.

Таблица 2

Результаты наблюдений индексов ГМА за 72-часовой период времени для окрестности обсерватории «SOD»

Дата	Время	Индексы		
		$I_{\text{егг}}$	$D_{\text{егг}}$	K_p
04.06.2016	03:00	1	1	5
	06:00	1	1	3
	09:00	0	0	2
	12:00	1	1	2
	15:00	0	4	3
	18:00	1	5	3
	21:00	2	5	3
	24:00	1	5	2
05.06.2016	03:00	0	0	3
	06:00	1	1	4
	09:00	1	1	0
	12:00	0	1	0
	15:00	1	3	1
	18:00	0	3	2
	21:00	0	3	1
	24:00	0	3	0
06.06.2016	03:00	1	2	5
	06:00	1	2	4
	09:00	1	2	6
	12:00	1	2	4
	15:00	1	4	4
	18:00	1	5	4
	21:00	1	5	2
	24:00	1	5	3

В табл. 2 представлены результаты наблюдения $I_{\text{err}}/D_{\text{err}}$ -индексов за трое суток (72 часа) в период с 04.06.2016 по 06.06.2016 г. в точке географического пространства: 67,37° N; 26,63° E; 178 м над уровнем моря (магнитная станция «Sodankyla» (SOD), г. Соданкюля, Финляндия). Наблюдение выполнено посредством инструментария метеоинформационной системы GEOMAGNET [9].

Анализ представленных в табл. 1, 2 данных выявил, что с 15:00 часов 5 июня 2016 г. до 03:00 часов 6 июня 2016 г. в окрестностях г. Соданкюля сформировалась неблагоприятная магнитная обстановка для работы с прецизионным инклинометрическим оборудованием. Другими словами, при контроле параметров магнитного наклона и магнитного склонения в период с 15:00 часов 05.06.2016 г. до 03:00 часов 06.06.2016 г. дополнительная погрешность, вызванная ГМА, в среднем соответствовала основной погрешности устройства, а значит, ухудшала показатель точности системы примерно в 1,4 раза.

Заключение. Полученные результаты служат теоретическим базисом для модернизации метрологического обеспечения, используемого при инклинометрических исследованиях. Результаты теоретических и экспериментальных изысканий показали, что даже слабая магнитная буря класса G1 способна существенно ухудшить метрологические характеристики прецизионных ИИС, что требует введения корректировок в метрологическое обеспечение.

Следовательно, целесообразно не только учитывать и контролировать специальные $I_{\text{err}}/D_{\text{err}}$ -индексы ГМА, но и производить их дальнейшие исследования как теоретического, так и эмпирического характера, связанные с прогнозом и характером их распределения по поверхности Земли, в её недрах и околоземном пространстве.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 14-07-00260-а, 15-07-02731-а).

Л и т е р а т у р а

1. Мандрикова О. В., Смирнов С. Э., Соловьёв И. С. Метод определения индекса геомагнитной активности на основе вейвлет-пакетов // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 1. С. 117—127.
2. Кузнецов В. Д. Солнечно-земная физика и её приложения // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 3. С. 327—336.
3. РД 153-39.0—072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах.
4. Воробьёв А. В., Шакирова Г. Р., Иванова Г. А. Система принятия решения для гибридной инклинометрической системы на основе технологии картографического веб-сервиса // Фундаментальные исследования. 2015. № 5 (Ч. 2). С. 260—264.
5. РМГ 22—99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
6. ГОСТ 8.395—80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования.
7. Soloviev A., Gvishiani A. Mathematical Tools for Geomagnetic Data Monitoring and the INTERMAGNET Russian Segment // Data Science Journal. 2013. V. 12. P. WDS114—WDS119.
8. ГОСТ 25645.126—85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников для середины магнитоспокойного периода.
9. Vorobev A. V., Vorobeva G. R. Web-based geoinformation system for exploring geomagnetic field, its variations and anomalies // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. V. 582. P. 22—35. ID: 2-s2.0-84958279604.

Дата принятия 17.03.2017.