

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.8.08

Оценка влияния геомагнитной активности на дополнительную погрешность инклинометрических систем**Д.В. Ковалев**

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450000, Уфа, ул. Первомайская, 14. E-mail: dvkovalev2000@mail.ru
(Статья поступила в редакцию 28 сентября 2024 г.)

Исследование дополнительной погрешности инклинометрических измерений является важной задачей для современной геофизики. В процессе инклинометрии ключевую роль играет точность прибора, которая зависит не только от изначальных характеристик прибора и его калибровок, но также и от внешних воздействий. Важнейшее из таких воздействий – геомагнитная активность, которая оказывает серьезное влияние на погрешность инклинометрических систем, что впоследствии может привести к существенным экономическим и репутационным потерям.

Ключевые слова: *инклинометрическая система, погрешность геофизических исследований, геонавигация, геомагнитное поле, вариации геомагнитного поля.*

DOI: 10.17072/psu.geol.23.4.323

Введение

При проектировании скважин создается конкретная траектория, по которой должен проходить ствол скважины. Благодаря инклинометрии в процессе бурения определяют пространственное положение ствола скважины, что, в свою очередь, способствует своевременной корректировке направления бурения с целью достижения оптимальной траектории скважины к залежи, а также во избежание пересечений со стволами других скважин. С увеличением плотности сетки скважин разрабатываемых месторождений увеличиваются и требования к траектории, которая должна не только обеспечивать оптимальный путь к залежи, учитывая все геологические условия, но и не иметь вероятности пересечения с траекториями близлежащих скважин.

Для соблюдения данной траектории применяются различные средства геонавигации, которые могут в любой момент времени

определить положение ствола в пространстве, что позволяет своевременно корректировать направление долота (Акбулатов и др., 2013).

Точное определение координат траектории скважины имеет чрезвычайную важность в связи с существенными экономическими затратами на бурение скважин и еще большими экономическими и репутационными затратами в случае необходимости ликвидации аварий вследствие пересечений стволов скважин (Козыряцкий, 2013).

Для определения пространственного положения ствола скважины используются инклинометрические системы (MWD), которые рассчитывают значения зенитного и азимутального угла, основываясь на воздействии гравитационного и магнитного полей Земли. В современных реалиях к системам MWD предъявляют ряд существенных требований, благодаря которым появляется возможность обеспечения точности измерений (Ковшов, Коловертнов, 2001).

Краткие сведения о погрешностях инклинометрических систем

Как и любому прибору, инклинометрическим системам свойственны погрешности, которые могут существенно повлиять на конечный результат измерений. Погрешности инклинометрических систем подразделяются на:

Основную погрешность (Инструментальная погрешность), свойственную любому средству измерения и принимаемую за погрешность при нормальных условиях. Например, погрешности датчиков инклинометра, погрешности в калибровочных установках, нарушение ортогональности вращения узлов прибора и др.

Дополнительную погрешность, вызванную аккумуляцией внешнего воздействия, отличного от нормальных условий, на измерительное оборудование. К таким погрешностям относятся вибрации, изменения температуры, нестабильность напряжения питания оборудования и геомагнитные возмущения. Последние оказывают наибольшее влияние на значение дополнительной погрешности инклинометрических систем (Рахмангулов, 2015).

В общем случае погрешность инклинометра представляет собой совокупность основной и дополнительной погрешности. Согласно ГОСТ 8.395-80, дополнительная погрешность измерительных систем не должна превышать 35 % от основной погрешности. В свою очередь, основная погрешность инклинометрических систем допускается в диапазоне не более $\pm 2^\circ$ для азимутальных измерений и не более $\pm 0,5^\circ$ для зенитных измерений (Воробьев и др., 2015).

В связи с тем, что дополнительная погрешность является совокупностью различных факторов, то и противодействовать данным воздействиям необходимо в комплексе. Так, влияние температурных колебаний можно минимизировать благодаря системам климат-контроля; вибрационное влияние – методом статичных замеров; влияние нестабильного напряжения – при помощи стабилизаторов напряжения (Рахмангулов, 2015). Вследствие этого данные, составляющие дополнительную погрешность, станут минимальными и незначительными. Важной задачей остается прогнозирование и оценка негативного влияния геомагнитных возмущений (ГМВ) (Воробьев и др., 2017).

Влияние геомагнитной активности на дополнительную погрешность инклинометрических систем

Геомагнитные вариации представляют собой отклонение наблюдаемой величины напряженности магнитного поля от усредненных значений за определённый промежуток времени и принятых за эталон состояния геомагнитосферы (Воробьев и др., 2015).

Геомагнитные возмущения могут быть следствием множества естественных процессов и явлений, таких как:

- вращение Земли вокруг своей оси (суточные вариации). В данном случае возмущения связаны с изменением положения определённой точки Земли относительно солнечно-магнитосферной системы координат;

- вращение Земли вокруг Солнца (сезонные вариации). Данные вариации являются следствием совпадения плоскостей экваторов Земли и Солнца (во время весеннего и осеннего равноденствия), что, в свою очередь, за счет повышенной солнечной активности в широтах от 10° до 30° вызывает сильные магнитные вариации. В обратном случае (во время летнего и зимнего солнцестояния) данные вариации минимальны;

- вращение луны вокруг Земли. Несмотря на то, что луна не имеет своего сильного магнитного поля, она оказывает слабое периодическое воздействие на геомагнитное поле Земли;

- вращение Солнца вокруг своей оси (27-дневные ГМВ). Вариации связаны с долгоживущими областями солнечной активности, которые выбрасывают солнечную плазму линеинно, а не радиально, что, в свою очередь, за счет вращения солнца вокруг своей оси создает наблюдаемую закономерность;

- солнечный ветер, представляющий из себя поток ионизированной водородной плазмы из верхнего слоя атмосферы солнца, движущийся со сверхзвуковой скоростью и вызывающий сильные магнитные бури продолжительностью от нескольких секунд до нескольких суток (Beggan et al., 2021);

- 11-летние вариации геомагнитного поля (солнечный цикл, или цикл Швабе), связанные с периодичностью увеличения и уменьшения солнечных пятен на солнце. Увеличение количества солнечных пятен влечёт за

собой усиление солнечного излучения, в значительной мере влияющего на геомагнитное поле земли (Гвишиани, Кедров, 2021);

- постепенные изменения в жидком ядре приводят к «вековым вариациям», значительно изменяющим среднегодовые показатели геомагнитного поля Земли;

- геомагнитные аномалии, представляющие собой области на поверхности Земли, в которых происходит отклонение величины и направления вектора магнитной индукции от среднего значения с данной области вследствие намагниченности верхних слоев земной коры.

Все представленные выше явления в той или иной степени влияют на состояние геомагнитного поля, что приводит к росту дополнительной погрешности инклинометрических измерений, а в случае сильной геомагнитной активности погрешность измерения становится недопустимо высокой (Гвишиани, Лукьянова, 2018).

Также стоит учитывать, что чем выше северные широты и ближе к магнитному северу, тем меньше горизонтальная компонента вектора напряжённости магнитного поля Земли, вследствие чего ощутимее будет

дрифт по азимуту (Poedjono, Beck et al., 2021). В тех же условиях обычно наблюдаются понижение точности и измерение зенитного угла из-за уменьшения в высоких широтах горизонтальной компоненты гравитационного поля Земли – центростремительного Кориолисова ускорения. Два этих фактора приводят к недопустимой погрешности инклинометрических измерений в высокоширотных регионах в условиях высокой геомагнитной активности.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта изучения влияния геомагнитной активности на дополнительную погрешность инклинометрических систем были выбраны данные с геофизической станции «Ловозеро» (код: LOV; географические координаты N67.97°, E35.02°) за 2015 г. Данный год выбран в связи с тем, что он являлся годом наибольшей геомагнитной активности в течение последней 11-летней вариации ГМП (24-го солнечного цикла), продолжавшегося с января 2009 (по данным ИЗМИРАН) по декабрь 2019 г. (рис. 1).

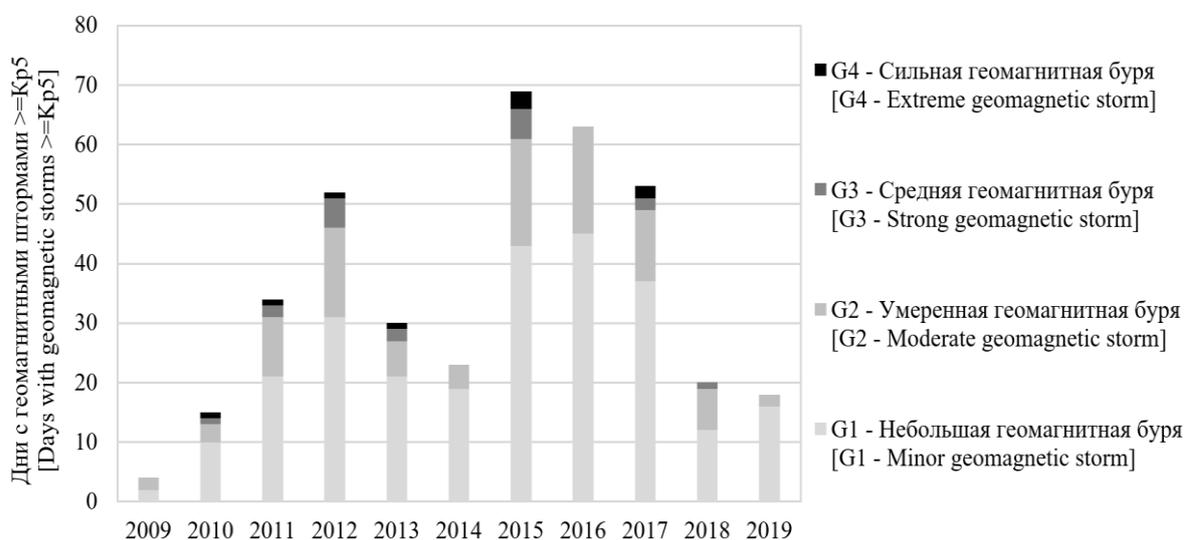


Рис. 1. График количества дней в году, когда наблюдались геомагнитные бури за 24-й солнечный цикл

В ходе исследования были проанализированы 1-минутные данные, включающие ортогональные составляющие возмущения магнитного поля, на основе которых был

проведен расчет вариаций магнитного склонения для дальнейшего сопоставления с эталонными данными магнитного склонения [<https://www.ngdc.noaa.gov/>] (рис. 2).

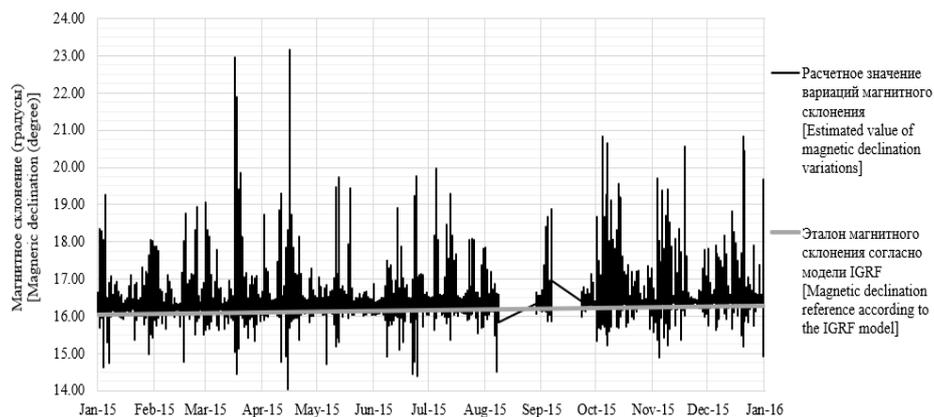


Рис. 2. График вариаций магнитного склонения за 2015 г., рассчитанных на основе данных геофизической станции LOV

Таблица. Сопоставление дат геомагнитных бурь со значениями вариаций магнитного склонения в эти дни

Дата геомагнитной бури	Кр тах	Вариация магнитного склонения	Эталон магнитного склонения	Максимальное отклонение от эталона
05.01.2015–07.01.2015	6+	14,73° ... 17,07°	16,05°	1,32°
01.02.2015–02.02.2015	5	15,53° ... 18,03°	16,07°	1,96°
17.02.2015	5	14,79° ... 18,75°	16,08°	2,67°
24.02.2015	5+	15,53° ... 18,89°	16,08°	2,81°
01.03.2015–02.03.2015	5+	15,63° ... 19,01°	16,09°	2,92°
17.03.2015–18.03.2015	8-	14,46° ... 22,85°	16,1°	6,75°
19.03.2015	5	14,46° ... 20,92°	16,1°	4,82°
22.03.2015	6+	15,58° ... 18,07°	16,1°	1,97°
10.04.2015	5+	14,78° ... 19,30°	16,11°	3,19°
15.04.2015–17.04.2015	6	14,03° ... 23,15°	16,12°	7,03°
06.05.2015	5+	14,73° ... 16,83°	16,13°	1,4°
13.05.2015	6	15,30° ... 19,75°	16,13°	3,62°
18.05.2015	5+	15,96° ... 19,44°	16,14°	3,3°
08.06.2015	6	14,91° ... 17,37°	16,15°	1,24°
22.06.2015–23.06.2015	8+	14,46° ... 19,76°	16,16°	3,6°
04.07.2015–05.07.2015	5+	15,69° ... 19,97°	16,17°	3,8°
13.07.2015	6-	15,37° ... 19,29°	16,17°	3,12°
23.07.2015	5+	16,04° ... 18,08°	16,18°	1,9°
07.09.2015–09.09.2015	6+	15,87° ... 18,80°	16,21°	2,59°
05.10.2015	5	15,50° ... 20,82°	16,23°	4,59°
07.10.2015–08.10.2015	7+	15,22° ... 20,66°	16,23°	4,43°
12.10.2015	5	15,70° ... 19,51°	16,23°	3,28°
03.11.2015–04.11.2015	5+	14,91° ... 19,72°	16,25°	3,47°
07.11.2015	6	15,51° ... 19,20°	16,25°	2,95°
10.11.2015	5+	15,28° ... 19,42°	16,25°	3,17°
10.12.2015	5	15,93° ... 18,17°	16,27°	1,9°
14.12.2015	5+	15,66° ... 18,78°	16,27°	2,51°
20.12.2015–21.12.2015	7-	15,18° ... 20,83°	16,28°	4,55°
31.12.2015	6-	14,93° ... 19,58°	16,28°	3,3°

Анализ показал, что в «спокойное время» колебания магнитного склонения составляют в среднем $\pm 0,5^\circ$, что входит в диапазон допустимой дополнительной погрешности для азимутальных измерений, однако многочисленные магнитные бури оказывают уже существенное влияние на точность измерений. В таблице проведено сопоставление дат и силы геомагнитных бурь при значении максимального отклонения расчетных значений магнитного склонения с эталонными значениями.

Результаты

Анализ представленных в таблице данных выявил, что геомагнитные бури оказывают крайне высокое влияние на дополнительную погрешность инклинометрических систем, что приводит к неэффективности калибровок, поверок и эксплуатации приборов. Также при сопоставлении Кр-индекса магнитных бурь и суббурь со значениями максимального отклонения магнитного склонения от эталона не наблюдается четкая связь, которую можно описать функцией. Это связано с неравномерным воздействием космической погоды на геомагнитное поле Земли.

Заключение

Дополнительная погрешность инклинометрических систем является важной темой для научных исследований и практического применения, особенно в высокоширотных регионах, где существенное влияние на инклинометрические исследования оказывают геомагнитные возмущения, связанные с магнитными бурями и суббурями. Понимание и учет этой погрешности помогают улучшить точность измерений и надежность получаемых результатов. В связи с этим возникает задача создания новых, а также совершенствование уже имеющихся методов прогнозирования геомагнитных возмущений с целью минимизации их влияния на средства измерения.

Библиографический список

Акбулатов Т.О., Левинсон М.Л., Хасанов Р.А. Строительство и навигация сложнопрофильных скважин. Уфа: УГНТУ, 2013. 157 с.

Воробьев А.В., Шакирова Г.Р., Иванова Г.А. Исследование и анализ естественных факторов, воздействующих на метрологические характеристики магнитометрических инклинометров // Вестник УГАТУ. 2015. № 1 (67).

Воробьев 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.

Воробьев А.В., Воробьева Г.Р. Оценка влияния геомагнитной активности на метрологические характеристики инклинометрических информационно-измерительных систем // Измерительная техника: ежемесячный научно-технический журнал / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М., 2017. № 6. С. 21–24. ил. ISSN 0368-1025.

Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в арктическом регионе // Известия. Физика Земли. 2018. Т. 54, № 4. С. 554–564. doi: 10.1134/S0002333718040051

Гвишиани А.Д., Кедров Э.О., Любовцева Ю.С., Барыкина Ю.В. История исследований Геофизического центра РАН. 2016 год // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2021. Т. 13, № 1. С. 50–76.

Ковшов Г.Н., Коловертнов Г.Ю. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: УГНТУ, 2001. 228 с.

Козыряцкий Н.Г. Источники погрешностей инклинометрических исследований скважин // НТВ «Каротажник». 2013. № 3. С. 215–234.

Рахмангулов Р.Р. Новейший метод инклинометрических измерений: усовершенствованная геомагнитная привязка // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 43–46.

Цветков Г.А., Балужева Н.Ю., Костицын В.И. Повышение точности метрологического обеспечения инклинометрических измерений // Приборы и методы измерений. 2010. № 1. С. 95–98.

Beggan C.D., Macmillan S., Brown W. J. and Grindrod S.J. Quantifying Global and Random Uncertainties in High Resolution Global Geomagnetic Field Models Used for Directional Drilling. SPE Drill & Compl, 2021. Vol. 36. P. 603–612. doi: 10.2118/204038-PA

Poedjono B., Beck N., Buchanan A., Borri L., Maus S., Finn C.A., Worthington W.E., White T. Improved Geomagnetic Referencing in the Arctic Environment: SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, October 2013. doi: 10.2118/166850-MS

Assessment of the Influence of Geomagnetic Activity on the Additional Error of Inclinometer Systems

D.V. Kovalev

Ufa State Petroleum Technical University,
14 Pervomayskaya Str., Ufa 450000, Russia. E-mail: dvkovalev2000@mail.ru

The study of additional errors of inclinometer measurements is an important problem. In the process of measurement, the key role is played by the accuracy of the tool, which depends not only on the characteristics of the instrument and its calibration, but also on external influences. The most important of these influences is geomagnetic activity, which has a serious impact on the error of inclinometer systems. This can result in significant economic and reputational losses.

Key words: *inclinometry system; geophysical survey error; navigation; geomagnetic field; variations of geomagnetic field.*

References

- Akbulatov T.O., Levinson M.L., Khasanov R.A.* 2013. Stroitel'stvo i navigatsiya slozhnoprofil'nykh skvazhin [Construction and navigation of complicated wells]. Ufa, USPTU, p. 157. (in Russian)
- Beggan C.D., Macmillan S., Brown W.J., S.J. Grindrod.* 2021. Quantifying Global and Random Uncertainties in High Resolution Global Geomagnetic Field Models Used for Directional Drilling. SPE Drill & Compl, 36:603–612. doi:10.2118/204038-PA
- Gvishiani A.D., Luk'yanova R.Yu.* 2018. Otsenka vliyaniya geomagnitnykh vozmushcheniy na traektoriyu naklonno-napravlennoy bureniya glubokikh skvazhin v arkticheskom regione [Assessment of the influence of geomagnetic disturbances on the trajectory of directional drilling of deep wells in the Arctic region]. Izvestiya. Fizika Zemli, 54(4):554-564. doi: 10.1134/S0002333718040051
- Gvishiani A.D., Kedrov Eh.O., Lyubovtseva Yu.S., Barykina Yu.V.* 2021. Istoriya issledovaniy Geofizicheskogo tsentra RAN. 2016 god [History of research of the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences. 2016]. Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN. 13(1):50-76. (in Russian)
- Kovshov G.N., Kolovertnov G.Yu.* 2001. Pribory kontrolya prostranstvennoy orientatsii skvazhin pri burenii [Devices for monitoring the spatial orientation of wells during drilling], Ufa, USPTU, p. 228. (in Russian)
- Kozyryatskiy N.G.* 2013. Istochniki pogreshnostey inklinometricheskikh issledovaniy skvazhin [Sources of error in inclinometer well surveys]. Kariotazhnik. 3:215-234. (in Russian)
- Poedjono B., Beck N., Buchanan A., Borri L., Maus S., Finn C.A., Worthington W.E., White T.* 2013. Improved Geomagnetic Referencing in the Arctic Environment: SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia. doi: 10.2118/166850-MS
- Rakhmangulov R.R.*, 2015. Advanced downhole surveying Technique: enhanced geomagnetic referencing. Burenie i nef. 6:43-46. (in Russian)
- Tsvetkov G.A., Balueva N.Yu., Kostitsyn V.I.* 2010. Povyshenie tochnosti metrologicheskogo obespecheniya inklinometricheskikh izmereniy [Improving the accuracy of metrological support of inclinometric measurements]. Devices and methods of measurements, 1:95-98. (in Russian)
- Vorob'ev A.V., Shakirova G.R., Ivanova G.A.* 2015. Issledovanie i analiz estestvennykh faktorov, vozdeistviyushchikh na metrologicheskie kharakteristiki magnitometricheskikh inklinometrov [Study and analysis of natural factors affecting the metrological characteristics of magnetometric inclinometers]. Vestnik UGATU. 1(67):107-115. (in Russian)
- Vorob'ev A.V., Shakirova G.R., Ivanova G.A.* 2015. Decision making system based on cartographic web service for a hybrid directional survey tool. Fundamental research. 5(2):260-264. (in Russian)
- Vorob'ev, A.V., Vorob'eva G.R.* 2017. Otsenka vliyaniya geomagnitnoy aktivnosti na metrologicheskie kharakteristiki inklinometricheskikh informatsionno-izmeritel'nykh sistem [Assessment of the influence of geomagnetic activity on the metrological characteristics of inclinometer information-measuring systems]. Izmeritelnaya tekhnika. 6:21-24. (in Russian)