

УДК 531.746, 550.832

И. В. Гринев, А. Б. Королев, В. С. Ситников

ООО "Нефтегазгеофизика"

А. Н. Тихомиров

ФГУП ВНИИ автоматики им. Л. Н. Духова

МОНИТОРИНГ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЦЕЛЬЮ КОМПЛЕКСНОГО УТОЧНЕНИЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предложен метод непрерывного сбора, анализа и учета вариаций естественного магнитного поля Земли с помощью инклинометра, включающего трехосевой магниторезистивный блок. Показано, что предложенный анализ позволяет комплексно повлиять на точность инклинометрических измерений путем уточнения базовой калибровки, а также учета регулярных и нерегулярных вариаций геомагнитного поля во время бурения или каротажа.

Ключевые слова: скважина, инклинометрия, магнитное поле Земли, мониторинг, увеличение точности расчета азимута.

Введение

Как известно, гравитационное поле Земли, традиционно используемое как одно из базовых в геонавигации, является достаточно стабильным. Регулярные суточные (приливные лунные и солнечные) вариации, а также иные более медленные вариации малы по абсолютной величине [7] и практически не влияют на расчетные значения зенитного и визирного углов инклинометра.

В то же время магнитное поле Земли можно считать куда менее стабильным. Суточные вариации магнитного поля существенно влияют на склонение и, как следствие, на расчетные значения азимута. Как показывают более ранние исследования авторов [2], значения регулярных вариаций таковы, что расчетные значения азимута могут колебаться в пределах $\pm 10\%$ от абсолютной допустимой погрешности азимута¹ (АДПА) для средних широт в зависимости от времени суток. Причем данный вид погрешности возрастает с увеличением широты местности.

¹ Предполагается наиболее распространенная величина абсолютной допустимой погрешности, равная $\pm 1,5$ град

Кроме того, существенное влияние на вариации магнитного поля оказывают геомагнитные бури, вызванные, по большей части, неоднородностью солнечного ветра (солнечные вспышки) [1], геомагнитные пульсации [8] и техногенные факторы (уровень мощности на ЛЭП, перемещения магнитных масс и т. п.). Такие колебания могут существенно превышать регулярные суточные вариации геомагнитного поля и достигать значений $\pm 30\%$ и более от АДПА. Как показывает практический опыт калибровок инклинометров, такие нерегулярные техногенные и естественные флуктуации могут в значительной степени искажать показания магнитометров, снимаемые в калибровочных и поверочных точках.

Возмущения магнитного поля, захватывающие обширные территории, также наблюдаются во время землетрясений, вулканических извержений, гроз и т. п. В это время отклонения вектора геомагнитного поля от своей обычной пространственной ориентации могут вызывать увеличение АДПА на десятки, а иногда и сотни процентов. Длительность таких возмущений колеблется от нескольких часов до двух и более суток [1]. Помимо этого, нельзя не учитывать отклонения вектора геомагнитного поля в районах магнитных аномалий. Небольшие магнитные аномалии встречаются довольно часто, особенно в горных районах [4].

Помимо всего прочего, магнитный полюс планеты постоянно меняет свое положение. Значения таких годовых уходов в настоящее время вызывают увеличение АДПА до 7% в Западной Сибири и до 14% в европейской части России [10].

Одновременно с этим в настоящее время наблюдается тенденция к увеличению точности средств геонавигации. Таким образом, в связи со всем вышеперечисленным, можно предложить метод непрерывного мониторинга, анализа и учета вариаций поля Земли как для уточнения базовой калибровки измерительной аппаратуры, так и для правки измеренных значений азимута.

Постановка задачи

Известно [2], что локальные значения модуля геомагнитного поля

$$F_i = \sqrt{fx_i^2 + fy_i^2 + fz_i^2} \quad (1)$$

и его наклонения

$$\Psi_i = \arcsin \{(z_i f z_i - x_i f x_i - y_i f y_i) / (G_i \cdot F_i)\} \quad (2)$$

(x_i, y_i и z_i – нормированные проекции гравитационного поля; $f x_i, f y_i$ и $f z_i$ – нормированные проекции магнитного поля; $G_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ – модуль гравитационного поля; i – номер измерения) могут сильно отличаться от модельных (например, BGGE [6]) данных. В связи с этим актуальной задачей является получение более точных, чем в модели, текущих значений модуля и наклонения магнитного поля, которые необходимы, например, при контроле качества инклинометрических измерений [2], а также при минимизации влияния остаточной намагниченности колонны [6]. Кроме того, необходим мониторинг модуля и угла наклонения магнитного поля для оценки геомагнитной обстановки во время калибровки и поверки инклинометрического датчика.

Колебания азимута прибора относительно направления вектора магнитного поля составляют:

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \{(f x_i \sin \varphi_i + f y_i \cos \varphi_i) / (f x_i \cos \theta_i \cos \varphi_i - f y_i \cos \theta_i \sin \varphi_i - f z_i \sin \theta_i)\}. \quad (3)$$

Их сбор, усреднение и предсказание необходимы для учета при обработке данных инклинометрии (правка расчетных значений азимута), а также при выборе наиболее оптимального времени калибровки и бурения/каротажа. В формуле (3) $\varphi_i = \operatorname{arctg}(x_i/y_i)$ – визирный, а $\theta_i = \operatorname{arctg}(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} / z_i)$ – зенитный углы инклинометра.

Скорость опроса стационарного инклинометра, с помощью которого проводится мониторинг геомагнитного поля, в идеале должна быть равной скорости опроса скважинного инклинометра. Помимо усреднения за время съема данных, авторы предлагают также проводить сглаживание линейным фильтром.

Для мониторинга флуктуаций модуля ($C_i^{(F)}$), склонения ($C_i^{(\alpha)}$) и наклонения ($C_i^{(\psi)}$) магнитного поля можно использовать формулы:

$$\begin{aligned} C_i^{(F)} &= q \{H(\Delta F_{\max} - |C_{i-1}^{(F)} - F_i|)F_i + \\ &+ H(|C_{i-1}^{(F)} - F_i| - \Delta F_{\max})C_{i-1}^{(F)}\} + (1-q)C_{i-1}^{(F)}, \\ C_i^{(\alpha)} &= q \{H(\Delta \alpha_{\max} - |C_{i-1}^{(\alpha)} - \alpha_i|)\alpha_i + \\ &+ H(|C_{i-1}^{(\alpha)} - \alpha_i| - \Delta \alpha_{\max})C_{i-1}^{(\alpha)}\} + (1-q)C_{i-1}^{(\alpha)}, \\ C_i^{(\psi)} &= q \{H(\Delta \psi_{\max} - |C_{i-1}^{(\psi)} - \psi_i|)\psi_i + \\ &+ H(|C_{i-1}^{(\psi)} - \psi_i| - \Delta \psi_{\max})C_{i-1}^{(\psi)}\} + (1-q)C_{i-1}^{(\psi)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $H(\xi)$ – функция Хевисайда; $\Delta F_{\max}, \Delta \alpha_{\max}$ и $\Delta \psi_{\max}$ – максимальные допустимые отклонения от сглаженных величин; q – коэффициент фильтрации. Приведенные формулы предназначены как для отсечения ураганных (единичных) выбросов, так и для фильтрации измеряемых величин.

Очевидно, что в (4) входит сумма регулярных и нерегулярных вариаций геомагнитного поля. Для выделения регулярных частей модуля ($L_i^{(F)}$), склонения ($L_i^{(\alpha)}$) и наклонения ($L_i^{(\psi)}$) можно использовать формулы:

$$\begin{aligned} L_i^{(F)} &= q \{H(\Delta F - |P_F(t_i) - F_i|)F_i + \\ &+ H(|P_F(t_i) - F_i| - \Delta F)P_F(t_i)\} + (1-q)L_{i-1}^{(F)}, \\ L_i^{(\alpha)} &= q \{H(\Delta \alpha - |P_\alpha(t_i) - \alpha_i|)\alpha_i + \\ &+ H(|P_\alpha(t_i) - \alpha_i| - \Delta \alpha)P_\alpha(t_i)\} + (1-q)L_{i-1}^{(\alpha)}, \\ L_i^{(\psi)} &= q \{H(\Delta \psi - |P_\psi(t_i) - \psi_i|)\psi_i + \\ &+ H(|P_\psi(t_i) - \psi_i| - \Delta \psi)P_\psi(t_i)\} + (1-q)L_{i-1}^{(\psi)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta F, \Delta \alpha$ и $\Delta \psi$ – разумным образом выбранные интервалы отклонения текущих значений от средних; $P_\xi(t)$ – полиномиальные зависимости (аппроксимации) усредненных по спокойным геомагнитным дням кривых [2]. Аппроксимация проводится любым приемлемым по точности методом, например методом наименьших квадратов (МНК).

Скорректированное на вариации магнитного поля значение азимута ($\alpha_i^{(c)}$) можно вычислить по формуле

$$\alpha_i^{(c)} = \alpha_i^{(t)} + (\alpha_0 - C_i^{(\alpha)}), \quad (6)$$

где α_0 – ноль показаний азимута, который вычисляется как среднее по $P_\alpha(t)$ – показаниям во время спокойных геомагнитных дней (регулярные вариации); $C_i^{(\alpha)}$ – текущее значение вариации склонения магнитного поля (4); $\alpha_i^{(t)}$ – текущее (расчетное) значение азимута (3) инклинометрического датчика. Очевидно, что данная формула работает как для спокойных, так и для возмущенных геомагнитных дней. Стоит отметить, что отклонение расчетного азимута от α_0 равно отклонению реального текущего склонения от постоянного значения, указываемого на топографических картах, не учитывающих регулярные и нерегулярные вариации магнитного поля. Также немаловажно, что для более корректной оценки усредненных за сутки параметров геомагнитного поля на месте бурения или каротажа необходимо по геомагнитно спокойным дням вычислять средние значения модуля H_0 и наклонения ψ_0 магнитного поля.

Параллельный мониторинг магнитного поля во время базовой калибровки позволяет минимизировать влияния высокочастотных нерегулярных флюктуаций как природного [1, 8], так и техногенного характера. Если ввести сокращение для перемножения H -функций Хевисайда $h(\xi_{i-1}, \xi_i) = H(|\xi_{i-1} - C_{i-1}^{(\xi)}| - \Delta\xi_{clb})H(|\xi_i - C_i^{(\xi)}| - \Delta\xi_{clb})$ (подбор параметров ΔF_{clb} , $\Delta \psi_{clb}$ и $\Delta \alpha_{clb}$ осуществляется из условий точности набора калибровочных точек), то условие контроля качества показаний магнитометров в текущий момент калибровки можно записать в следующем виде:

$$h_c = h(F_{i-1}, F_i) h(\psi_{i-1}, \psi_i) h(\alpha_{i-1}, \alpha_i). \quad (7)$$

Очевидно, что условие (7), то есть неравенство единице, позволяет обходить существенные флюктуации геомагнитного поля, и в случае его невыполнения необходимо переснять калибровочную точку.

В случае длительного использования средства мониторинга магнитного поля Земли становится возможным анализ и учет более медленных, чем суточные (27-суточные, сезонные, 11-летние и т. п.), вариаций магнитного поля, а также вековой уход магнитного полюса.

Результаты экспериментов и обсуждения

Замеры проводились с помощью стационарного инклинометрического датчика с термокомпенсированными акселерометрическими и

магниторезистивными первичными преобразователями. Между тем стоит отметить, что не обязательно использовать полный инклинометрический блок. Достаточно одного трехосевого магнитометрического блока (феррозондового или магниторезистивного), откалиброванного и поверенного, с термокомпенсированными первичными преобразователями достаточной разрешающей способности. Такой магнитометрический блок, используемый в качестве средства мониторинга естественного поля Земли, в идеале должен быть с высокой степенью точности (как минимум в три раза выше, чем точность измерений) установлен горизонтально с осью FZ , направленной на магнитный север. Для полного инклинометрического блока, включающего трехосевой акселерометр, эти требования можно считать рекомендуемыми, но нельзя считать обязательными, так как даже в случае приблизительно требуемого положения корпуса могут быть получены все требуемые зависимости с приемлемой точностью.

На рис. 1–3 представлено сравнение параллельных измерений модуля магнитного поля используемым магнитометром и сертифицированным модульным магнитометром POS-1, имеющим абсолютную погрешность, не превышающую 2 nT [5]. Для минимизации погрешностей параллельные измерения проводились в спокойные геомагнитные дни (рис. 4).

Расхождения результатов измерений модуля геомагнитного поля магниторезистивным датчиком и POS-1 не превышают 20 nT , то есть 0,05% от амплитуды измеряемой величины. Причем хорошее согласие наблюдается как для регулярных (суточных), так и для нерегулярных техногенных вариаций, что косвенно подтверждает высокий (0,89) коэффициент корреляции. Таким образом, можно сделать вывод, что инклинометрические датчики представленного класса точности можно использовать в качестве средств мониторинга геомагнитного поля. Их точности достаточно для решения поставленных задач.

На основе проанализированных данных можно сделать вывод, что наиболее оптимальным временем для проведения калибровки в г. Твери можно считать промежуток времени с 20 часов вечера до 5 часов утра, так как именно в этом интервале наименее выражены как техногенные, так и суточные вариации магнитного поля. Дополнительный контроль сбора калибровочных точек (7) может способствовать еще большему увеличению точности калибровки и, как следствие, расчетных значений азимута (3).

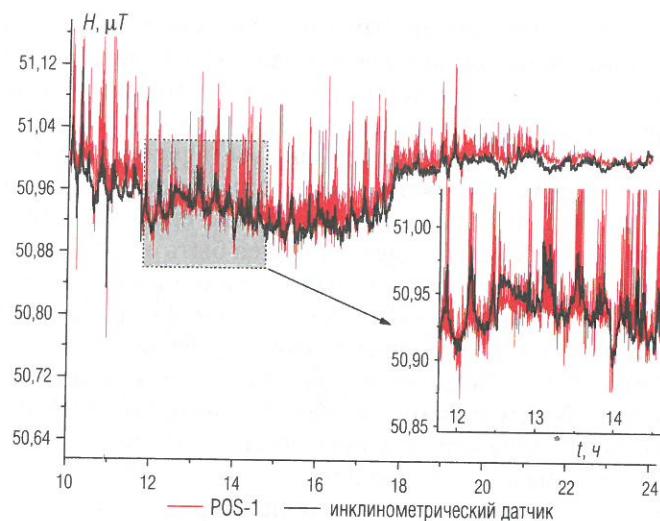


Рис. 1. Сравнение модулей магнитного поля, полученных с использованием инклинометрического датчика и POS-1. Данные получены 8 июля 2015 г.

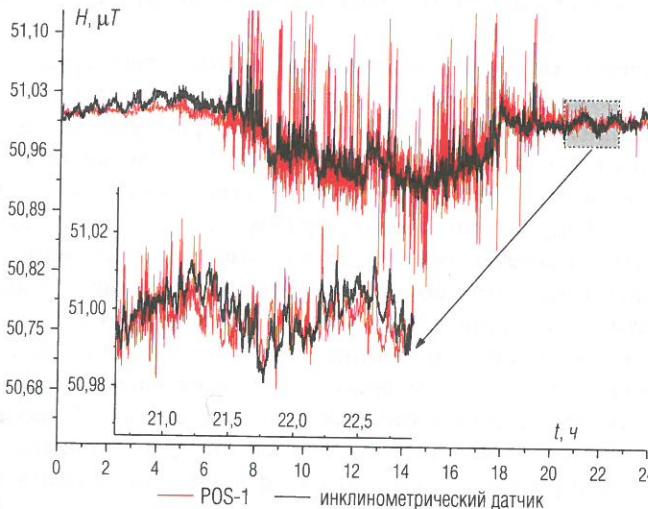


Рис. 2. Сравнение модулей магнитного поля, полученных с использованием инклинометрического датчика и POS-1. Данные получены 9 июля 2015 г.

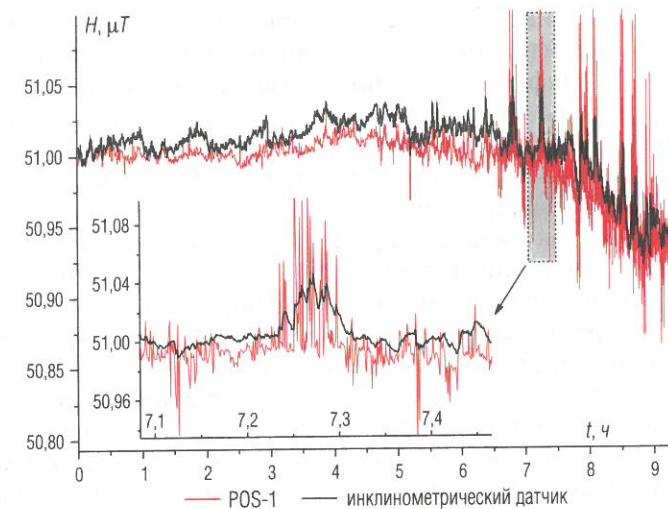


Рис. 3. Сравнение модулей магнитного поля, полученных с использованием инклинометрического датчика и POS-1. Данные получены 10 июля 2015 г.

G1 – слабая буря (уровень G1)
G2 – средняя буря (уровень G2)
G3 – сильная буря (уровень G3)
G4 – очень сильная буря (уровень G4)
G5 – экстремально сильная буря (уровень G5)

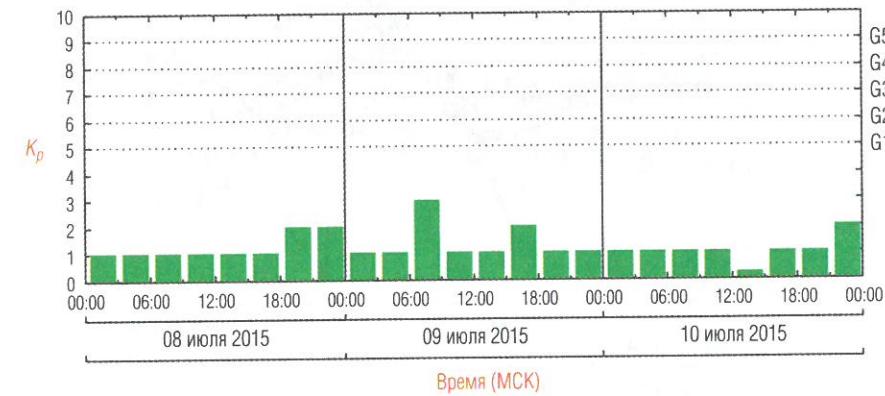


Рис. 4. Значение усредненного планетарного K_p -индекса по дням с 8 по 10 июля 2015 г. [5]

На рис. 5–7 приведены графики вариаций склонения, модуля и наклонения геомагнитного поля в районе метрологической лаборатории ООО “Нефтегазгеофизика”, располагающейся в г. Твери. Причем приведены как текущие отфильтрованные $C^{(\xi)}$ с помощью (4) для дней с различной солнечной активностью, так и аппроксимации усредненных (5) кривых $P_\xi(t)$, демонстрирующие регулярные составляющие рассматриваемых помех.

Рассмотрим для начала регулярную часть суточных вариаций геомагнитного поля, представленную на рис. 5–7. Аппроксимационные кривые наборов данных $L^{(\xi)}$ по формуле (5), помимо демонстрации регулярной части суточных вариаций, позволяют, как уже говорилось выше, рассчитать средние значения соответствующих наблюдаемых величин. Средние суточные значения можно найти как среднее значение аппроксимационных кривых $P_\xi(t)$. Зеленые кривые соответствуют спокойным геомагнитным дням (рис. 8, б) и хорошо коррелируют с аппроксимациями усредненных кривых $L^{(\xi)}$ формулы (5), попадая в допустимый интервал для усреднения практически во всем измеряемом интервале. Среднесуточные значения нужны, в частности, при использовании формулы (6) для поправки расчетных значений азимута.

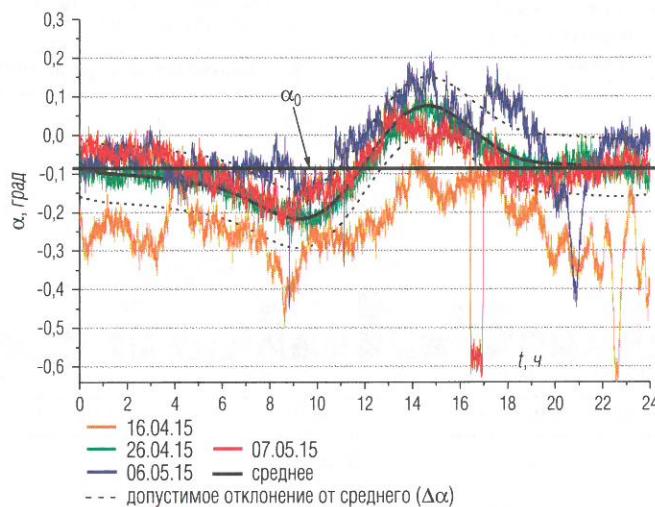


Рис. 5. Зависимость расчетных значений азимута от времени

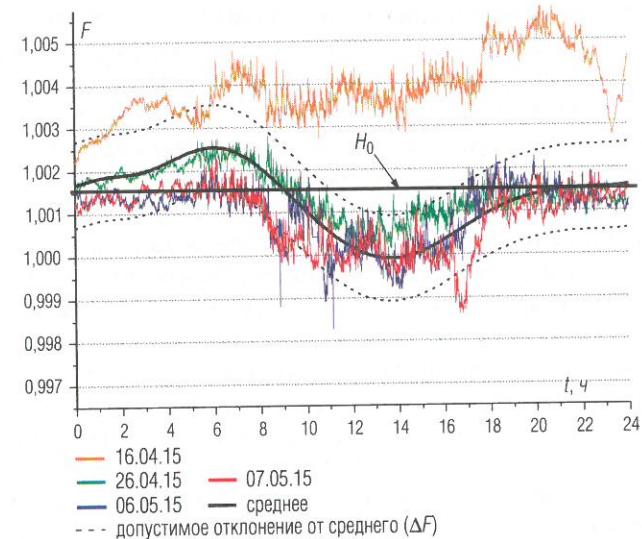


Рис. 6. Зависимость расчетных значений модуля магнитного поля от времени

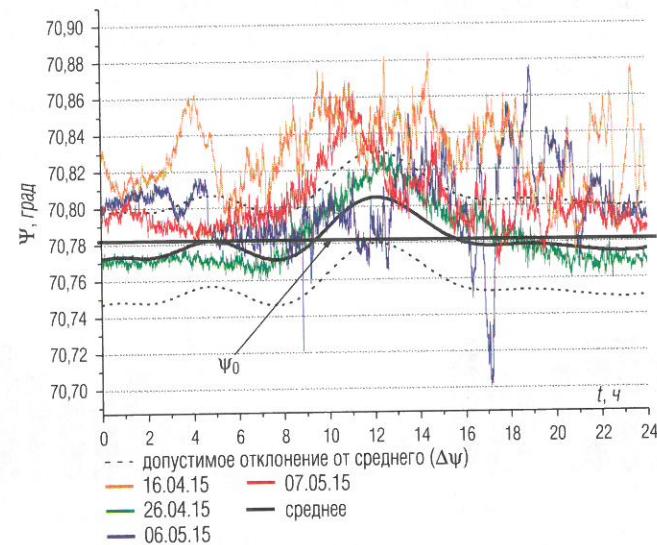


Рис. 7. Зависимость значений угла наклонения магнитного поля от времени

Известно, что для средних широт размах регулярных (суточных) колебаний склонения достигает $15'$ ($0,25$ град) [4], а с увеличением широты амплитуда колебаний возрастает. Например, для Твери ($56,86049$ град с. ш.) размах значений составляет $17,52'$ ($0,292$ град) (рис. 5, пунктирная линия). Очевидно, что, например, для зоны западносибирских месторождений размах значений суточных колебаний будет еще больше ($>0,3$ град). Это, в свою очередь, при наихудшем раскладе в плане выбора времени проведения калибровки и поверки может привести к дополнительной погрешности определения геодезического азимута, превышающей $0,3$ град, то есть больше 20% от АДПА. Усредненные (по спокойным геомагнитным дням) кривые модуля и наклонения магнитного поля представлены на рис. 6 и 7 соответственно. Амплитуда усредненной кривой изменения модуля составляет приблизительно $0,0026$ ед., а усредненной кривой угла наклонения составляет около $0,035$ град.

Что касается нерегулярных вариаций геомагнитного поля, связанных, в первую очередь, с активностью Солнца, то они вносят более значительный вклад в погрешность определения текущих склонения, модуля и наклонения поля. На рис. 5–7 приведены по две кривые (синяя и оранжевая), которые соответствуют дням с повышенной солнечной активностью (рис. 8, а, в). Причем кривая за 16 апреля, соответствующая более сильной магнитной буре (рис. 8, а), совершенно не коррелирует с регулярной частью. Дополнительная ошибка

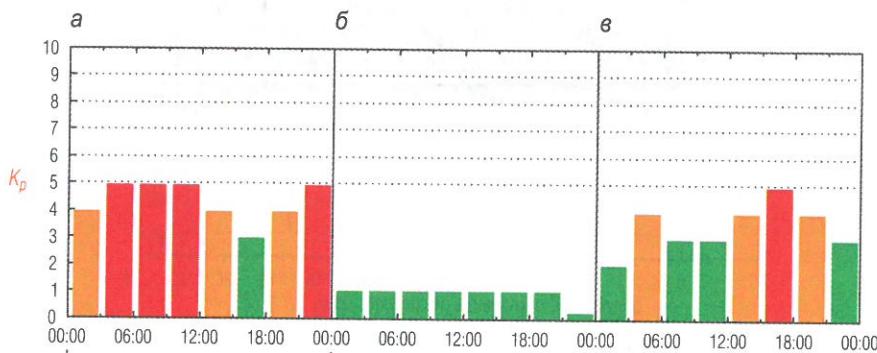


Рис. 8. Значение усредненного планетарного K_p -индекса по дням: а – 16 апреля; б – 26 апреля; в – 6 мая 2015 г. [3]

азимута в подобных случаях (оранжевая кривая на рис. 5) превышает $0,5$ град, то есть больше 30% от АДПА. Причем показаны только случаи возмущенной магнитосферы и слабых магнитных бурь. В случае сильных магнитных бурь отклонения от среднего могут быть куда существенней. Также стоит отметить, что в силу непостоянства модуля и углов склонения и наклонения, именно кривые $C^{(\xi)}$ (4) должны использоваться вместо постоянных значений при контроле качества инклинометрических измерений [2].

Интересен также участок (временной интервал 16.30–17.00 на кривой за 14.04.15, рис. 5–7), который демонстрирует грубое техногенное влияние (к метрологической лаборатории подъехал легковой автомобиль). Несложно заметить, что это влияние в той или иной степени наблюдается на всех измеряемых характеристиках геомагнитного поля.

Заключение

Предложенный подход непрерывного мониторинга и обработки данных геомагнитной обстановки позволяет комплексно увеличить точность измерений азимута. Можно выделить три основных направления применения метода:

- На уровне калибровки эти меры позволяют выделить наиболее оптимальное для калибровки время. Кроме того, параллельный контроль геомагнитной обстановки во время калибровки позволяет отсечь (7) области возбужденного (в силу естественных или техногенных причин) геомагнитного поля и несколько увеличить точность получаемой базовой калибровки. Данные меры могут повысить точность измерения азимута на 5–30% от АДПА в зависимости от геомагнитной обстановки во время проведения калибровочных работ.
- На уровне контроля качества инклинометрических измерений предложенный метод позволяет получить более точные, чем в моделях, средние и текущие значения модуля и наклонения магнитного поля. Усреднение текущих (не константных) значений модуля и угла наклонения магнитного поля могут значительно повысить достоверность контроля качества инклинометрических измерений.

3. На уровне уточнения склонения магнитного поля – сбор и усреднение текущих значений магнитного поля с целью учета при обработке данных инклинометрии (правка расчетных значений азимута по формуле (6)). Очевидно, что необходимо введение времени замера при бурении или каротаже для согласования расчетных величин базовых углов и данных наблюдений. Синхронизация часов должна быть с точностью не менее 30 секунд. Данная процедура способна существенно повысить точность измерения магнитного азимута в зависимости от геомагнитной обстановки во время проведения бурения или каротажа.

Кроме того, в случае отсутствия лабораторных данных (например [5]) непрерывный сбор значений модуля, углов склонения и наклонения магнитного поля и сравнение с соответственными усредненными кривыми позволяет определить существенные и длительные искажения магнитного поля как природного (магнитные бури), так и техногенного характера (нагрузка на ЛЭП, большие магнитные массы и т. п.), которые могут повлиять на качество базовой калибровки и расчетные значения во время бурения или каротажа.

В случае длительного использования средства мониторинга магнитного поля Земли становится возможным анализ и учет более медленных, чем суточные, вариаций магнитного поля, а также вековой уход магнитного полюса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 2. М.: Мир, 1975. 512 с.
2. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н. Контроль качества инклинометрических измерений. Учет суточных вариаций магнитного поля // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2015. Вып. 12 (258). С. 99–108.
3. Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца Физического института Российской академии наук. Магнитные бури онлайн // http://www.thesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html
4. Николаев А. С. Военная топография. М.: Воениздат, 1977. 280 с.
5. Процессорный оверхаузеровский датчик POS-1 (ПОС-1). Руководство по эксплуатации. Екатеринбург: УГТУ, Лаборатория квантовой магнитометрии, 2005. 41 с.
6. Рыжков И. В., Пономарева Е. А. Моделирование вычисления азимута наклонной скважины в условиях воздействия магнитных помех // Международный научный журнал. 2014. Т. 11. С. 34–39.

7. Серкеров С. Гравиразведка и магниторазведка. Основные понятия, термины и определения: Учебное пособие для вузов. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2006. 479 с.
8. Троицкая В. А., Гудельми А. В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физических наук. 1969. Т. 69. № 3. С. 453–494.
9. Центр прогнозов космической погоды “ИЗМИРАН”: Вариации магнитного поля Земли // <http://forecast.izmiran.ru>
10. British Geological Survey. Natural Environment Research Council: World Magnetic Model 2015 Calculator // http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html

Рукопись рассмотрена на научно-техническом совете
ООО “Нефтегазгеофизика” и рекомендована к публикации

УДК 658:005.05

Г. Б. Бурдо
ООО “Нефтегазгеофизика”
А. Ю. Сорокин
Тверской ГТУ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПРИ СОЗДАНИИ НАУКОЕМКИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Российский и мировой рынки диктуют спрос на наукоемкую высокотехнологичную продукцию различных областей машиностроения, к которым относится и геофизическое приборостроение. Учитывая высокий уровень конкуренции, важнейшее значение приобретает задача сокращения сроков проектирования и изготовления опытных образцов наукоемкой геофизической продукции (НГП) при обеспечении их надлежащего качества. Поэтому создание автоматизированной системы управления качеством изделий на этапах технической подготовки производства, изготовления и испытания наукоемкой продукции (АСУ ТППИ) является актуальной задачей. Выявлены и сформулированы новые принципы построения АСУ ТППИ и разработана ее теоретико-множественная модель.

Ключевые слова: управление качеством, наукоемкая геофизическая продукция, автоматизированная система, техническая подготовка производства, жизненный цикл изделия.