

УДК 531.746

И. В. Гринев, А. Б. Королев, В. Н. Ситников
ООО "Нефтегазгеофизика"

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. УЧЕТ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрено влияние несовершенства магнитной модели геоида и суточных вариаций магнитного поля Земли на качество инклинометрических измерений. Показано, что суточные вариации существенно влияют на расчетные значения параметров (модуля, склонения и наклонения) магнитного поля. Предложен метод параллельного мониторинга этих параметров для адекватного контроля качества инклинометрических измерений, а также для введения поправок при расчете магнитного азимута.

Ключевые слова: скважина, инклинометр, контроль качества, суточные вариации магнитного поля.

Обычно для оценки качества инклинометрических измерений используют величины отклонений расчетных значений модуля гравитационного поля, модуля и угла наклонения магнитного поля от соответствующих им априорных величин, полученных из таблиц "Геомагнитная модель земного шара" (BGGM) Британской геологической службы (British Geological Survey) [5] согласно координатам скважины. Более того, эти априорные величины считаются постоянными во времени. Однако условное постоянство во времени справедливо только для модуля вектора гравитационного поля. Все величины, связанные с магнитным полем, демонстрируют существенные временные флюктуации. Кроме того, модели магнитных геоидов также не лишены погрешностей: они не учитывают магнитных особенностей природного и техногенного характера той местности, на которой проводятся калибровка, бурение или каротаж скважин.

В связи с этим авторы провели сравнение расчетных значений параметров магнитного поля в метрологической лаборатории ООО "Нефтегазгеофизика" со значениями, взятыми из таблиц BGGM для тех же координат. Также, в связи с существенной нестабильностью магнитного поля Земли, был проведен систематический анализ суточных вариаций магнитного поля и были предложены методы по их учету при калибровке, бурении или каротаже.

Общие критерии оценки качества инклинометрических измерений

В процессе эксплуатации инклинометрические датчики испытывают воздействие ряда внешних факторов: вращение датчика вместе с буровой колонной или связкой, вибрации и ускорения в визирной плоскости и по оси прибора, искажение магнитного поля Земли колонной или связкой геофизических приборов [1, 2]. Очевидно, что все эти факторы влияют на расчетные значения базовых углов. Более того, в некоторых случаях суммарная ошибка, связанная с внешними факторами во время эксплуатации инклинометра, становится сопоставимой с допустимой погрешностью измерения или даже превышает ее. Исходя из этого, необходимо иметь некоторые критерии, которые позволили бы контролировать качество получаемых расчетных значений. Наиболее простым и надежным подходом в данном случае является контроль тех величин, которые должны оставаться практически постоянными во время замеров. Таковыми являются:

- модуль гравитационного поля G :

$$G_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}, \quad (1)$$

где x_i , y_i и z_i – нормированные проекции гравитационного поля, i – номер измерения;

- модуль магнитного поля F :

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

где fx_i , fy_i и fz_i – нормированные проекции магнитного поля;

- угол наклонения магнитного поля Ψ :

$$\Psi_i = \arcsin \{(z_i fz_i - x_i fx_i - y_i fy_i) / (G_i \cdot F_i)\}. \quad (3)$$

Данный набор критериев достоверности интересен тем, что позволяет всесторонне оценить получаемые данные, причем как в режиме реального времени, так и при обработке первичных данных в последующем. F и Ψ чувствительны к искажениям естественного магнитного поля Земли. Поэтому, благодаря их сравнению со средней величиной, несложно отсечь влияние муфт, магнитных аномалий, а также буровой колонны или связки каротажных приборов. Модуль гравитационного поля, в свою очередь, чувствителен к вращениям,

ускорениям, а также вибрациям как в визирной плоскости, так и по оси прибора.

Учет стабильности G позволяет провести контроль качества кривых зенита (θ) и визира (ϕ):

$$\theta_c = H(0,003 - |G - \bar{G}|)(\theta - \varepsilon) + \varepsilon; \quad (4)$$

$$\varphi_c = H(0,003 - |G - \bar{G}|)(\varphi - \varepsilon) + \varepsilon, \quad (5)$$

где $H(0,003 - |G - \bar{G}|)$ – функция Хэвисайда; ε – код отсутствия данных в используемом графическом редакторе; \bar{G} – среднее расчетное значение гравитационного вектора (обычно очень близко к единице и практически не подвержено суточным вариациям, даже приливными силами Луны и Солнца в рамках данной задачи можно пренебречь); θ_c и φ_c – прошедшие контроль качества значения кривых θ и φ соответственно. Очевидно, что абсолютная величина предельного отклонения $|G - \bar{G}|$ может быть выбрана в зависимости от условий конкретной задачи. В рассматриваемом случае выбрано допустимое отклонение модуля вектора G от среднего на 0,003 ед.

Суммарный учет стабильности приведенных величин позволяет проводить качественный контроль расчетных значений азимута:

$$\alpha_c = H(0,003 - |G - \bar{G}|)H(0,0059 - |F - \bar{F}|)H(0,3 - |\Psi - \bar{\Psi}|) \times \times (\alpha - \varepsilon) + \varepsilon, \quad (6)$$

где \bar{F} – среднее расчетное значение модуля вектора магнитного поля; $\bar{\Psi}$ – среднее или табличное значение угла магнитного наклонения; α_c – значения кривой азимута (α), которые прошли контроль качества. Здесь, как и в случае контроля качества замеров зенита и визира, абсолютные величины разности расчетного и среднего значений могут быть выбраны исходя из условий задачи. В рассматриваемом случае (скважинный инклинометр) целесообразно выбрать отклонение безразмерного модуля вектора F от среднего на 0,0059 ед., которое соответствует, при пересчете в физические величины, отклонению приблизительно на 300 nT (для Твери). Для Ψ предельно допустимым отклонением от среднего было выбрано 0,3 град.

Однако давно замечено, что априорные данные \bar{F} и $\bar{\Psi}$ зачастую не совпадают с расчетными значениями для местности, полученными в результате прямого эксперимента. Более того, эти расчетные значения не являются постоянными во времени величинами.

Отличие модельных и измеряемых в эксперименте значений магнитного поля Земли

Зачастую в качестве средних значений наклонения и модуля магнитного поля предлагается использование модельных данных BGGM или другой магнитной модели геоида. Однако реально измеряемые в эксперименте средние значения перечисленных величин значительно отличаются от тех, которые получены с помощью магнитного геоида BGGM. Так, для точки, соответствующей по координатам метрологической лаборатории ООО “Нефтегазгеофизика” (рис. 1), модель дает значения 71,960 град угла наклонения и 52 408 nT для модуля

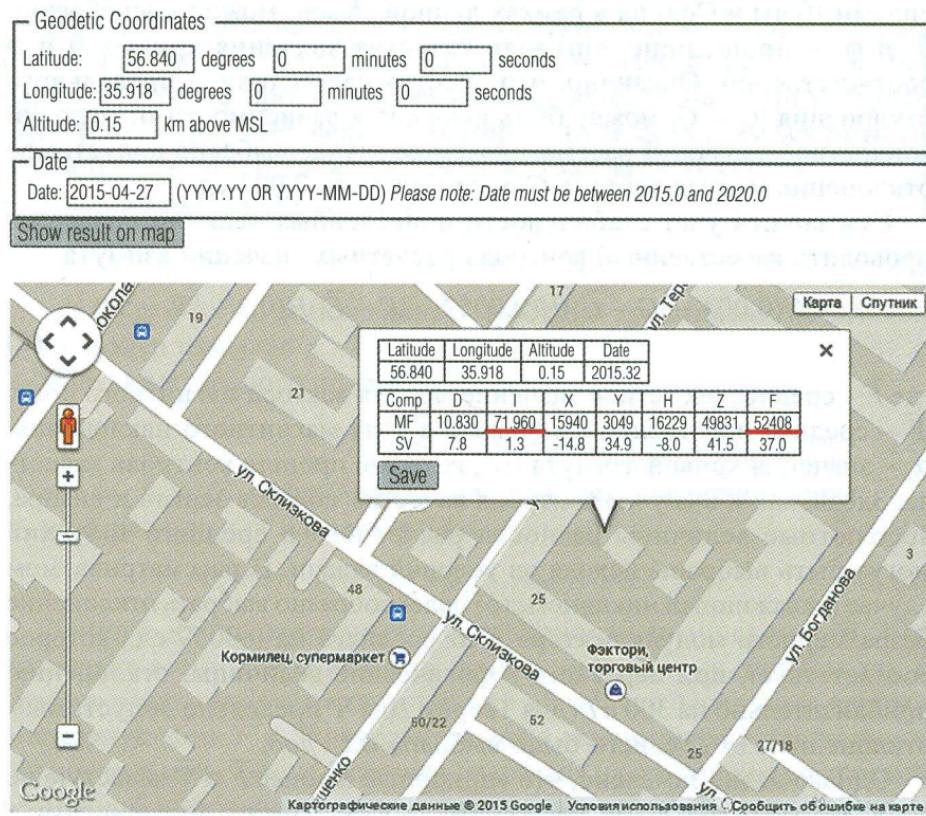


Рис. 1. Значения угла наклонения и модуля магнитного поля в месте измерений по данным из работы [5]

поля. В действительности измеряемое среднее значение наклонения равно $70,790$ град, а модуля поля – $50\ 900$ нТ. Очевидно, что такая разность между модельными и реально измеряемыми значениями не может быть объяснена лишь техногенными факторами, так как лаборатория построена на месте, отвечающем всем основным метрологическим требованиям.

Учитывая вышесказанное, нельзя согласиться с использованием значений BGGM в качестве опорных при контроле качества замеров инклинометрии. Более разумным в данном случае будет использование средних измеренных значений угла наклонения и модуля магнитного поля в непосредственной близости от местности, на которой проводятся замеры.

Суточные вариации магнитного поля Земли

Помимо отличия модельных и реально измеряемых данных, предлагается обратить внимание на такое немаловажное физическое явление, как суточные вариации магнитного поля Земли. Как известно, суточные вариации – это периодические вариации магнитного поля, вызванные влиянием Солнца и связанные с вращением Земли вокруг своей оси [3]. В первом приближении суточные вариации складываются из регулярной части, соответствующей спокойным в геомагнитном отношении дням, и части, соответствующей возмущенному полю (неоднородности солнечного ветра). Очевидно, что суточные вариации влияют как на направление (углы склонения и наклонения), так и на величину модуля магнитного поля. На рис. 2 приведены временные зависимости расчетных значений азимута инклинометра по дням в период с 22 по 26 апреля 2015 г. Все данные сглажены линейным весовым фильтром со значением коэффициента смещения 0,1. Замеры проводились с помощью стационарно установленного инклинометрического датчика с термокомпенсированными акселерометрическими и магниторезистивными первичными преобразователями.

Несложно заметить, что суточные вариации значительно влияют на положение магнитного севера. Размах кривой составляет приблизительно 0,3 град. Следовательно, в наихудшем случае, при проведении калибровки и замера в точках максимума и минимума кривой, дополнительная ошибка измерения азимута для широты

Твери будет равна приблизительно 0,3 град. Стоит отметить, что амплитуда суточных колебаний склонения увеличивается при движении к магнитному экватору.

Кроме того, кривые хорошо коррелируют друг с другом, что позволяет значительно увеличить точность показаний инклинометров при условии знания усредненной зависимости или при параллельных замерах в метрологической лаборатории поблизости от места проведения бурения или каротажа.

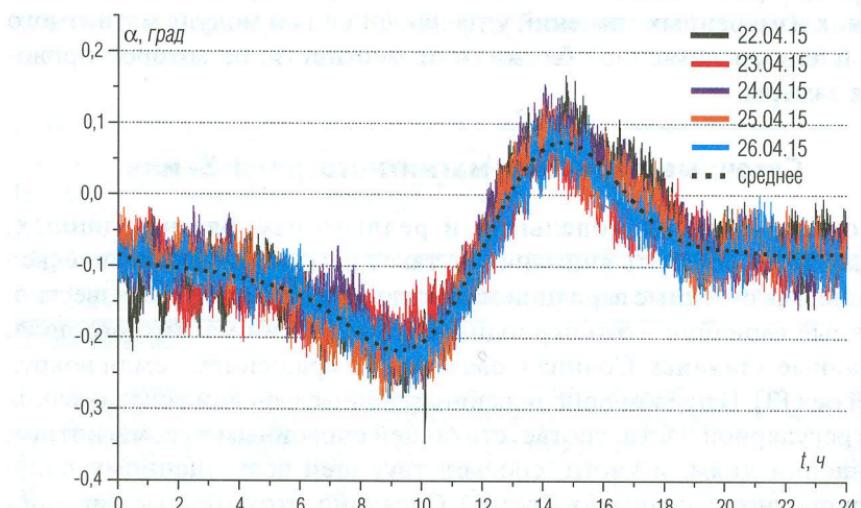


Рис. 2. Зависимость расчетных значений азимута от времени

С точки зрения контроля качества, больший интерес представляют суточные вариации модуля (рис. 3) и наклонения (рис. 4) магнитного поля Земли.

Вариации модуля магнитного поля хуже коррелируют друг с другом, что связано, в первую очередь, с его большей чувствительностью к колебаниям солнечного ветра. В качестве критерия стабильности солнечного ветра может выступать значение усредненного планетарного K_p -индекса (рис. 5) [3, 4].

Несложно заметить, что именно в периоды наибольшего изменения активности Солнца (17–24 ч 23.04; 0–9 ч 24.04 2015 г.), наблюдается наибольшее отклонение расчетного F от усредненной кривой.

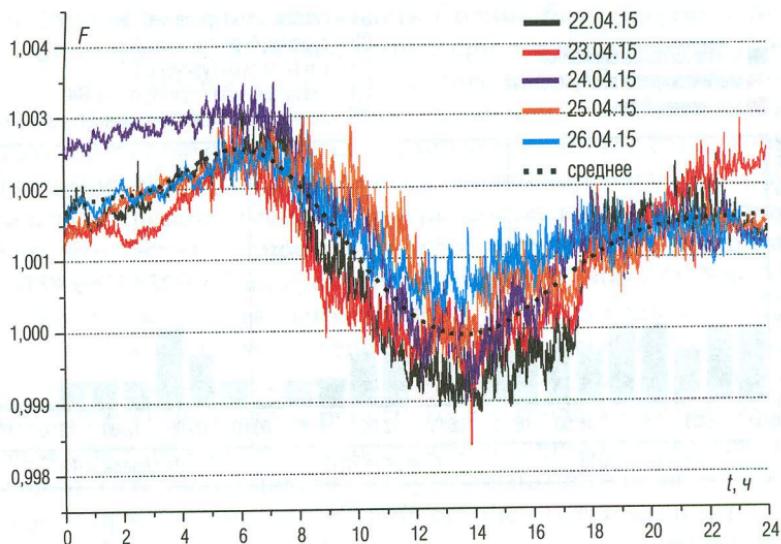


Рис. 3. Зависимость расчетных значений модуля магнитного поля от времени

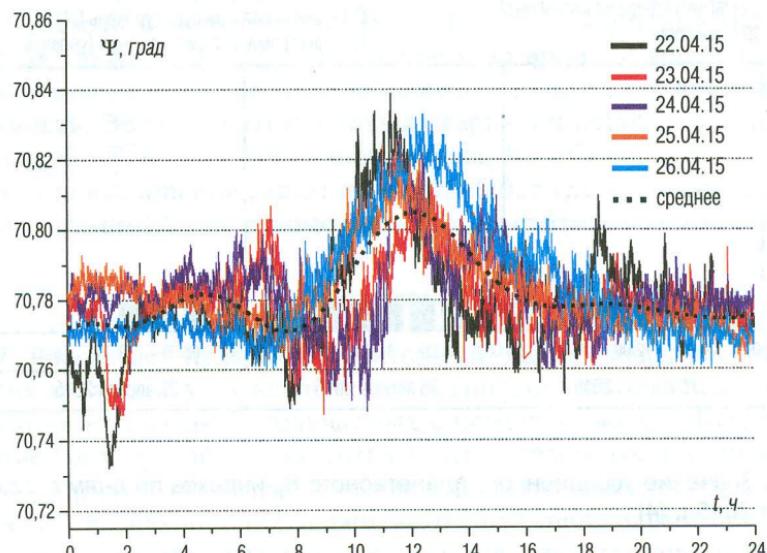


Рис. 4. Зависимость расчетных значений угла наклонения магнитного поля от времени

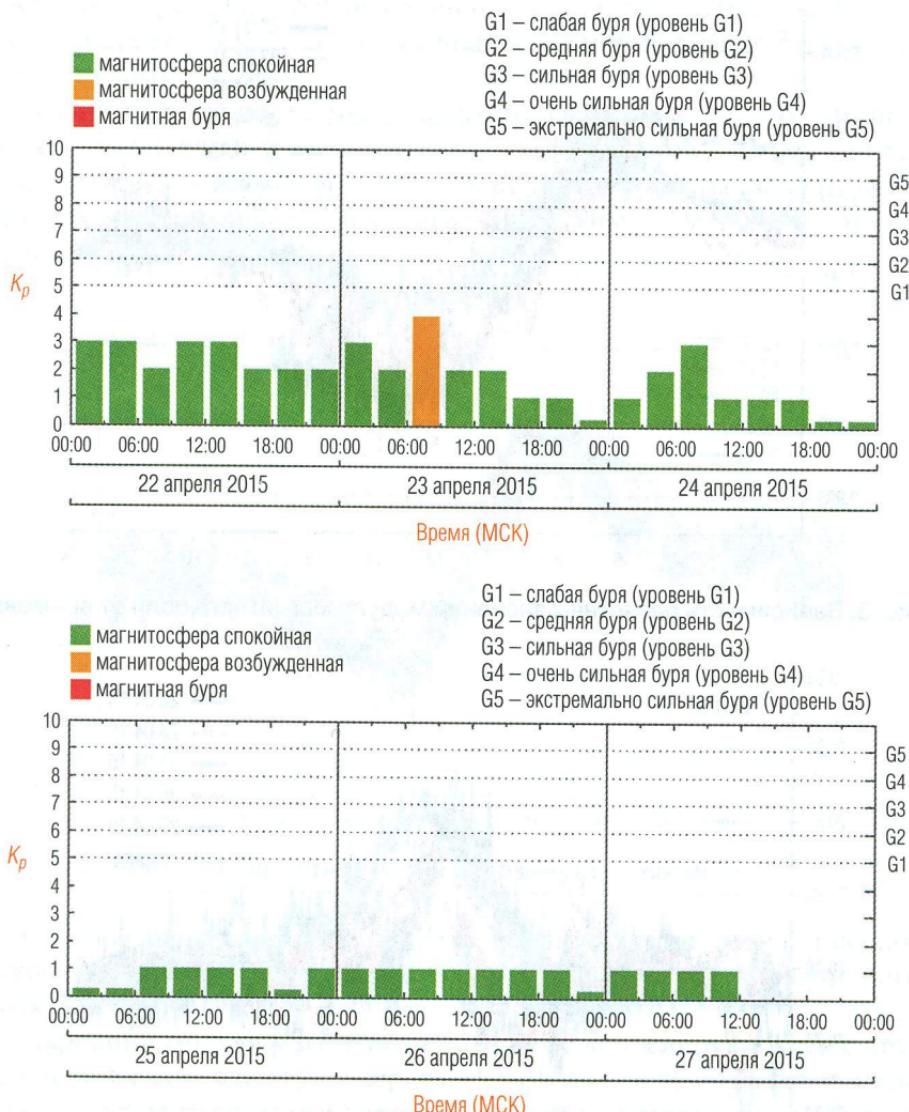


Рис. 5. Значение усредненного планетарного K_p -индекса по дням с 22 по 26 апреля 2015 г. [4]

25 и 26 апреля 2015 г. активность Солнца была фактически минимальной и, как следствие, расчетные кривые модуля очень близки к кривой, отражающей усредненное поведение. В идеале именно кривые, соответствующие спокойной солнечной активности, должны выступать в качестве определяющих вид усредненных функциональных зависимостей модуля, склонения и наклонения магнитного поля.

Амплитуда кривой изменения модуля составляет приблизительно 0,0026 ед., что составляет практически 50% от рекомендуемого значения 0,0059 ед. ($\pm 300 \text{ nT}$ в пересчете на модуль $50\,900 \text{ nT}$). Учитывая приведенные доводы, становится очевидным, что нельзя использовать постоянную во времени величину модуля магнитного поля для сравнения с текущим расчетным значением F во время замеров. Из этого следует, что для корректного контроля качества замеров инклинометрии необходимо располагать информацией о временной зависимости суточных вариаций модуля магнитного поля, который и необходимо брать в качестве эталона сравнения с текущим F .

Помимо сравнения модуля F с эталонным значением, предлагается проводить сравнение расчетного угла наклонения Ψ со значением, соответствующим географической области проведения замеров.

Измеряемый в эксперименте (рис. 4) угол наклонения магнитного поля также не является постоянной во времени величиной и, следовательно, в качестве эталона необходимо брать его временную зависимость. Величина этих суточных вариаций несколько меньше, чем в случае F , но все равно значительна. Колебания усредненной кривой угла наклонения равны примерно $0,035 \text{ град}$, что составляет приблизительно 12% от рекомендуемого доверительного интервала.

Выводы

Как показывает прямой лабораторный эксперимент, расчетные значения модуля и угла наклонения магнитного поля существенно отличаются от значений, получаемых с помощью модели BGGM.

Кроме того, при оценке качества замеров телеметрии и инклинометрии (формулы (4)–(6)) в качестве эталонных значений среднего модуля и угла наклонения магнитного поля необходимо брать не постоянные величины, а функциональные зависимости, учитывающие суточные вариации магнитного поля Земли, причем наиболее сильно суточные вариации выражены у модуля и склонения магнитного поля.

Помимо этого, знание временной зависимости суточных вариаций необходимо использовать при корректировке расчетных значений азимута телеметрии и инклинометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин С. А. Компенсация девиации азимутального канала инклинометра // Экспозиция Нефть Газ. 2012. № 1. С. 64–66.
2. Ковшов Г. В., Коловертнов Г. Ю. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. 228 с.
3. Космическая среда вокруг нас / Под ред. А. Н. Зайцева. Троицк: Тровант, 2005. 231 с.
4. Сайт лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института Российской Академии наук: Магнитные бури онлайн // http://www.thesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html
5. 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

Рецензент доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов