

УДК 531.746; 550.832

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

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В СУБВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Предложен метод дополнительной калибровки, позволяющий значительно повысить точность расчетных значений визирного угла и азимута в субвертикальных скважинах. Показано, что в случае малых зенитных углов возрастают требования к усреднению и фильтрации первичных данных. Рассмотрены границы применимости предложенного метода в зависимости от величины шумов первичных преобразователей и выбранного метода усреднения первичных данных.

Ключевые слова: инклинометр, вертикальные скважины, шумы первичных преобразователей угла наклона, повышение точности расчета азимута.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к уменьшению размеров “мишеней” при бурении. В связи с этим совершенствуются как элементная база (акселерометрические, магнитометрические и гироскопические датчики), так и методы базовой калибровки. Однако все известные базовые калибровки не лишены проблемы возрастания погрешности определения азимута в области малых зенитных углов. В то же время буровая колонна, в случае вертикальных скважин, находится в данном секторе зенитных углов на значительном протяжении проходки скважины.

Расчетные значения азимута чувствительны к ошибкам расчета визирного и зенитного углов прибора. Вместе с этим в случае суб-вертикальных скважин два акселерометрических датчика находятся в зоне малых проекций. В этой зоне соотношение “сигнал/шум” уменьшается по мере приближения к вертикальному положению, поэтому, начиная с некоторого значения зенитного угла, погрешность вычисления визирного угла существенно возрастает. В то же время погрешность расчета зенитного угла практически не меняется. Ошибка в расчете визирного угла, в свою очередь, оказывает наибольшее влияние на увеличение ошибки расчета азимута.

Таким образом, повышение точности вычисления азимута в суб-вертикальных скважинах в первую очередь связано с повышением точности расчета визирного угла. Этого можно добиться как с аппаратной стороны (путем уменьшения шумов, повышения разрядности акселерометрических датчиков и увеличением соотношения “сигнал/шум”), так и путем специальной калибровки, речь о которой пойдет ниже. Кроме того, область низких значений “сигнал/шум” предъявляет более высокие требования к усреднению сигналов. Этому вопросу также посвящена часть настоящей работы.

Как следствие, повышение точности инклинометрических измерений путем несложной дополнительной калибровки в области малых зенитных углов становится актуальной задачей. Кроме того, как показывают наши расчеты, такая калибровка позволяет существенно сократить “мертвую зону”, в которой определение положения корпуса прибора относительно направления магнитного севера не представляется возможным.

Постановка задачи

По мере приближения инклинометра к вертикальному положению, начиная с некоторого значения зенитного угла (обычно около 6–7 град) существенно возрастает погрешность определения положения относительно магнитного севера. В первую очередь это связано с тем, что две проекции акселерометров начинают приближаться к нулю. В этом случае начинает возрастать влияние остаточной погрешности базовой калибровки акселерометров на расчетные значения визирного угла. Вместе с тем уменьшается соотношение “сигнал/шум” и, как следствие, также возрастает влияние шума первичных

преобразователей на расчетные значения визирного угла. Напомним, что визирный (φ) и зенитный (θ) углы инклинометрического датчика вычисляются по формулам [1]:

$$\varphi = \arctg (x / y), \quad (1)$$

$$\theta = \arctg \left(\sqrt{x^2 + y^2} / z \right), \quad (2)$$

где x , y и z – нормированные проекции гравитационного поля. Несложно понять, что влияние шума на расчетные значения θ выражены в гораздо меньшей степени вследствие того, что при расчете этого угла (2) используются показания датчика (z), который при малых θ измеряет близкую к максимальной проекцию вектора гравитационного поля. Стоит также отметить, что проекции вектора геомагнитного поля на оси магнитометрических датчиков тоже значительны в исследуемой области.

Как показывает коэффициент корреляции между погрешностями азимута (α) и φ (приблизительно 0,95) в области малых θ , погрешность определения φ вносит наибольший вклад в погрешность расчетного α [5]:

$$\alpha = \arctg \{fx \sin \varphi + fy \cos \varphi\} / \{fx \cos \theta \cos \varphi - fy \cos \theta \sin \varphi - fz \sin \theta\}, \quad (3)$$

где fx , fy и fz – нормированные проекции геомагнитного поля.

Влияние остаточной погрешности калибровки является регулярным и может быть измерено в результате эксперимента с точностью до уровня шума. Причем наблюдаются не только высокочастотные шумы, которые достаточно хорошо поддаются фильтрации усреднением по достаточно большому (больше 50) числу точек, но и более низкочастотные шумы, усреднение которых не представляется возможным при разумном времени сбора данных. Более того, в процессе бурения или каротажа время, доступное для сбора данных, еще более ограничено, чем во время калибровки.

В связи с этим первое, что необходимо сделать, – это определиться с количеством точек для усреднения первичных данных. Так как шум x - и y -акселерометров по мере уменьшения θ все больше влияет на расчетные значения φ и α , целесообразным является увеличение количества усредняемых данных. Одновременно с этим

очевидно, что время усреднения не должно быть слишком большим. В рассматриваемом случае используется усреднение по 100 точкам первичных данных, что при частоте опроса приблизительно 16 мс позволяет получать один кадр данных в 1,6 секунды. Заметим, что такое количество усредняемых данных целесообразно только в области малых θ , то есть при $\theta \geq 7$ град можно получать данные значительно чаще. В процессе каротажа следует несколько увеличить количество усредняемых точек, чтобы уменьшить влияние шумов, но даже без изменения времени усреднения методика будет позволять получать более точные данные при условии фильтрации исправленных кривых ϕ и α по достаточно большому числу точек.

Стоит отдельно остановиться на исследовании характера распределения низкочастотных шумов, которые не устраняются даже сравнительно большой выборкой первичных данных. Как показывают расчеты, обычно эти шумы по распределению очень близки к гауссовскому нормальному распределению. Кроме того, как показывают эксперименты, характеристики шумов (μ – математическое ожидание и σ – среднеквадратическое отклонение (СКО)) очень близки для трех датчиков. Перекрестные коэффициенты корреляции между шумами близки к нулю, что говорит об их независимости. Все вышеперечисленное позволяет смоделировать влияние шумов на расчетные показания θ , ϕ и α .

Реальные сигналы первичных акселерометрических преобразователей можно представить в виде:

$$\begin{aligned}x &= x_{mc} + \xi_x, \\y &= y_{mc} + \xi_y, \\z &= z_{mc} + \xi_z,\end{aligned}\tag{4}$$

где x_{mc} , y_{mc} , и z_{mc} – постоянные составляющие значений проекций; ξ_x , ξ_y , и ξ_z – функции аддитивного шума, имеющие нормальное распределение с математическими ожиданиями μ_x , μ_y и μ_z , и СКО, равными σ_x , σ_y и σ_z . Очевидно, что при бесконечно большом времени усреднения влияние такого шума нивелируется и значения проекций x , y и z будут с высокой степенью точности равны x_{mc} , y_{mc} и z_{mc} соответственно.

Как уже говорилось выше, шумы первичных преобразователей, которые не устраняются при усреднении, влияют на расчетные значения ϕ (1), θ (2) и, как следствие, на α (3). Погрешность расчета ϕ можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{mc} + \xi_{\varphi}, \quad (5)$$

первое из которых постоянно и отвечает остаточной погрешности калибровки (систематическая погрешность), а второе слагаемое соответствует нерегулярному влиянию шума первичных преобразователей (случайная погрешность). Несложно понять, что $\Delta\varphi$ может быть измерено прямым экспериментом в процессе сбора калибровочных данных. Аналогично для погрешности θ

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{mc} + \xi_{\theta}, \quad (6)$$

где $\Delta\theta_{mc}$ – слагаемое, отвечающее остаточной погрешности калибровки; ξ_{θ} – слагаемое, отвечающее нерегулярному влиянию шума первичных преобразователей.

Таким образом, возвращаясь к методу правки расчетных значений φ и θ вблизи вертикали, из неаппаратурных методов корректировки можно выделить корректировку показаний φ при малых θ с дальнейшим использованием скорректированного значения при расчете α .

Для осуществления данного метода можно использовать следующий подход: собрать таблицу расчетных значений θ и φ с некоторым шагом по этим углам; на основе этой таблицы можно определить величину ухода расчетного значения φ ($\Delta\varphi$) по мере уменьшения θ от расчетных значений θ (2) и φ (1) углов. В качестве эталонных значений φ в таком случае можно выбрать расчетные значения при $\theta = 16 \text{ град}$.

Такой подход целесообразен из двух соображений:

- 1) допустимая погрешность определения φ при $\theta = 16 \text{ град}$ практически не превышает допустимую погрешность в диапазоне θ (16; 164). В этом диапазоне допустимая погрешность α обычно принимается постоянной;
- 2) отпадает необходимость в точных лимбах по φ .

Кроме того, установка инклинометра по θ также производится по расчетным показаниям и не требует лимба.

Зная экспериментальную таблицу ($\Delta\varphi_i(\theta_i, \varphi_i)$), где i определяется количеством калибровочных положений), можно внести правку в расчетные значения φ в области малых θ . Используя исправленное значение в формуле (3), получим уточненное значение α . Принципиальным вопросом, однако, является интерполяция экспериментальных данных в промежуточных значениях аргументов (расчетных θ и φ), а также вопрос точности и границ применимости предлагаемой

методики в зависимости от остаточной погрешности калибровки и характеристик шумов первичных преобразователей.

Результаты экспериментов и обсуждения

Эксперименты проводились с использованием инклинометрического датчика с двумя термокомпенсированными трехосевыми блоками (акселерометрическим и магнитометрическим). Исследование аддитивных шумов акселерометров при наборе пространственных положений показало, что шумы (после усреднения по 100 кадрам) по распределению с высокой степенью точности соответствуют нормальному гауссовскому распределению, средние математические ожидания μ_x , μ_y и μ_z очень близки к нулю, а средние СКО σ_x , σ_y и σ_z для нормированных проекций равны $1,274 \cdot 10^{-4}$, $1,223 \cdot 10^{-4}$ и $1,211 \cdot 10^{-4}$ ед. соответственно. Разброс СКО шумов не превышал $\pm 25\%$. Как уже отмечалось выше, коэффициент корреляции между аддитивными шумами акселерометров близок к нулю, что говорит об их независимости.

Стоит также отметить, что набор данных в положении для определения параметров шума необходимо осуществлять достаточно долго (не менее двух часов на точку). В противном случае возможно получение заниженных значений СКО шума первичных преобразователей. Впрочем, при меньшем времени сбора данных в точках, можно несколько увеличить значения СКО шумов, что позволит гарантировать попадание реального шума в предсказываемый моделью интервал.

Знание характеристик шумов первичных преобразователей (μ и σ) позволяет при помощи функции ошибки [3] смоделировать их влияние на величины ξ_ϕ и ξ_θ из (5) и (6) в широком диапазоне θ и ϕ . Сделать это можно следующим образом: сгенерировать при помощи метода из [3] большое число (больше 10 000) значений аддитивного шума с заданными μ и σ для каждого из трех акселерометрических датчиков; использовать полученные значения в формулах (1) и (2); рассчитать для полученных зенитного и визирного углов μ и σ . Очевидно, что предложенный метод моделирования тем точнее, чем больше выборка сгенерированных значений. Данный подход позволяет оценить часть погрешности, связанной с шумом, в любом положении датчика в пространстве, а также определить границы использования предложенного метода корректировки ϕ и α .

На рис. 1 представлена зависимость (от θ) усредненного модельного СКО шума ϕ ($\langle \sigma_\phi \rangle$), вызванного шумами первичных акселерометрических преобразователей. Стоит заметить, что при фиксированном θ наблюдалась слабая зависимость величины σ_ϕ от ϕ , что вызвано небольшой разницей между σ_x и σ_y . Очевидно, что чем меньше $|\sigma_x - \sigma_y|$, тем меньше будет выражена эта зависимость. В рассматриваемом случае приведено среднее значение $\langle \sigma_\phi \rangle$ для различных значений θ .

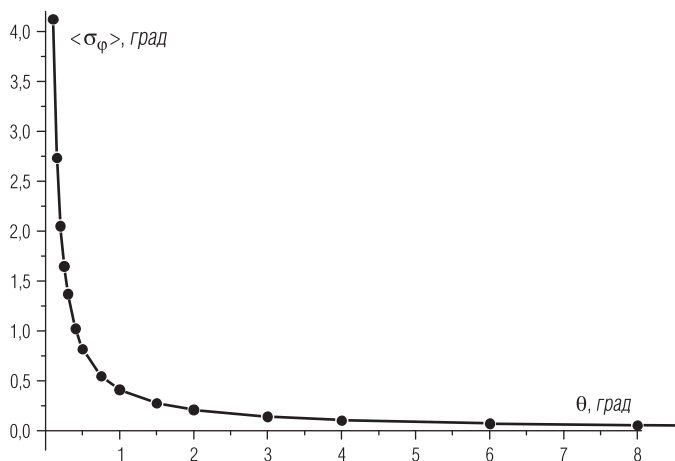
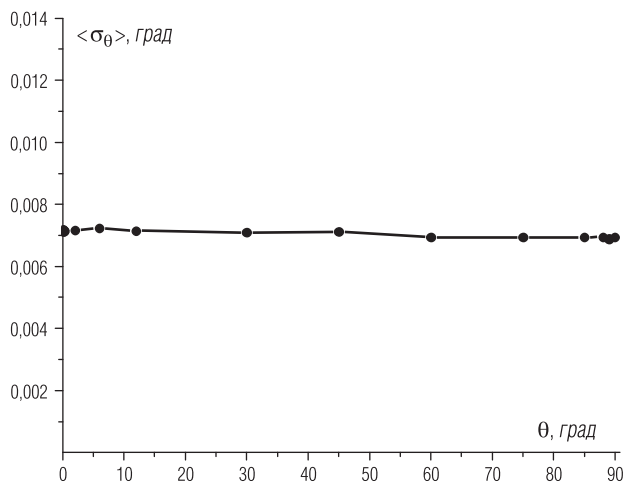
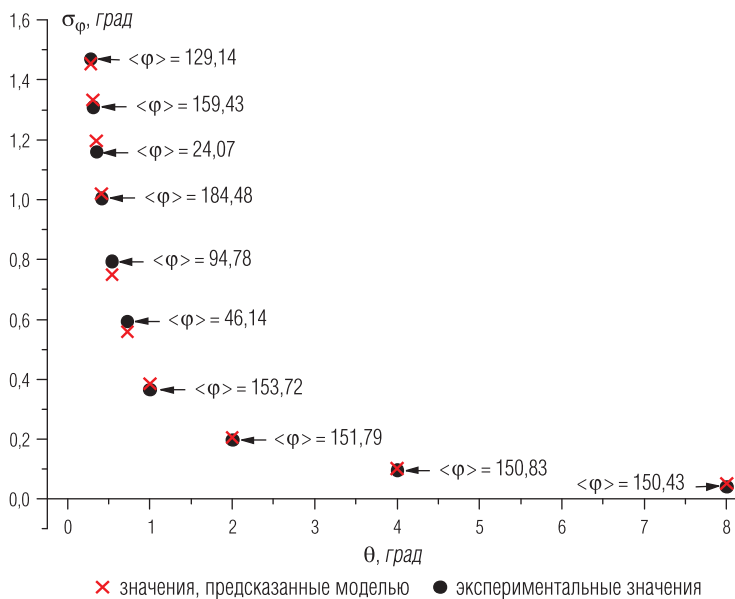


Рис. 1. Зависимость $\langle \sigma_\phi \rangle$ от θ инклинометрического датчика

Зависимость усредненного модельного СКО θ ($\langle \sigma_\theta \rangle$) от θ приведена на рис. 2. Несложно заметить, что представленная величина остается практически постоянной при всех θ и имеет среднее значение $7,07 \cdot 10^{-3} \text{ град}$.

Стоит отметить, что представленные модельные зависимости $\langle \sigma_\phi \rangle$ и $\langle \sigma_\theta \rangle$ хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными данными. Сравнение модельных данных СКО σ_ϕ с экспериментальными данными для разных θ и ϕ приведено на рис. 3. Расхождение с экспериментальными данными в исследуемом диапазоне θ и ϕ не превышает 10%. Среднее модельное значение σ_θ также хорошо согласуется со средним экспериментальным значением $7,1 \cdot 10^{-3} \text{ град}$.

Рис. 2. Зависимость $\langle \sigma_\theta \rangle$ от θ инклинометрического датчикаРис. 3. Сравнение модельных и экспериментальных σ_φ при различных φ и θ

Очевидно, что степень использования методики определяется границей “мертвой зоны” измерения азимута (θ_{lim}). Теоретически обоснованную границу такой зоны можно рассчитать по формуле

$$\theta_{\text{lim}} = |\Delta\theta_{\text{абс}}| + 2\sigma_{\theta}, \quad (7)$$

где $|\Delta\theta_{\text{абс}}|$ – модуль амплитуды абсолютной допустимой погрешности по θ (обычно задается в паспорте инклинометра); σ_{θ} – СКО аддитивного гауссового шума расчетных значений θ при выбранном времени усреднения первичных данных. Для используемого в эксперименте датчика $\theta_{\text{lim}} = 0,165 \text{ град}$.

В то же время не при всех значениях остаточного шума первичных преобразователей возможно достижение границы “мертвой зоны” (7). Очевидно, что область использования предложенного метода определяется неравенством

$$P_{\text{max}\Delta\varphi}(\theta) \geq 4\sigma_{\varphi}(\theta), \quad (8)$$

где $P_{\text{max}\Delta\varphi}(\theta)$ – интерполяция максимальных отклонений φ ($|\Delta\varphi|_{\text{max}}$) при фиксированном зенитном угле θ_i ; $i = \overline{0,6}$ ($|\Delta\varphi|_{\text{max}}$ определяются по калибровочной таблице (см. ниже), а $\sigma_{\varphi}(\theta)$ – расчетное модельное значение среднеквадратического отклонения φ . Значение в четыре СКО выбрано из тех соображений, что оно более чем на 95% покрывает диапазон изменений φ , связанных с шумом. Следовательно, для оценки границы применения метода (θ_{min}) можно использовать формулу

$$P_{\text{max}\Delta\varphi}(\theta_{\text{min}}) = 4\sigma_{\varphi}(\theta_{\text{min}}). \quad (9)$$

Для исследуемого датчика $\theta_{\text{min}} = 0,106 \text{ град}$. Таким образом, вплоть до θ_{lim} методика гарантирует повышение точности расчета φ и α .

Сбор табличных данных $\Delta\varphi_i(\theta_i, \varphi_i)$ осуществлялся с усреднением в одном положении по 100 кадрам данных. Значения θ в таблице приблизительно равны (0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0). Методика не требует точного выставления θ по лимбу. Шаг по φ составляет приблизительно 30 град от 0 до 330 град. Причем стоит отметить, что шаг может лишь приблизительно равняться 30 град, но он должен быть фиксированным для всех θ . Только в этом случае можно отказаться от лимба по φ и принять значения φ при $\theta \approx 16 \text{ град}$ за опорные. Разность между опорными значениями визирного угла и его значениями при других значениях зенитного угла выступает в

роли необходимой правки для уточнения φ и α во время бурения или каротажа.

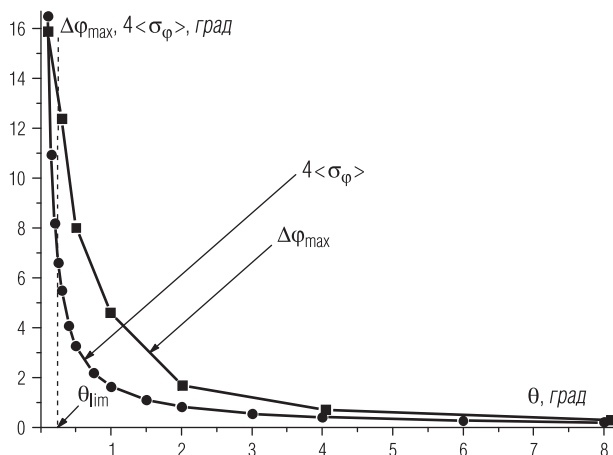


Рис. 4. Сравнение зависимостей от θ максимальной экспериментальной ошибки визирного угла и учетверенного модельного СКО φ

Принципиальным вопросом при реализации метода является интерполяция экспериментальных табличных данных в промежуточных значениях аргументов (расчетных φ и θ). Наиболее простым и одновременно наиболее грубым способом интерполяции в данном случае является триангуляция. Для этого для текущей точки с координатами (θ_i, φ_i) необходимо найти три ближайших табличных значения, построить уравнение плоскости через эти точки и найти значение функции отклонения. Этот метод является быстрым и не требует серьезных вычислительных мощностей, поэтому он может быть применен на микроконтроллере прямо во время замеров.

Однако численные методы позволяют существенно сократить ошибку приближения в промежуточных точках. Так, сплайн-интерполяция промежуточных точек позволяет получить гладкую поверхность ошибки $\Delta\varphi$, которая строго проходит через калибровочные и с высокой степенью точности приближает промежуточные точки. На рис. 5 приведена интерполяция исследуемой поверхности модифицированными сплайнами [4].

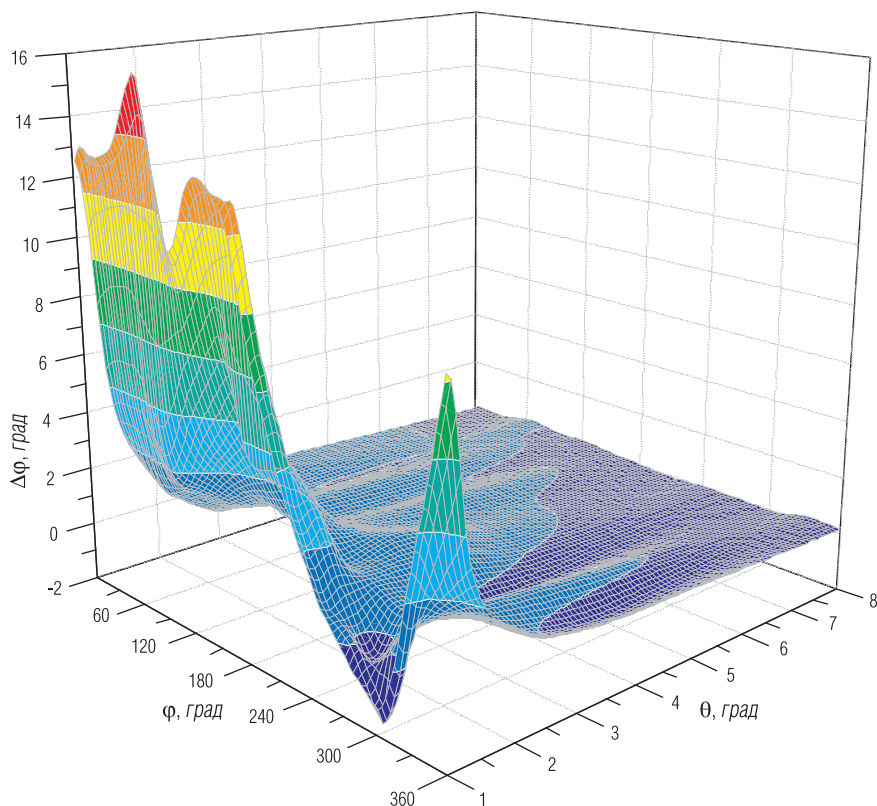


Рис. 5. Результат интерполяции табличных данных ошибки визирного угла $\Delta\varphi(\varphi, \theta_i)$ при помощи модификации сплайна Акимы [4]

Стоит также отметить, что по табличным данным можно провести экстраполяцию данных в область очень малых θ (меньше $0,25 \text{ град}$). Такая экстраполяция позволяет вплотную приблизиться к теоретическому пределу определения α (7).

Сравнение нескорректированных и поправленных значений φ в промежуточных (не калибровочных положениях) приведено на рис. 6.

Несложно заметить, что для сравнительно больших θ (больше 6 град) предложенная методика практически не приводит к уточнению φ (рис. 6, e).

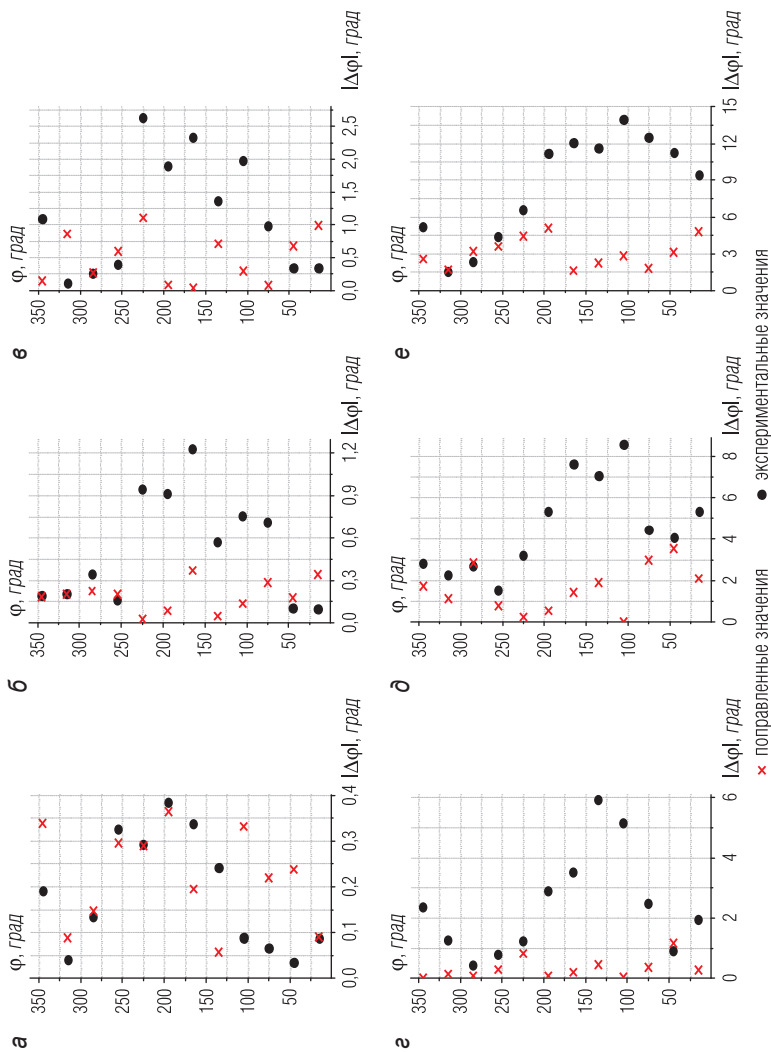


Рис. 6. Сравнение расчетных значений φ с корректуркой и без нее; $|\Delta\varphi|$ – модуль разности расчетного (или скорректированного) и установленного φ : а) $\langle \theta \rangle > = 7,03$ град; б) $\langle \theta \rangle < \theta > = 3,13$ град; в) $\langle \theta \rangle < \theta > = 1,56$ град; г) $\langle \theta \rangle < \theta > = 0,77$ град; д) $\langle \theta \rangle < \theta > = 0,40$ град; е) $\langle \theta \rangle < \theta > = 0,23$ град

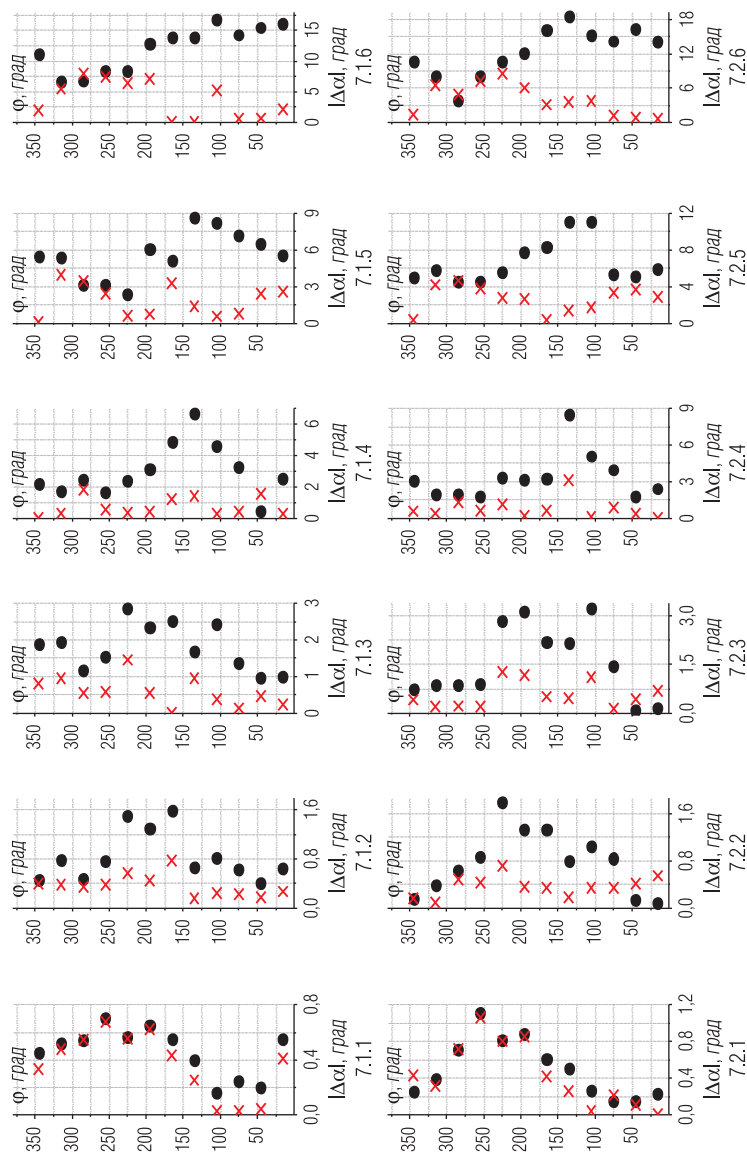


Рис. 7. Сравнение расчетных значений α с корректировкой и без нее; $|\Delta\alpha|$ – модуль разности расчетных (или исправленных) и установленных значений α , град: 7.1.1–7.1.6 – 45; 7.2.1–7.2.6 – 135; 7.3.1–7.3.6 – 225; 7.4.1–7.4.6 – 315; зенитные углы, град: 1-й столбец – 7,01; 2-й – 3,02; 3-й – 1,46; 4-й – 0,77; 5-й – 0,36; 6-й – 0,21

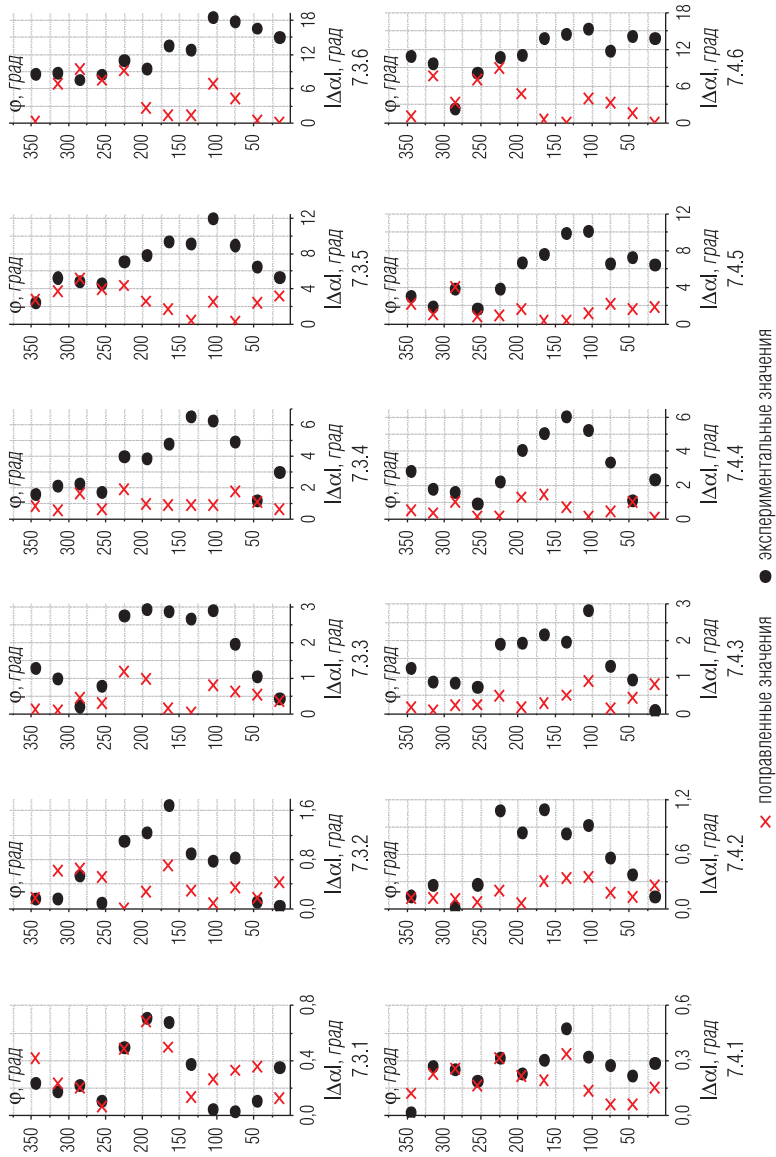


Рис. 7. Продолжение

Это связано с тем, что в данном диапазоне учетверенная дисперсия шума близка к постоянной остаточной погрешности базовой калибровки (рис. 4). В области меньших θ корректировка значений φ приводит, в среднем, к удвоению точности (рис. 6, $a-d$), что хорошо согласуется с рис. 4 (разница между кривыми $|\Delta\varphi|_{\max}$ и $4 < \sigma_\varphi >$). Стоит также отметить, что вблизи калибровочных точек методика еще лучше способствует уточнению φ , однако проверочные точки были специально выбраны между ними как по φ , так и по θ .

Сравнение нескорректированных и поправленных расчетных значений α в промежуточных положениях приведено на рис. 7. Для минимизации дополнительных погрешностей измерения проводились в спокойный геомагнитный день [2].

Как и в случае правки φ , разбег между исходными и скорректированными значениями α практически не наблюдался при θ , больших 6 град. В области меньших θ методика, при данном уровне шума первичных преобразователей, позволяет вычислить α в среднем с вдвое большей точностью.

Заключение

Показано, что помимо остаточной погрешности базовой калибровки в области малых зенитных углов, на расчетные значения визирного угла и, как следствие, азимута значительное влияние оказывают шумы первичных преобразователей углов наклона. Причем их влияние тем существеннее, чем меньше зенитный угол. В то же время СКО шума визирного угла можно смоделировать на основе знания среднего СКО нормированных проекций датчиков углов наклона, что позволяет оценить разброс расчетных данных, а также область применения и точность предложенной методики. Так, для датчиков со средним СКО остаточного шума после усреднения по 100 кадрам данных, равным $1,236 \cdot 10^{-4}$ от величины нормированной проекции, предложенная методика позволяет уточнить значения визирного угла в среднем в два раза в области зенитных углов от границы “мертвой зоны” (7) до 6 град.

Выдвинутая на основе высокого коэффициента корреляции гипотеза о превалирующем влиянии на погрешность расчета азимута ошибки расчета визирного угла подтвердилась. Таким образом, азимут в области малых зенитных углов также уточняется в среднем в два раза.

Повышение точности предложенной методики правки визирного угла и азимута возможно путем уменьшения шумов датчиков углов наклона, совершенствованием методов усреднения и фильтрации, а также повышением точности вычисления промежуточных поправок по таблице, что возможно, в частности, путем увеличения числа калибровочных положений, а также увеличением времени сбора данных в калибровочных точках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковшов Г. В., Коловертнов Г. Ю. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. 228 с.
2. Магнитные бури онлайн / сайт лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института Российской академии наук // http://www.tesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html
3. Box G. E. P., Muller M. E. A Note on the Generation of Random Normal Deviates // The Annals of Mathematical Statistics. 1958. V. 29. № 2. P. 610–611.
4. Hyman J. M. Accurate Monotonicity Preserving Cubic Interpolation // SIAM J. Sci. Stat. Comput. 1983. V. 4. № 4. P. 645–654.
5. Russel M. K., Russel A. W. Surveying of Boreholes. Patent U.S. № 4163324. 1979.

Рецензент канд. техн. наук Г. А. Павленко