УДК 622.243.27:550.82 DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-13-23

### Исследование накопления случайных ошибок при инклинометрии скважин

С. Г. Могильный <sup>1</sup>, А. А. Шоломицкий <sup>2</sup><sup>∞</sup>, Е. В. Дверницкая <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация <sup>2</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация <sup>3</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», г. Москва, Российская Федерация

### e-mail: sholomitskij@mail.ru

Аннотация. Бурение нефтяных и газовых скважин происходит во все более сложных условиях и на больших глубинах. Увеличивается длина скважин и усложняется их траектория, чтобы попасть в пласты и залежи небольшой мощности. Повышение точности определения фактического положения оси скважины и ее забоя является важной и актуальной задачей. Объективную информацию о точности проводки скважин можно получить только из двойных инклинометрических измерений. Существующая теория накопления погрешностей инклинометрической съемки отличается от фактических данных, полученных при выполнении двойных измерений. Фактические линейные отклонения скважин более чем в два раза превышают теоретические. Выявленная в результате автокорреляционного анализа зависимость измерения смежных интервалов при гироскопической инклинометрии (коэффициент корреляции равен 0,5) потребовала их учета в практике анализа точности проводки нефтяных и газовых скважин. Для учета этого выполнено уточнение теории накопления погрешностей инклинометрической съемки, которое позволило объяснить от 30 до 40 % расхождения между теоретической и фактической точностью инклинометрической съемки. Оставшаяся часть отклонений может быть объяснена наличием неучтенных систематических погрешностей измерений. Приведенная методика анализа может быть полезна маркшейдерской службе предприятий при приемке повторной инклинометрии для оценки корректности измерений.

Ключевые слова: скважина, инклинометрия, зенитный угол, азимут, глубина, измерения, отклонения, забой, анализ, тренд, погрешность, случайные ошибки, систематические ошибки

### Для цитирования:

*Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Дверницкая Е. В.* Исследование накопления случайных ошибок при инклинометрии скважин // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 13–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-13-23

### Введение

Объемы бурения скважин растут по мере исчерпания запасов, освоенных «легкодоступных» месторождений нефти и газа. Для восполнения запасов приходится отрабатывать трудноизвлекаемые запасы, которые залегают на больших глубинах, имеют меньшую мощность. Обобщением процессов бурения и выработкой рекомендаций в этой области занимается международное общество инженеров нефтяников SPE [1]. Специальный международный комитет (ISCWSA) занимается точностью инклинометрических замеров скважин [2] и выпускает руководящие документы, которые обобщают все технологии инклинометрических измерений [3] и рассматривают вопросы точности определения положения оси скважины в пространстве, контроль сближения стволов и многие другие вопросы. В Российской Федерации формально действует инструкция [4] но, поскольку она не отражает современного состояния видов и технологии бурения и требований к точности определения оси скважины, многие крупные нефтедобывающие компании создают корпоративные стандарты [5] на базе рекомендаций ISCWSA [3].

Исследование точности положения скважин продолжается как с учетом разнообразных систематических погрешностей, например [6], так и случайных [7] для гироскопической инклинометрии скважин [8].

Мониторинг выполнения проекта строительства скважин при наклонно-направленном бурении является важнейшей задачей маркшейдерской службы, которая ведет базу данных бурения скважин и обеспечивает ее достоверность [5].

Конус неопределенности оси скважины, определяющий границы ее возможного расположения, используется при моделировании схемы разработки месторождений, оценке рисков пересечения соседних скважин и для контроля границ лицензионных участков. Расчет траектории выполняется в соответствии с методиками, рекомендованными ISCWSA [3].

Маркшейдерская служба добывающей компании получает данные о пробуренных скважинах и результатах их инклинометрии от разных подрядчиков уже в том виде, когда выполнена обработка измерений в соответствии рекомендациями ISCWSA, т. е. в измерения введены поправки за систематические погрешности, полученные из эталонирования оборудования.

Таким образом, при расчете конуса неопределенности следует предполагать, что измерения углов и глубины в скважине отягощены только случайными погрешностями.

Рекомендуемые в [4] формулы расчетов были несколько уточнены в работах [9, 10] тем, что была учтена корреляция приращений координат смежных интервалов замеров. Ввиду особенностей инклинометрических измерений, к ним нельзя применить стандартный подход для корреляционного анализа геодезических измерений [11, 12]. В дальнейших расчетах используются параметры точности измерений, которые даны в паспорте применяемого оборудования.

Насколько эти расчеты достоверны, можно объективно оценить только из анализа повторной инклинометрии скважин. Анализ достаточно представительной выборки из дважды измеренных скважин (198 скважин) показал, что статистические характеристики разностей координат двух измерений значительно превышают расчетные, ожидаемые величины неопределенности в положении оси скважины. Согласование расчетных характеристик с данными выборки требует неоправданно увеличить показатели погрешностей измерений из паспортных данных.

## Задачи и методы исследований

Для объяснения выявленных фактов были поставлены две основные задачи:

 исследовать вероятностные статистические характеристики разностей измеряемых величин и координат соответственных точек на оси скважины из двух ее измерений;

 предложить новый метод расчета области неопределенности положения в пространстве оси скважины с учетом вероятностных свойств погрешностей измерений.

При исследовании первой задачи вынуждены исходить из того, что случайные погрешности измерений выбранных скважин являются случайной выборкой из одной статистической генеральной совокупности.

Результат измерения скважины будем рассматривать с точки зрения случайных процессов, т. е. результат есть случайная функция, тренд которой детерминирован некоторой существующей осью скважины и размыт случайными погрешностями процесса последовательных измерений [13, 14].

Такая модель оправдывается тем, что измерения связаны последовательностью как во времени, так и в пространстве.

Повторное измерение скважины есть независимая реализация того же случайного процесса, отличающегося только набором случайных погрешностей измерений.

Следовательно, разности соответственных измеренных величин и координат точек также являются случайными функциями реализации одного случайного процесса.

Отклонения координат в повторном измерении скважины представляют собой некоторый случайный процесс, но отнести его к стационарному процессу нельзя, поэтому его анализ требует специальной методики определения статистических параметров. Угловые и линейные измерения выборки скважин есть отдельные участки этого случайного процесса, который для угловых и линейных измерений принимается стационарным. Как будет показано далее, его можно считать эргодическим [13, 14].

Методика исследований статистических характеристик случайных погрешностей измерений зенитных углов и азимутов описывается на примере выборки из 127 повторных измерений скважин, которые остались в выборке после фильтрации по величине тренда изменения азимута. Основные параметры скважин:

- средняя глубина 2 600 м;

– интервал измерений 10 м по оси;

- зенитные углы до 30;

 измерения в обоих случаях выполнены сенсором на базе гироскопа;

 выполнена коррекция измерений по данным метрологии сенсоров;

 – разности результатов измерений вычислялись «второе – первое».

#### Результаты исследований

Рассеяние величин разностей результатов (рис. 1) свидетельствуют, что они носят случайный характер, но имеются отдельные ураганные отклонения. Заметные локальные отклонения азимутов можно объяснить некачественным измерением скважины.



Рис. 1. Рассеяние разностей по глубине: *а*) зенитных углов; *б*) азимутов

О законе распределения разностей можно судить по гистограммам (рис. 2).

Случайные погрешности угловых измерений являются суммой влияния различных факторов и по законам теории предельных распределений вероятностей могут описываться одним из них. Гистограммы подобны экспоненциальному распределению Лапласа, к которому может стремиться сумма случайных величин [13]. Пунктирные кривые на рис. 2 аппроксимируют гистограммы функцией плотности вероятностей g(x) следующего вида:

$$g(x) = \frac{1}{2\lambda} e^{\frac{-|x-\theta|}{\lambda}},$$
 (1)

где  $\lambda$  и  $\theta$  – параметры распределения.

Приведенные на рис. 2 величины параметров являются приближенными, они служат ориентиром для более детальных исследований статистических свойств разностей результатов повторной инклинометрии.

Распределение Лапласа можно принять в качестве рабочей гипотезы, чтобы использовать в дальнейшем некоторые его свойства.



Рис. 2. Гистограммы разностей: *a*) зенитных углов; *б*) азимутов

Средние квадратические разности *m*<sub>*h*<sub>*i*</sub> в зависимости от глубины можно вычислить по совокупности скважин</sub>

$$m_{h_i} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{j=1}^{N} \delta_{i,j}^2} \quad , \tag{2}$$

где  $h_i$  – глубина *i*-й точки от устья измерений; N – количество скважин в выборке;  $\delta_{i,j}$  – разность измерений в точке *i* скважины *j* (рис. 3).

График показывает, что на концах скважины величины  $m_{h_i}$  сильно колеблются, что можно назвать граничным эффектом, где чаще всего проявляются ураганные погрешности. В основной части скважины погрешности находятся в некоторой стабильной ограниченной области, которая и определяет точность измерительной системы.

Ураганные величины разностей могут существенно исказить характеристику случайных погрешностей, поэтому рекомендуется использовать их медианную оценку, которая менее чувствительна к случайным всплескам [15]. В результате получим срединные величины разностей:

зенитных углов –  $S_{zenit} = 0.18^{\circ}$ ;

азимутов –  $S_{azimut} = 2,17^{\circ}$ .

Опираясь на рабочую гипотезу о том, что разности, как случайные величины, имеют распределение вероятностей Лапласа, можно показать, что срединная величина связана со средней квадратической коэффициентом 2,04, т. е.

зенитных углов –  $M_{zenit} = 2,04 \times S_{zenit} = 0,38^{\circ}$ ; азимутов –  $M_{azimut} = 2,04 \times S_{azimut} = 4,23^{\circ}$ .

Так как оба измерения равноточные, то средние квадратические ошибки одного измерения составят:

зенитных углов – 
$$m_z = \frac{M_{zenit}}{\sqrt{2}} = 0,27^\circ$$
;  
азимутов –  $m_\alpha = \frac{M_{azimut}}{\sqrt{2}} = 2,99^\circ$ .



Рис. 3. Величины *m*<sub>h</sub>, по глубине:

a) зенитные углы;  $\delta$ ) азимуты

Таким образом, определяются важные статистические параметры угловых разностей как стационарного случайного процесса: среднее значение и дисперсия. Полученные значения нельзя принимать как окончательные, поскольку использовалась выборка из 127 скважин, которые остались после отбраковки по трендам разности азимутов.

Каждый стационарный случайный процесс характеризуется еще нормированной корреляционной функцией, которая показывает статистическую связь между величинами последовательного ряда значений в отдельной реализации процесса [13, 14].

Построим корреляционную функцию *R*( $\tau$ ) для разностей одной скважины. Изменения разностей угловых измерений конкретной скважины может иметь тренд линейного вида (рис. 4).



Рис. 4. График разностей азимутов по глубине (красная линия) и линейный тренд их изменения (синяя линия)

Функция  $R(\tau)$  вычисляется по  $\delta_i$  отклонениям разностей от линии тренда по формуле:

$$R(\tau) = \frac{1}{N_{\tau}} \sum_{l}^{N_{\tau}} \frac{\delta_{l} \delta_{l+\tau}}{\sigma^{2}} \left\{ i \hat{I} 1...n \right\} , \qquad (3)$$

где  $N_{\tau}$  – число пар разностей, между которыми расположено  $\tau$  интервалов;

n – количеств интервалов измерений оси;  $\sigma^2$  – дисперсия разностей из формулы  $\sigma^2 = [\delta \delta] / n$ .

Наличие выраженного значительного по величине тренда разностей свидетельствует о неучтенных систематических погрешностях в одном из измерений. Анализ трендов в выборке может служить показателем качества измерений и основанием для удаления из выборки скважины как непригодной для оценки (рис. 5).



Рис. 5. Графики линейного тренда разностей зенитных углов

На рис. 5 видно, что тренды в некоторых скважинах заметны по величине, но средний тренд близок к горизонтальной оси.

Корреляционные функции разностей углов для одной из скважин приведены на рис. 6.





Главной особенностью корреляционных функций является то, что они по мере возрастания т стремятся к нулю, поэтому можно считать случайный процесс эргодическим.

Такая же закономерность наблюдается для других скважин (рис. 7).



Рис. 7. Графики корреляционных функций выборки скважин (отдельные скважины – точки красного цвета; медианное среднее – синий)

Линии корреляционных функций отдельных скважин случайны, но общий характер одинаков, его отражает линия медианного среднего (синий цвет).

Таким образом, можно считать доказанным, что случайные погрешности измеренных углов в соседних точках на оси скважины имеют положительную статистическую зависимость. Коэффициент корреляции около + 0,5 и более, в зависимости от применяемого оборудования.

В работе [9] рассматривалось накопление случайных погрешностей измерений с учетом корреляции приращений координат смежных интервалов.

Установленная выше закономерность коррелированности угловых измерений в конечных точках смежных интервалов обосновывает актуальность исследований ее влияния на накопление погрешностей в результатах инклинометрии.

В конце каждого *j*-го интервала измерены три величины:

 $l_j$  – длина интервала, м;  $\Theta_j$  – зенитный угол, град;  $\alpha_j$  – азимут, град, которые составляют вектор  $r_j$  измерений:

$$r_{j} = \begin{vmatrix} l_{j} \\ \Theta_{j} \\ \alpha_{j} \end{vmatrix}.$$
 (4)

Погрешности измерений величин интервала образуют вектор

$$\delta r_j = \begin{vmatrix} \delta l_j \\ \delta \Theta_j \\ \delta \alpha_j \end{vmatrix}.$$
(5)

Предполагается, что составляющие вектора  $\delta r_j$  являются независимыми случайными величинами без систематического смещения и с известными стандартами  $\sigma$  погрешностей, определяемыми техническими характеристиками применяемого инклинометра.

Однако угловые измерения смежных интервалов коррелированы, поэтому ковариационная матрица  $M_{j,j+1}$  векторов  $\delta r_j$  и  $\delta r_{j+1}$ будет иметь вид:

$$M_{j,j+1} = \begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Theta}^2 & 0 & 0 & \varepsilon_{\Theta} \sigma_{\Theta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 & \varepsilon_{\alpha} \sigma_{\alpha}^2 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\Theta} \sigma_{\Theta}^2 & 0 & 0 & \sigma_{\Theta}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\alpha} \sigma_{\alpha}^2 & 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^2 \end{vmatrix},$$
(6)

где  $\varepsilon_{\Theta}$  и  $\varepsilon_{\alpha}$  – коэффициенты корреляции погрешностей измеренных углов смежных интервалов, соответственно  $\Theta$  и  $\alpha$ .

Введем обозначения субматриц в формуле (5):

$$m_{j} = \begin{vmatrix} \sigma_{l}^{2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Theta}^{2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\alpha}^{2} \end{vmatrix} \qquad m_{j,j+1} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\Theta} \sigma_{\Theta}^{2} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\alpha} \sigma_{\alpha}^{2} \end{vmatrix}.$$
(7)

Тогда матрица М<sub>*i*, *i*+1</sub> примет вид

$$M_{j,j+1} = \begin{vmatrix} m_j & m_{j+1} \\ m_{j+1} & m_{j+1} \end{vmatrix}.$$
 (8)

В соответствии с принятыми обозначениями, ковариационную матрицу М всей совокупности измерений следует рассматривать в следующем виде:

$$M = \begin{vmatrix} m_1 & m_{1,2} & \dots & 0 \\ m_{1,2} & m_2 & m_{2,3} & \dots & 0 \\ 0 & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & m_{n-2,n-1} & m_{n-1} & m_{n-1,n} \\ 0 & \dots & m_{n-1,n} & m_n \end{vmatrix}$$
(9)

Последовательным вычислением приращений координат оси по каждому интервалу и их суммированием находят координаты точек оси скважины. В общем виде вектор  $X_k$ координат конца k-го интервала можно представить следующим выражением:

$$X_{k} = f_{1}(r_{1}, r_{1}) + \sum_{j=2}^{k} f_{j}(r_{j-1}, r_{j}), \quad (10)$$

где

$$X_k = \begin{vmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{vmatrix}, \tag{11}$$

а  $f_j(r_{j-1}, r_j)$  – векторная функция приращения координат на интервале j;

$$f_{j}(r_{j-1}, r_{j}) = \begin{vmatrix} \varphi_{x(r_{j-1}, r_{j})} \\ \varphi_{y(r_{j-1}, r_{j})} \\ \varphi_{z(r_{j-1}, r_{j})} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где функции  $\phi_{x(r_{j-1},r_j)}, \phi_{y(r_{j-1},r_j)}, \phi_{z(r_{j-1},r_j)}$  – скаляры.

Вектор  $\Delta X_k$  погрешностей координат точки k в соответствии с формулой (10) определяется следующим выражением:

$$\Delta X_{k} = \frac{\partial f_{1}(r_{1})}{\partial r_{1}} \delta r_{1} + \frac{\partial f_{2}(r_{1}, r_{2})}{\partial r_{1}} \delta r_{1} + \frac{\partial f_{2}(r_{1}, r_{2})}{\partial r_{2}} \delta r_{2} + \frac{\partial f_{3}(r_{2}, r_{3})}{\partial r_{2}} \delta r_{2} + \frac{\partial f_{3}(r_{2}, r_{3})}{\partial r_{3}} \delta r_{3} + \cdots$$

$$\cdots \frac{\partial f_{k}(r_{k-1}, r_{k})}{\partial r_{k-1}} \delta r_{k-1} + \frac{\partial f_{k}(r_{k-1}, r_{k})}{\partial r_{k}} \delta r_{k}.$$
(13)

Векторные частные производные представляют собой матрицы, которые с учетом формулы (12) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial f_{j}(r_{j-1}, r_{j})}{\partial r_{j}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_{x}}{\partial l_{j}} & \frac{\partial \varphi_{x}}{\partial \Theta_{j}} & \frac{\partial \varphi_{x}}{\partial \alpha_{j}} \\ \frac{\partial \varphi_{y}}{\partial l_{j}} & \frac{\partial \varphi_{y}}{\partial \Theta_{j}} & \frac{\partial \varphi_{y}}{\partial \alpha_{j}} \\ \frac{\partial \varphi_{z}}{\partial l_{j}} & \frac{\partial \varphi_{z}}{\partial \Theta_{j}} & \frac{\partial \varphi_{z}}{\partial \alpha_{j}} \end{vmatrix} = F_{i,j} , (14)$$

и для вектора r<sub>j-1</sub>

$$\frac{\partial f_{j}(r_{j-1},r_{j})}{\partial r_{j-1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_{x}}{\partial l_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_{x}}{\partial \Theta_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_{x}}{\partial \alpha_{j-1}} \\ \frac{\partial \varphi_{y}}{\partial l_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_{y}}{\partial \Theta_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_{y}}{\partial \alpha_{j-1}} \\ \frac{\partial \varphi_{z}}{\partial l_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_{z}}{\partial \Theta_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_{z}}{\partial \alpha_{j-1}} \end{vmatrix} = F_{i,j-1} (15)$$

Формулу (14) представим в следующем виде:

$$\Delta X_k = \left| F_{1,1} + F_{2,1} + F_{2,2} + F_{3,2} \dots + F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1} + F_{k,k} \right| \Delta_r,$$
(16)

$$M_{\Delta X_k} = F \cdot M \cdot F^T, \qquad (17)$$

где  $\Delta_r$  — общий вектор погрешностей измеренных величин, т. е.



Таким образом,  $M_{\Delta X_k}$  – ковариационная матрица погрешностей координат *k*-й точки оси скважины должна вычисляться по следующей формуле:

где *F* – блочная матрица строка в формуле (16).

Данные кривой 1 (рис. 8) получены по фактическим отклонениям координат двух измерений. Поскольку для некоторых скважин получены ураганные отклонения, вместо арифметического среднего использовалась медиана из разностей для каждой глубины. Медиана фильтрует ураганные значения в массиве величин.



Рис. 8. Границы неопределенности положения скважины по глубине:

1 – предельные разности координат оси из двух измерений выборки скважин;

3 и 2 – предельные граничные разности координат двух измерений, соответственно, с учетом корреляции измерений и без учета

Кривая 3 вычислена по формулам (10) – (17) с учетом  $\varepsilon_{\alpha} = \varepsilon_{\Theta} = 0,5$ , а кривая 2 по стандартной методике с уточнением из работы [9].

#### Выводы

В результате исследований установлено, что существующая методика расчета ожидаемой ошибки определения траектории скважины не соответствует практическим результатам измерений.

На основе ошибок двух измерений инклинометрии выявлена статистическая корреляционная зависимость измерений смежных интервалов.

Предложен метод накопления случайных погрешностей, который увеличивает надежность расчета ожидаемых ошибок определения положения скважины.

Предложенный метод анализа повторных измерений координат осей скважин позволяет сделать следующие выводы:

 – разности данных двух измерений следует рассматривать как реализации случайной функции (процесса), колебания которой для угловых измерений является стационарной случайной функцией;

 корреляционная функция разностей угловых измерений положительная и стремится к нулю, из чего следует, что измеренные на концах интервала углы статистически зависимы, коэффициент корреляции в среднем 0,5;  – как правило, разности координат забоя скважин значительно превышают расчетные величины области неопределенного положения скважины, которая определяется по паспортным погрешностям измерительного оборудования;

 предложен метод расчета области неопределенности положения скважины с учетом корреляции угловых измерений на концах интервала измерений, учет корреляции увеличивает область погрешности на 30–40 % в зависимости от конфигурации оси скважины;

 наличие в разностях угловых измерений линейного тренда свидетельствует о наличии
 в измерениях систематических погрешностей, которые не выявлены при калибровке оборудования и не были учтены при вычислении координат оси скважины;

 корреляционная зависимость смежных интервалов измерений полностью не объясняет различия между ожидаемыми расчетными и фактическими отклонениями координат;

– маркшейдерская служба, принимая данные инклинометрии от подрядных организаций, зачастую не имеет данных о калибровке оборудования и возможных систематических погрешностях измерений, не может судить о точности координат положения скважины в горном массиве и обеспечивать решение возлагаемых на нее задач.

Описанная методика может быть полезна для маркшейдерской службы при приемке повторных инклинометрических съемок скважин, так как позволяет проверить наличие трендов разностей измеренных углов и по их величинам отбраковать некорректные измерения скважин и оценить реальную точность проводки скважин. Уточнение полученных выводов потребует детального статистического анализа производственных материалов с учетом типов скважин и применяемого оборудования на максимально возможном числе двойных инклинометрических измерений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Society of Petroleum Engineers (SPE) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.spe.org.

2. Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) [Электронный pecypc]. – URL: https://www.iscwsa.net.

3. Jamieson A. et all Introduction to Wellbore Positioning eBook\_V9\_10\_2017-redux [Электронный pecypc]. – URL: http://www.uhi.ac.uk/en/research-enterprise/energy/wellbore-positioning-download – 247p.

4. Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах (дополнение к «Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах»). – Калинин : НПО «СоюзПромГеофизика», 1989. –14 с.

5. Методические указания компании. Наклонно-направленное бурение : распоряжение ПАО «НК "Роснефть" от 16.08.2018 № 446. – М., 2018. – 66 с.

6. Bannikov A., Gordeev V. Nonlinear Systematic Errors in Borehole Inclinometer Measurements // Conference: 22nd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2022At: Bulgaria – Vol. 22. – P. 129–140. – DOI 10.5593/sgem2022/1.1/s02.016

7. Hongyan Ma, Xiaoou Xu, Hongguo Xu, Xiaojian Song, Aibing Zhang, Xuelong Wang, Yarong Wang, Wenmao Liu, Jinghui Dong, Yufeng Guo. Visualization Research and Application of Uncertainty Method of Well Trajectory Based on ISCWSA Model // 6th International Conference on Energy Science and Applied Technology IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 804. – 2021. – DOI 10.1088/1755-1315/804/2/02206. – EDN FMCLBN.

8. Ekseth R., Weston J., Ledroz A., Smart B., Ekseth A. Improving the Quality of Ellipse of Uncertainty Calculations in Gyro Surveys to Reduce the Risk of Hazardous Events like Blowouts or Missing Potential Production through Incorrect Wellbore Placement. // Proceedings of the Conference: Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, March 2011. – DOI 10.2118/140192-MS.

9. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Дверницкая Е. В., Соболева Е. Л. Модель накопления погрешностей при инклинометрическом исследовании скважин. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2022. – Т. 9, № 3. – С. 38–45. – DOI 10.15372/FPVGN2022090306. – EDN JCXEQE.

10. Mogilny S. and Sholomitskii A. Mine Surveying Control of Wells. // International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020) 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – P. 1–6. – DOI:10.1088/1757-899X/1079/7/072033. – EDN LZVBIZ.

11. Лесных Н. Б., Мизин В. Е. О корреляции функций случайных ошибок измерений // Вестник СГУГиТ. – 2013. –Вып. 3 (23). – С. 21–27. – EDN RDTMPX.

12. Русяева Е. А. Теория математической обработки геодезических измерений : учеб. пособие Часть І. Теория ошибок измерений. – М. : МИИГАиК, 2016. – 56 с.

13. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. Издание 3-е переработанное. издат. Гос. физмат., М. : 1961. – 406 с.

14. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учеб. для вузов. – 10-е изд. стер. – М. : Высш. шк., 2006. – 575 с.

15. Мудров В. И., Кушко В. Л. Методы обработки измерений: Квазиправдоподобные оценки. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1983. – 304 с.

# Об авторах

Сергей Георгиевич Могильный – доктор технических наук, профессор кафедры геоинформатики, геодезии и землеустройства.

*Андрей Аркадьевич Шоломицкий* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Екатерина Валерьевна Дверницкая – маркшейдер 1-й категории.

Получено 26.04.2024

© С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. В. Дверницкая, 2025

# Study of the accumulation of random errors during well inclinometry

S. G. Mogilny<sup>1</sup>, A. A. Sholomitskii<sup>2</sup>, E. V. Dvernitskaya<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation <sup>2</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation <sup>3</sup>LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: e-mail: sholomitskij@mail.ru

Abstract. Drilling of oil and gas wells occurs in increasingly difficult conditions and at great depths. The length of wells increases and their trajectory becomes more complicated in order to get into formations and deposits of small thickness. Increasing the accuracy of determining the actual position of the well axis and its bottom is an important and urgent task. Objective information about the accuracy of well placement can only be obtained from double inclinometric measurements. The existing theory of accumulation of inclinometer survey errors differs from the actual data obtained by performing double measurements. The actual linear deviations of wells are more than twice the theoretical ones. To search for patterns, the authors performed an autocorrelation analysis of measurements using a sample of repeated measurements of wells, which showed that measurements of adjacent intervals cannot be considered independent. Research has shown that adjacent intervals have a correlation of 0.5 on average. To take this into account, the theory of accumulation of inclinometer survey errors was refined, which made it possible to explain from 30 to 40% of the discrepancy between the theoretical and actual accuracy of inclinometer surveys. The remaining part of the deviations can be explained by the presence of unaccounted systematic measurement errors. The presented analysis technique can be useful to the mine surveying service of enterprises when accepting repeated inclinometry to assess the correctness of measurements.

**Keywords:** well, inclinometry, zenith angle, azimuth, depth, measurements, deviations, bottom hole, analysis, trend, error, random errors, systematic errors

## REFERENCES

1. Society of Petroleum Engineers (SPE) Retrieved from https://www.spe.org

2. Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) (2023) Retrieved from https://www.iscwsa.net

3. Jamieson A. et all (2017) Introduction to Wellbore Positioning eBook\_V9\_10\_2017-redux Retrieved from http://www.uhi.ac.uk/en/research-enterprise/energy/wellbore-positioning-down-load-247p

4. Instrukciya po provedeniyu inklinometricheskih issledovanij v skvazhinah (dopolnenie k «Tekhnicheskoj instrukcii po provedeniyu geofizicheskih issledovanij v skvazhinah») (1989) [Instructions for conducting inclinometer surveys in wells (addition to the "Technical instructions for conducting geo-physical surveys in wells")]. Kalinin: NPO "SoyuzPromGeophysics", 1989, 14 p. [in Russian].

5. Metodicheskie ukazaniya «Naklonno-napravlennoe burenie» (2018) [Guidelines "Directional drilling"]. RN-Yuganskneftegaz LLC, No 446, 2018, Moskov, 66p. [in Russian].

6. Bannikov, A., Gordeev, V. (2022) Nonlinear Systematic Errors in Borehole Inclinometer Measurements. Proceedings of Conference: 22nd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2022 At: Bulgaria, Vol. 22, p. 129–140. DOI 10.5593/ sgem2022/1.1/s02.016.

7. Hongyan, M., Xiaoou, X., Hongguo, X., Xiaojian, S., Aibing, Z., Xuelong, W., Yarong, W., Wenmao, L., Jinghui, D., Yufeng, G. (2021) Visualization Research and Application of Uncertainty Method of Well Trajectory Based on ISCWSA Model. *Proceedings of the 6th International Conference on Energy Science and Applied Technology IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 804 022060 IOP* DOI 10.1088/1755-1315/804/2/022060, EDN FMCLBN.

8. Ekseth, R., Weston, J., Ledroz, A., Smart, B., Ekseth, A. (2011) Improving the Quality of Ellipse of Uncertainty Calculations in Gyro Surveys to Reduce the Risk of Hazardous Events like Blowouts or Missing Potential Production through Incorrect Wellbore Placement. *Proceedings of the Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands*, DOI 10.2118/140192-MS.

9. Mogilny, S. G., Sholomitskii, A. A., Dvernitskaya, E. V., Soboleva, E. L. (2022) Model of error accumulation during inclinometric survey of wells. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy* gornyh nauk [Fundamental and applied issues of mining sciences], 9(3), pp. 38–45 [in Russian].

10. Mogilny, S. and Sholomitskii, A. (2021) Mine Surveying Control of Wells. Proceedings of the International Science and Technology Conference (FarEastCon 2020) IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 072033 pp. 1–6, DOI 10.1088/1757-899X/1079/7/072033, EDN LZVBIZ.

11. Lesnykh, N.B., Mizin, V.E. (2013) On the correlation of functions of random measurement errors // *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2013, 3(23), pp. 21–27, EDN RDTMPX[in Russian].

12. Rusyaeva, E.A. (2016) Teoriya matematicheskoj obrabotki geodezicheskih izmerenij: uchebnoe posobie Chast' I. Teoriya oshibok izmerenij. [Theory of mathematical processing of geodetic measurements: textbook Part I. Theory of measurement errors.]. M. : MIIGAiK, 2016. – 56 p. [in Russian]

13. Gnedenko, B.V. (1969) *Teoriya matematicheskoj obrabotki geodezicheskih izmerenij: uchebnoe posobie Chast' I.* [*Theory of mathematical processing of geodetic measurements: textbook Part I. Theory of measurement errors.*] Moskva: State Fizmat Publishing House, 1961. 406 p. [in Russian]

14. Ventzel, E.S. (2006) *Teoriya veroyatnostej* [*Probability theory*] Textbook for universities / E.S. Ventzel. – 10th ed. Moskva: Higher. school, 2006. 575 p. [in Russian]

15. Mudrov, V.I., Kushko, V.L. (1983) *Metody obrabotki izmerenij: Kvazipravdopodobnye ocenki.* [*Measurement processing methods: Quasi-plausible estimates*]. – Ed. 2nd, revised and additional. Moskva: Radio and Communications, 1983. 304 p., [in Russian]

## Authors details

Sergey G. Mogilny – D. Sc., Professor of the Department of Geoinformatics, Geodesy and Land Management.

Andrei A. Sholomitskii – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

*Ekaterina V. Dvernitskaya* – Surveyor 1st category.

### Received 26.04.2024

© S. G. Mogilny, A. A. Sholomitskii, E. V. Dvernitskaya, 2025