

ГЕОДЕЗИЯ И МАРКШЕЙДЕРИЯ

УДК 528.48:550.82

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-6-15

Статистический анализ повторной инклинометрии скважин

С. Г. Могильный¹, А. А. Шоломицкий^{2✉}, Е. В. Дверницкая³

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

³ООО «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, пласты и залежи становятся меньшей мощности. Для повышения отдачи скважины оборудуются продолжительными горизонтальными участками. Определение фактического положения оси и забоя скважины при разведке и эксплуатации месторождений углеводородов является важной задачей, поэтому повышение точности определения положения скважин в пространстве является актуальной задачей. К сожалению, единственным объективным источником информации о точности проводки скважин являются только двойные инклинометрические измерения. Эти измерения выполнялись различными приборами через большой промежуток времени, поэтому возникает необходимость оценки достоверности и качества этих измерений. Для сравнения измерений предложен механизм перевычисления отклонений к плоскости скважин и поиска трендов в данных инклинометрии. Отбраковку некорректных измерений предложено выполнять по значениям тренда разностей азимутов. Статистический анализ отклонений оси скважины из двойных измерений показал, что фактические линейные отклонения скважин более чем в два раза превышают теоретические, поэтому необходимо найти причину такого несоответствия теории и практики. Первоочередной задачей является поиск неучтенных параметров в теоретическом обосновании расчета точности инклинометрии. Второй задачей, требующей дальнейших исследований, является обоснование критерия отбраковки некорректных измерений.

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

Для цитирования:

Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Дверницкая Е. В. Статистический анализ повторной инклинометрии скважин // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 6–15. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-1-6-15

Введение

Определение фактического положения оси и забоя скважины при разведке и эксплуатации месторождений углеводородов является важной задачей, поскольку от достоверности ре-

зультатов зависят не только технические, но экономические показатели всех подразделений предприятия. Практически все вновь вводимые и эксплуатируемые месторождения Западной Сибири относятся к трудноизвлекаемым запасам. Скважины становятся длиннее, с больши-

ми горизонтальными участками, поэтому для эффективного сбора нефти требуется высокая точность проводки скважин.

Наиболее часто повторную инклинометрическую съемку скважин выполняют при их реконструкции, углубке или добавлении горизонтальных участков, разбурировании боковых стволов. Статистика повторной инклинометрии на нефтяных и газовых месторождениях Западной Сибири показывает, что между первой и второй инклинометрическими съемками проходит от 10 до 20 лет и проводятся они различными методами. Инклинометрия в процессе бурения или сразу после него чаще всего производится магнитными методами, а в эксплуатируемой скважине с металлическими обсадными трубами – гироскопическим методом.

Точность попадания забоя готовой скважины в заданный проектом участок месторождения оценивается сравнением проектного положения оси скважины с осью, вычисленной по результатам инклинометрии пробуренной скважины с учетом вероятной погрешности вычисленных координат. При определении ожидаемых погрешностей учитывается метод вычислений и используются паспортные параметры точности. В Российской Федерации до сих пор используется методика [1], хотя она не отражает современный уровень развития технологий бурения и инклинометрии. За рубежом вопросы бурения и инклинометрии регулируются международным сообществом нефтяников (SPE) [2] и международным отраслевым комитетом по точности обследования скважин (ISCWSA) [3], который разрабатывает, поддерживает и публикует стандарты, связанные с исследованиями точности определения положения ствола скважины [4]. На базе международных стандартов и рекомендаций многие российские добывающие компании разрабатывают собственные корпоративные стандарты, например, [5]. Интерес к повышению точности инклинометрических данных очень высок, например, [3–15], и имеет длительную историю как в Российской Федерации, так и за рубежом.

Степень надежности определения соответствия проектного и фактического положения скважины зависит от многих факторов, и в первую очередь от принятых при расчете параметров точности инклинометрических измерений. Завышение точности измерения

или огрубления погрешностей одинаково опасны. Паспортные данные точности определены, как правило, на основе стендовых измерений, условия которых отличаются от условий проходки реальной скважины. Кроме того, в расчетах точности предполагается, что случайные погрешности измерений на разных интервалах попарно независимы и не содержат систематической составляющей. Исследовать реальную точность инклинометрии очень сложно, так как получить координаты забоя скважины альтернативным достаточно точным методом практически невозможно.

Повторные измерения осей скважин являются объективным источником сведений о погрешностях инклинометрии в реальных условиях. Разности координат оси скважины из двух измерений являются истинными ошибками, вызванными многими источниками погрешностей. В работе [4] имеется детальный анализ основных факторов и оценка их параметров. Разности координат повторной инклинометрии скважины характеризуют общую картину накопления погрешностей.

Задачи исследования

Задачей настоящей работы является анализ результатов повторной инклинометрии скважин и оценка некоторых свойств накопления погрешностей в координатах оси скважин с целью уточнения нормативных параметров в требованиях соответствия результатов бурения проекту.

Исходными данными для исследований служат результаты повторных измерений скважин на месторождениях Западной Сибири. Это позволяет предполагать, что условия бурения и инклинометрии скважин идентичны. Недостатком собранного материала является то, что это не сырые результаты измерений, а уже обработанные и представленные заказчику.

При выполнении анализа собранных данных исходим из следующих предварительных теоретических предположений:

– вычисленные координаты оси скважины являются случайной функцией реализации процесса измерений;

– разности координат повторных измерений также рассматриваются как случайные функции;

- случайные характеристики погрешностей разных типов оборудования идентичны;
- положение точек сравнения для разных скважин определяется порядковым номером интервала от устья скважины или глубиной;
- интервал расчета осей для всех скважин принимается равным 10 м или приводится к 10 м.

Сравнение координат оси скважины при повторных измерениях

Сравнение координат двух измерений скважины выполняется в следующем порядке.

1. Вычисляется ось скважины по каждому измерению.

2. Сравниваются координаты оси в точках на равных глубинах (глубина – расстояние по оси скважины от устья) или равных интервалах. Равенство глубины не абсолютное, а с учетом точности измерений. Если точки измерений не совпадают по глубине, то интерполированием координаты приводятся к первому измерению.

3. Предположим, что ось скважины есть плоская пространственная кривая в некоторой области вокруг точки сравнения (по аналогии с понятием соприкасающейся плоскости кривой в дифференциальной геометрии). Можно строить плоскость по двум соседним интервалам, т. е. по трем точкам (рис. 1). Переход к анализу формы участков скважины позволяет однозначно распределять проекции вектора от-

клонения независимо от направления геодезической системы координат, привязывая их к изменению формы скважины в пространстве.

По векторам r_i, r_{i+1} измерения оси в точке i вычисляются координаты центра окружности.

Вектор $r_{\Delta i}$ состоит из разностей координат двух измерений скважины, верхние индексы 1 и 2 означают номер измерения скважины:

$$r_{\Delta i} = \begin{vmatrix} x_i^1 - x_i^2 \\ y_i^1 - y_i^2 \\ z_i^1 - z_i^2 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

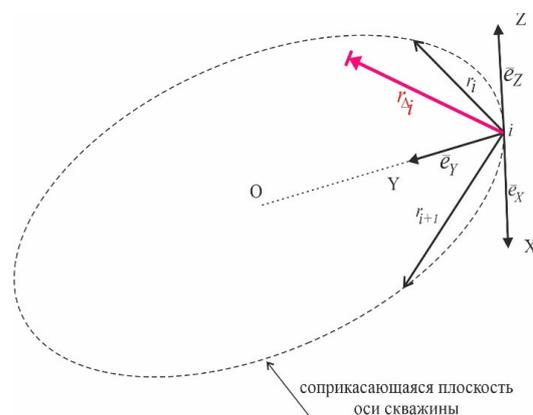


Рис. 1. Схема сравнения координат забоя скважины

Единичные вектора системы координат $iXYZ$ определяются из выражений:

$$\bar{e}_Y = \begin{vmatrix} X_0 - X_i \\ Y_0 - Y_i \\ Z_0 - Z_i \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2}}. \quad (2)$$

При определении плоскости оси скважины выбираются интервалы симметрично влево и вправо от точки сравнения i (рис. 2).

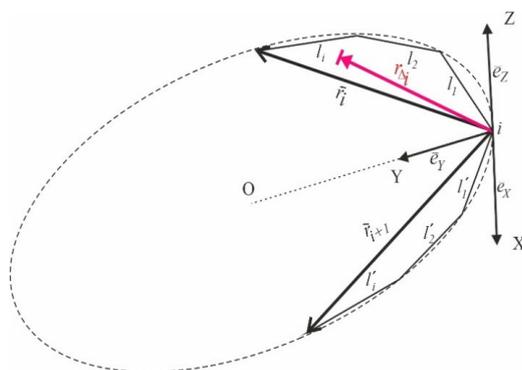


Рис. 2. Уточненная схема

Векторы \bar{r}_i, \bar{r}_{i+1} выбираются как замыкающие. Тогда вектор \bar{e}_z определяется из формул:

$$\bar{p} = (\bar{r}_i \times \bar{r}_{i+1}); \quad (3)$$

$$\bar{e}_z = \frac{1}{|\bar{p}|} \bar{p}, \quad (4)$$

где \bar{p} – вектор-результат векторного произведения векторов \bar{r}_i, \bar{r}_{i+1} ;

$|\bar{p}|$ – модуль вектора \bar{p}

$$\bar{e}_x = (\bar{e}_y - \bar{e}_z). \quad (5)$$

Если возникает неопределенность, то соседство можно расширить на несколько интервалов и вычислять некоторую усредненную плоскость (см. рис. 2).

Отклонения координат вычисляются по направлениям:

а) $\Delta_Y = (r_{\Delta_i} \cdot \bar{e}_Y)$ в плоскости оси скважины по направлению к центру О;

б) $\Delta_Z = (r_{\Delta_i} \cdot \bar{e}_Z)$ – по нормали к плоскости оси скважины;

в) $\Delta_X = (r_{\Delta_i} \cdot \bar{e}_X)$ – по направлению касательной к оси скважины в точке сравнения двух измерений;

г) $\Delta_l = |r_{\Delta_i}|$ – линейное отклонение.

4. Совокупность отклонений в азимутах и зенитных углах пар измерений скважины предлагается рассматривать как случайный процесс. Отклонения в азимутах и зенитных углах из разных скважин группируются по равным глубинам точек сравнения координат. Значения в группе рассматриваем как независимые однородные случайные величины в сечении реализаций случайного.

5. В каждой группе вычисляем среднее и стандарт / дисперсию по формулам:

$$m_i = \frac{[\Delta_j^{(i)}]}{N_i}; \quad (6)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{[\delta_j^{(i)} \delta_j^{(i)}]}{N_i - 1}}, \quad (7)$$

где m_i – среднее в группе i ;

$\Delta_j^{(i)}$ – j -е отклонение в группе i ;

N_i – число отклонений в группе i ;

$\delta_j^{(i)}$ – случайная составляющая $\Delta_j^{(i)}$ в группе i

$$\delta_j^{(i)} = \Delta_j^{(i)} - m_i; \quad (8)$$

S_i – стандарт случайных составляющих $\delta_j^{(i)}$ в группе i .

Статистический анализ отклонений

Для анализа точности инклинометрии в базу данных программы Wells [16] были занесены результаты двойной гироскопической инклинометрии по 198 скважинам месторождений Западной Сибири. Глубина скважин варьировалась от 2 000 до 2 700 м.

На рис. 3 приведены различные варианты, которые встречались при анализе инклинометрической съемки скважин. Рис. 3, а – это типичный вид съемки скважин, который характеризуется отклонением забоев до 50 м и закономерным возрастанием отклонений с увеличением глубины. На рис. 3, б показан вариант с большим систематическим отклонением скважин, отклонения забоев достигают 300 м. Число таких скважин в выборке не превышает 10%. Рис. 3, в соответствует повторной инклинометрии после углубки скважины, отклонения забоев соответствуют варианту на рис. 3, б. Очень редко встречаются «человеческие» ошибки, связанные с неправильной идентификацией скважин куста, которые приводят к отклонениям забоя в 300 м и более.

Видно, что в отклонениях осей скважин из повторной инклинометрии систематическая составляющая превышает случайную и влияние погрешностей измерения азимутов на порядок больше, чем влияние погрешностей измерения зенитных углов. Возникает необходимость в механизме удаления из выборки «ураганных» и некорректных измерений скважин. В качестве такого инструмента предлагается использовать уравнение тренда изменения разностей азимутов. На рис. 4, а – в приведены разности координат в плоскости скважин для всей выборки, полученные для соответствующих глубин по формулам (1)–(5).

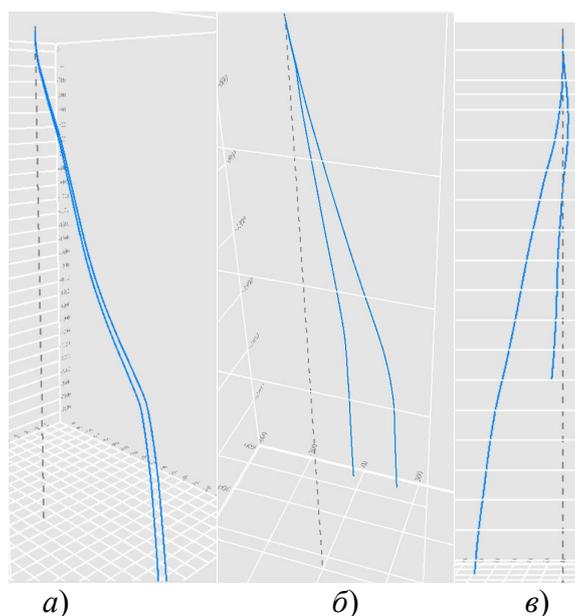


Рис. 3. Различные варианты инклинометрической съемки скважин:

а) типичный вид съемки; б) большое систематическое отклонение скважин; в) повторная инклинометрия

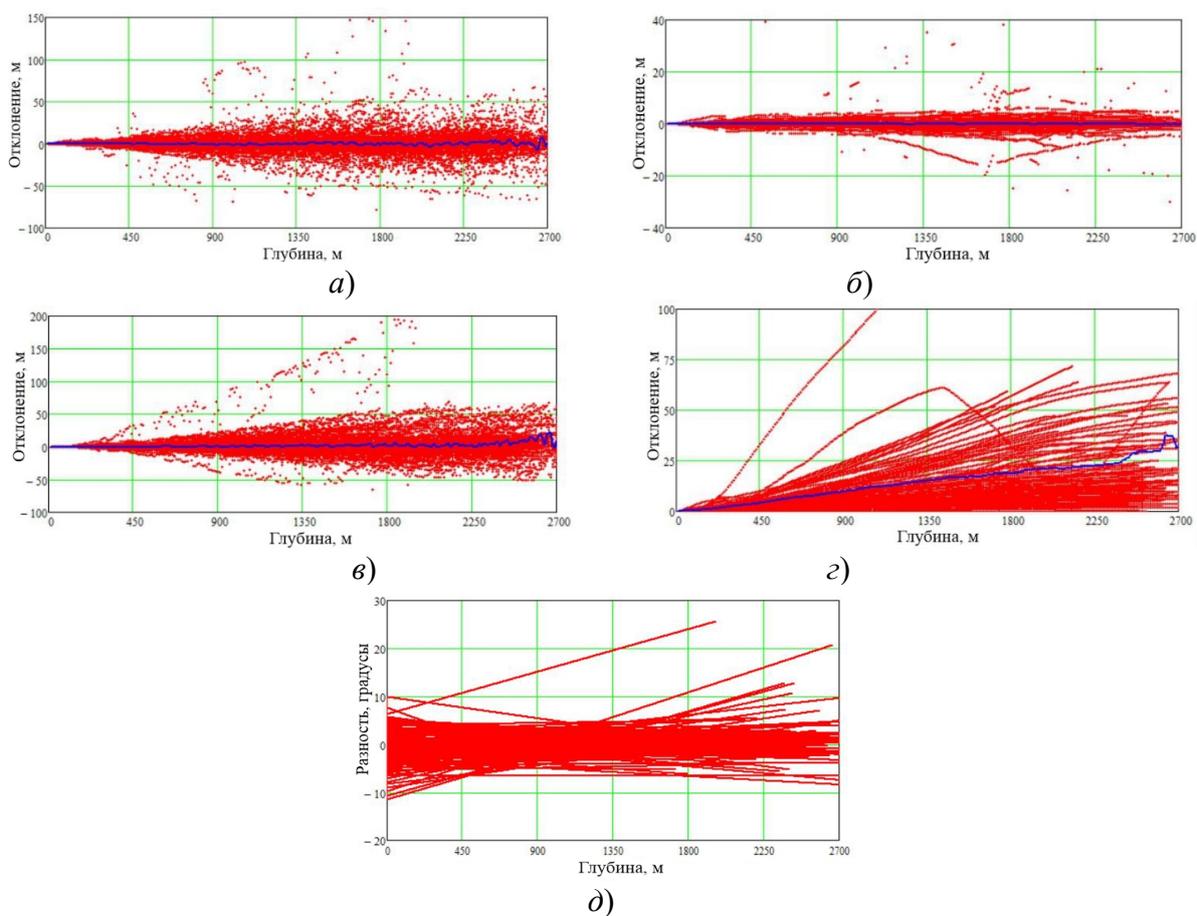


Рис. 4. Содержат некорректные измерения:

а) разность координат в плоскости скважины; б) разность координат по нормали к плоскости скважины; в) разность координат вдоль оси скважины; з) линейное смещение забоя 2-го измерения оси скважины; д) графики линий тренда разностей азимуты

На рис. 4, а – г и 5, а – г синим цветом приведены графики медианного среднего для данного параметра.

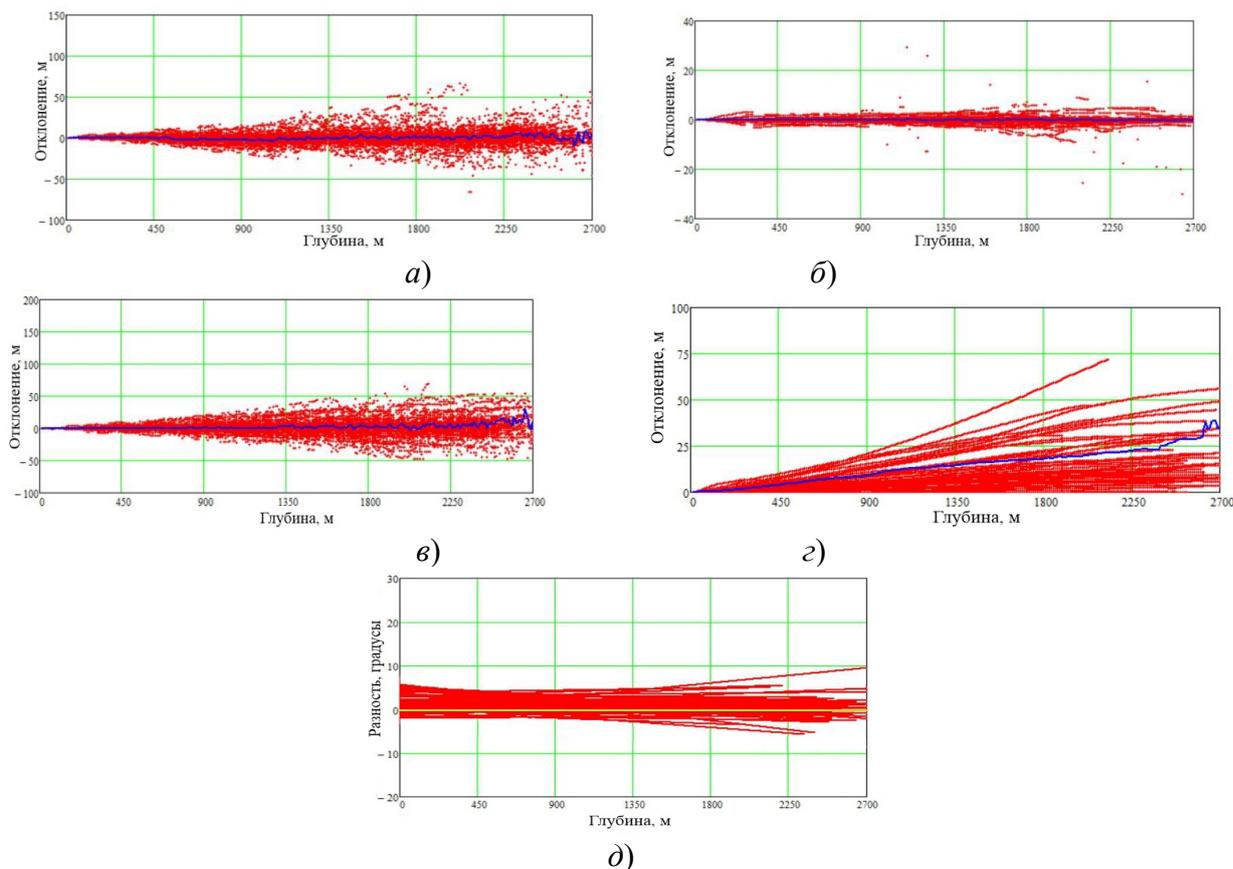


Рис. 5. Отфильтрованы по разностям азимутов:

- а) разность координат в плоскости скважины; б) разность координат по нормали к плоскости скважины; в) разность координат вдоль оси скважины; г) линейное смещение забоя 2-го измерения оси скважины; д) графики линий тренда разностей азимутов

На рис. 4, г приведены линейные смещения забоя второго измерения относительно первого для всех скважин выборки, а на рис. 4, д – графики линий тренда разностей азимутов. Как видно из графиков рис. 4, отклонения координат в плоскости скважин достаточно большие, как и отклонения в положении забоев скважин. Обращает внимание большое число графиков с высокой крутизной линий тренда для разностей азимутов, до 20 °С. На рис. 5 приведены те же параметры после фильтрации по величине тренда разностей азимутов (127 скважин).

Заключение

Измерение зенитных углов при инклинометрической съемке выполняется на порядок

точнее, чем азимутов, поэтому в качестве фильтра для удаления некорректных измерений и получения достоверной статистики предложено использовать допуск на величину тренда разностей азимутов. Опытным путем была подобрана величина тренда разностей азимутов в 20 °С. Фильтрация по величине тренда разностей азимутов уменьшила выборку примерно на 30 %. Повторная статистическая обработка выборки скважин для тех же параметров приведена на рис. 5 и показывает, что удаление некорректных инклинометрических измерений уменьшило величины исследуемых параметров и позволило подготовить статистический материал для автокорреляционного анализа инклинометрии с помощью аппарата случайных функций.

На рис. 6 приведены сводные графики средних значений отклонений и стандартов случайных составляющих по группам для соответствующих глубин скважин.

На рис. 6 графики Mx , My , Mz и ML – средние значения отклонений в плоскости оси скважины, по нормали к плоскости оси скважины, по направлению касательной к оси скважины и линейное отклонение соответ-

ственно. Графики Sx , Sy , Sz и SL – стандарты случайных составляющих в группе для соответствующей глубины. График Mm – ожидаемая величина линейного смещения забоя, определенная по методике [1], по данным паспортной точности измерения зенитных углов и азимутов инклинометрами при предположении независимости измерений смежных интервалов.

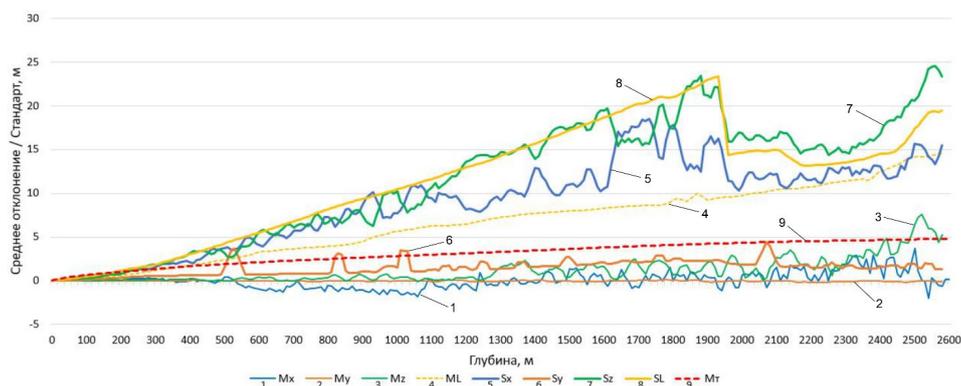


Рис. 6. Графики средних значений отклонений и стандартов случайных составляющих

Анализ графиков Mm и ML показывает, что теоретические линейные смещения осей скважин в два раза меньше фактических. Это свидетельствует о том, что теория накопления ошибок положения оси и забоя скважины, изложенная в методике [1], не соответствует практике и, возможно, не учитывает

влияния каких-то факторов. Авторы продолжат исследования в данном направлении для научного обоснования точности инклинометрической съемки и критериев фильтрации для различных видов инклинометрии и поиска факторов, которые влияют на точность инклинометрической съемки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах (дополнение к «Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах») // Калинин: НПО «СоюзПромГеофизика». – 1989. – С. 14.
2. Сайт общества инженеров-нефтяников [Электронный ресурс]. – URL: www.spe.org Society of Petroleum Engineers (SPE).
3. Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) [Electronic resource]. – URL: <https://www.iscwsa.net>.
4. Introduction to Wellbore Positioning This version is V09.10.2017 This eBook and all subsequent revisions will be hosted at [Electronic resource]. – URL: <http://www.uhi.ac.uk/en/research-enterprise/energy/wellbore-positioning-download>. – 247 p.
5. Наклонно-направленное бурение : метод. указания № П2-10 М-0038 ВЕРСИЯ 1.00. Введены в действие Распоряжением ООО «РН-Юганскнефтегаз» от 27.08.2018 г. № 2126.
6. Аглиуллин М. Я., Гайван А. Г., Горшенина С. В., Михеев М. Л., Саттаров А. И. Аппаратно-программный комплекс каротажа в процессе бурения и интерпретация его результатов. Опыт ООО «ТНГ-Групп» // Бурение и нефть. – 2019. – № 1. – С. 48–51. – EDN MMQPQT.
7. Филимонов В. П., Мендыбаева Д. Р., Носань И. А., Рахимов Т. Р., Атабекян В. А., Клычев Д. Д. Результаты применения сервиса «Управление замерами» при геонавигации горизон-

тальных скважин [Электронный ресурс] // Бурение & Нефть. – 2021. – № 12. – URL: <https://bur-neft.ru/archive/issues/2021-12>.

8. Mogilny S., Sholomitskii A. Mine Surveying Control of Wells // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1079, No. 7. – P. 072033. – DOI 10.1088/1757-899x/1079/7/072033. – EDN LZVBIZ.

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. Ekseth R., Kovalenko K., Weston J. L., Torkildsen T., Nyrnes E., Brooks A., Wilson H. The Reliability Problem Related to Directional Survey Data // Paper SPE 103734 presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand, 13–15 November 2006. – DOI 10.2118/103734MS.

11. Ekseth R., Torkildsen T., Brooks A., Weston J., Nyrnes E., Wilson H., Kovalenko K. High Integrity wellbore Surveying // SPE Drill & Compl. – 25 (04). – Pp. 438–447. – DOI 10.2118/133417-PA.

12. Nyrnes E., Torkildsen T. Analysis of the Accuracy and Reliability of Magnetic Directional Surveys // Paper SPE 96211 presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Dubai, 12–14 September 2005. – DOI 10.2118/96211-MS.

13. Torkildsen T., Harvardstein S. T., Weston J., Ekseth R. Prediction of Wellbore Position Accuracy When Surveyed With Gyroscopic Tools // Paper SPE 90408, SPE Drilling and Completion, March 2008.

14. Nyrnes E., Torkildsen T., Haarstad I., Nahavandchi H. Error Properties of Magnetic Surveying Data // Paper presented at the SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, 27–29 June 2005. – DOI 10.2118/90408-PA.

15. 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 // Paper SPE 140192 presented at SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 1–3 March 2011. – DOI 10.2118/140192-MS.

16. Программный комплекс Wells контроля проводки скважин [Электронный ресурс]. – URL: <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/скважины>.

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

Statistical analysis of repeated well inclinometry

S. G. Mogilny¹, A. A. Sholomitskii², E. V. Dvernitskaya³

¹Donetsk National Technical University, Donetsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

³LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russian Federation

e-mail: sholomitskij@mail.ru

Abstract. Drilling of oil and gas wells takes place in increasingly difficult conditions and at great depths, formations and deposits are becoming less powerful. To increase the return, wells are equipped with long horizontal sections. Determining the actual position of the axis and the bottom of the well during the exploration and exploitation of hydrocarbon deposits is an important task, therefore, improving the accuracy of determining the position of wells in space is an urgent task. Unfortunately, the only objective source of information about the accuracy of well wiring is only double inclinometric measurements. These measurements were performed by various instruments over a long period of time, so there is a need to assess the reliability and quality of these measurements. To compare measurements, a mechanism is proposed for recalculating deviations to the plane of wells and searching for trends in inclinometry data. It is proposed to reject incorrect measurements based on the trend values of different azimuths. Statistical analysis of the well axis deviations from the double measurements showed that the actual linear deviations of the wells are more than twice as high as the theoretical ones. Therefore, it is necessary to find the reason for this discrepancy between theory and practice. The primary task is to find unaccounted-for parameters in the theoretical justification for calculating the accuracy of inclinometry. The second task requiring further research is to substantiate the criterion for rejecting incorrect measurements.

Keywords: borehole, axis, inclinometry, zenith angle, azimuth, depth, measurements, deviations, delay, analysis, trend, error

REFERENCES

1. Instructions for conducting inclinometer surveys in wells (addition to the “Technical instructions for conducting geophysical surveys in wells”). (1989). *Kalinin: NPO "SoyuzPromGeophysics"*. [Kalinin: NPO “SoyuzPromGeophysics”], 14 p. [in Russian].
2. Website of the Society of Petroleum Engineers. (SPE) Retrieved from <https://www.spe.org>.
3. Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) Retrieved from <https://www.iscwsa.net>.
4. Introduction to Wellbore Positioning (2017) This version is V09.10.2017 This eBook and all sub-sequent revisions will be hosted at. Retrieved from <http://www.uhi.ac.uk/en/research-enterprise/energy/wellbore-positioning-download>. 247 p.
5. Guidelines “Directional drilling” (2018). No. P2-10 M-0038 VERSION 1.00. Put into effect by Order of RN-Yuganskneftegaz LLC dated August 27, 2018 No. 2126 [in Russian].
6. Agliullin, M. Ya., Gaivan, A. G., Gorshenina, S. V., Mikheev, M. L., & Sattarov, A. I. (2019) Hardware-software complex for logging while drilling and interpretation of its results. Experience of TNG-Group LLC, *Burenie i nefi' [Drilling and oil]*, No. 1, 48–51. EDN MMQPUT [in Russian].
7. Filimonov, V. P., Mendybaeva, D. R., Nosan, I. A., Rakhimov, T. R., Atabekyan, V. A., & Klychev, D. D. (2021) Results of using the “Measurement Management” service for geosteering horizontal wells, *Burenie i nefi' [Drilling and oil]*, 2021., No. 12 (December). Retrieved from <https://burneft.ru/archive/issues/2021-12> [in Russian].
8. Mogilny, S. & Sholomitskii, A. (2021) Mine Surveying Control of Wells. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1079, No. 7. P. 072033. DOI 10.1088/1757-899x/1079/7/072033. EDN LZVBIZ.
9. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., Dvernitckaya, E. V., & Soboleva, E. L. (2022) Model of error accumulation during inclinometric survey of wells. *Fundamental'nye i prikladnyye voprosy gornyh nauk [Fundamental and applied issues of mining sciences]*, 9 (3), 38–45 DOI 10.15372/FPVGN2022090306, EDN JCXEQE [in Russian].
10. Ekseth, R., Kovalenko, K., Weston, J. L., Torkildsen, T., Nyrnes, E., Brooks, A., & Wilson, H. (2006) The Reliability Problem Related to Directional Survey Data. Paper SPE 103734 presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand, 13–15 November 2006. DOI 10.2118/103734MS.

11. Ekseth, R., Torkildsen, T., Brooks, A., Weston, J., Nyrnes, E., Wilson, H., & Kovalenko, K. (2010) High Integrity wellbore Surveying *SPE Drill & Compl.* 25 (04). 438–447 DOI 10.2118/133417-PA.
12. Nyrnes, E., & Torkildsen, T. (2005) Analysis of the Accuracy and Reliability of Magnetic Directional Surveys. Paper SPE 96211 presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Dubai, 12–14 September 2005. DOI 10.2118/96211-MS.
13. Torkildsen, T., Harvardstein, S.T., Weston, J., & Ekseth, R. (2008) Prediction of Wellbore Position Accuracy When Surveyed With Gyroscopic Tools. Paper SPE 90408, SPE Drilling and Completion, March 2008.
14. Nyrnes, E., Torkildsen, T., Haarstad, I., & Nahavandchi, H. (2005) Error Properties of Magnetic Surveying Data. Paper presented at the SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, 27–29 June 2005. DOI 10.2118/90408-PA.
15. 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. Paper SPE 140192 presented at SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, 1-3 March 2011. DOI 10.2118/140192-MS.
16. “Wells” software package for well drilling control. Retrieved from <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/wells>.

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*