

На правах рукописи

Дверницкая Екатерина Валерьевна

Дверницкая

Совершенствование методики математической обработки результатов измерений инклинометрической съемки для определения параметров скважин нефтегазовой отрасли Российской Федерации

1.6.22. Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Шоломицкий Андрей Аркадьевич.

Официальные оппоненты:

Мустафин Мурат Газизович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», заведующий кафедрой инженерной геодезии;

Гриднев Семен Олегович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится 2 декабря 2025 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»: <https://sgugit.ru/science-and-innovations/dissertation-councils/dissertations/dvernitskaya-ekaterina-valerevna/>

Автореферат разослан 21 октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 25.09.2025.

Формат 60 × 84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 111.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плахотного, 8

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы в разработку запасов углеводородного сырья вовлекаются все более трудно извлекаемые запасы из технологически сложных месторождений; увеличиваются глубины бурения и усложняются конструкции профилей скважин, удлиняются горизонтальные участки. В процессе длительной разработки месторождений накапливаются результаты инклинометрических наблюдений пробуренных скважин, выполненных в разные годы с применением различных технологий. Инклинометрия нефтяных скважин, являясь методом оценки проходки ствола скважины, позволяет определять ее пространственное положение. Альтернативных методов для контроля траектории оси скважин в настоящее время не существует, что приводит к проведению повторных измерений инклинометрии. В силу этого обстоятельства многократные инклинометрические измерения служат единственным объективным источником информации о точности пространственного положения оси скважин.

При проведении многократных повторных инклинометрических съемок одной и той же скважины невозможно однозначно определить, какая из съемок является наиболее достоверной, в связи с чем возникает необходимость определения степени надежности, корректности и целесообразности применения результатов измерений той или иной съемки. Инклинометрическая съемка скважин является основой для выработки проектных решений при разработке месторождений углеводородов, проектировании геологоразведочных работ, строительстве скважин различного назначения, планировании геолого-технологических мероприятий, построении трехмерных геологических моделей месторождений. Поэтому точность результатов такой съемки оказывает существенное влияние на качество подготовки проектной и технической документации на предприятиях нефтяной и газовой промышленности.

Моделирование пространственного положения скважины состоит из двух основных этапов – собственно проведение полевых измерений положения оси скважины и камеральная обработка полученной информации.

При проведении инклинометрических исследований скважин с целью оценки ожидаемых погрешностей принимаются во внимание как данные расчетов пространственного положения оси скважины, так и паспортные параметры точности средств измерений, которые не отражают в полной мере всех закономерностей накопления погрешностей при проведении исследований и обработке результатов инклинометрической съемки.

В настоящее время в Российской Федерации действующие нормативные документы устанавливают лишь весьма общие методологические и технические подходы к выполнению работ по инклинометрической съемке скважин, оценке качества полученных результатов измерений, их обработке и последующей оценке погрешностей определения положения скважины [77, 78]. С точки зрения инженерного сопровождения маркшейдерско-геодезических работ это выражается в увеличении затрат при поиске оптимальных, а иногда и применении компромиссных решений совместно с геологическими службами предприятий.

Для повышения надежности существующих методик обработки данных инклинометрических измерений и внедрения полученных результатов в производство и научно-исследовательские работы, определяющих качество, достоверность и затраты на проектирование разработки месторождений и бурения скважин, необходим всесторонний учет невыявленных ранее закономерностей накопления погрешностей.

При этом следует отметить, что точность и качество инклинометрической съемки играют критическую роль при проектировании бурения скважин, особенно в районах плотного бурения, на месторождениях углеводородов со сложными горно-геологическими условиями, скважин со значительной протяжённостью горизонтальных участков.

Степень разработанности темы характеризуется разрозненными исследованиями и научными публикациями, касающимися развития теории методов обработки инклинометрической съемки и области прикладной геодезии применительно к задачам, относящимся к съемке и обработке данных инклинометрических наблюдений в нефтяных скважинах.

В процессе работы над диссертацией использовались труды известных ученых в области теории математической обработки инклинометрической съёмки и оценки качества результатов: Брыня М. Я., Галета В. О., Гриднева С. О., Исаченко В. Х., Ковшова Г. Н., Мазницкого А. С., Могильного С. Г., Мустафина М. Г., Шоломицкого А. А., Миловзорова Г. В., Ekseth R., Torkildsen T., Weston J., Nyrnes E., Wilson H., Wolff C. J. M., Williamson H. S., Brooks, A. и многих других.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является совершенствование методики математической обработки результатов измерений при инклинометрической съёмке для выявления закономерностей накопления ошибок в положении оси скважины.

Основные задачи исследований:

– выполнить обзор научно-технических разработок в области инклинометрии скважин, методических подходов к математической обработке измерений, способов расчета инклинометрии, моделей накопления систематических и случайных погрешностей определения пространственного положения оси скважин, а также определить наиболее перспективные направления совершенствования методов математической обработки результатов измерений в инклинометрии;

– выполнить статистический и корреляционный анализ накопления погрешностей пространственного положения оси скважины при инклинометрической съёмке, на основе которого выявить и оценить закономерности накопления погрешностей;

– исследовать вероятностно-статистические характеристики разностей параметров повторных измерений при инклинометрической съёмке скважины и разработать алгоритм расчета области неопределенности положения оси скважины с учетом коррелированности измерений;

– разработать алгоритм сравнения формы участков оси скважины при повторных измерениях на основе соприкасающихся плоскостей без привязки к системе координат;

– выполнить апробацию усовершенствованной методики на примере обработки данных инклинометрических измерений скважин.

Объект и предмет научного исследования. Объектом исследования являются теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений при обеспечении маркшейдерских работ. *Предмет исследования* – совершенствование методики математической обработки результатов измерений при инклинометрических исследованиях параметров скважин.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1 На основе автокорреляционного анализа выборки повторных инклинометрических измерений множества скважин впервые выявлена значимая статистическая корреляционная зависимость измерений для смежных интервалов оси скважин.

2 Разработан алгоритм расчета определения пространственного положения оси скважины, учитывающий корреляционную зависимость смежных интервалов измерений, который позволяет оценивать область пространственной неопределенности оси и забоя скважины.

3 Предложен алгоритм сравнения положения оси скважины с использованием соприкасающихся плоскостей, который позволяет перейти к анализу формы смежных участков скважины в пространстве без привязки к системам координат.

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в исследовании результатов оценки точности определения пространственного положения оси скважины, благодаря которым доказано наличие ранее не учтенных систематических погрешностей в данных инклинометрических измерений. Усовершенствована методика расчета пространственного положения оси и забоя скважины, учитывающая коэффициент корреляции для смежных интервалов измерений, полученный на основе данных повторных инклинометрических измерений.

Практическая значимость Разработан алгоритм оценки пространственного положения оси скважины, позволяющий в производственных условиях определять соответствие фактического положения требованиям проектной документации, что существенным образом обеспечивает ее безопасную эксплуатацию.

Методология и методы исследования. Методологической базой исследования являются: теория математической обработки геодезических измерений, методы

статистического и сравнительного анализа, методы теории вероятности, метод статистических испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1 Выявленная на основе автокорреляционного анализа разностей из повторных измерений значимая корреляционная зависимость на смежных интервалах скважин позволяет утверждать, что в настоящее время математическая обработка результатов измерений выполняется некорректно.

2 Разработанный алгоритм определения пространственного положения оси скважины, учитывающий корреляционную зависимость измерений смежных интервалов, позволяет повысить точность (на 30–40 %) оценивания области неопределенности положения оси и забоя скважины.

3 Предложенный алгоритм представления участков оси скважины в виде плоской пространственной кривой без привязки к системе координат, позволяет анализировать ее пространственное положение и определять векторы отклонений при повторных инклинометрических измерениях.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика диссертации соответствует следующим областям исследований: 7 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ; 11 – Методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения строительно-монтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-изыскательских, маркшейдерских, геолого-разведочных и лесоустроительных работ; освоения шельфа; монтажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования и других прикладных задач паспорта научной специальности 1.6.22. Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Апробация и одобрение исследований проходили на международных и всероссийских конференциях: Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2023, 2024, 2025 гг., СГУГиТ, г. Новосибирск); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2024» и «Неделя горняка-2025» (Университет МИСИС,

г. Москва), XIX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (2025 г., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург), Всероссийской научно-практической конференции «Рациональное и безопасное недропользование» (2022 г., ЧУ «ЦДПО «Горное образование», г. Сочи).

Результаты использованы при автокорреляционном анализе методом случайных величин данных реальной гироскопической инклинометрии нефтяных скважин на территории Западной Сибири. Реализация исследований осуществлена в виде программы «Анализ инклинометрии» (свидетельство о государственной регистрации номер 2023682091).

Отдельные результаты работы внедрены и используются в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» обучающимися по направлению подготовки специалитета по специальности 21.05.04 Горное дело в лекционном курсе по дисциплине «Маркшейдерское обеспечение при обустройстве и эксплуатации нефтепромыслов».

Публикации по теме диссертации Основные положения и результаты исследований отражены в 7 научных работах, 2 из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 119 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, содержит 4 таблицы, 38 рисунков, 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая

значимость, устанавливается достоверность результатов исследования, а также приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертационной работы выполнен обзор истории развития инклинометрической съемки скважин, современного состояния технологий и нормативной базы в России и мире. Представлен анализ существующих методов проведения инклинометрической съемки скважин и методов обработки полученных измерений, их особенности.

В настоящее время на практике инклинометрическая съемка является единственным способом определения пространственного положения нефтяных и газовых скважин в горном массиве. Результаты инклинометрии применяются для решения широкого спектра задач: контроль параметров проводки скважины в пространстве непосредственно в процессе бурения, контроль перегибов профиля скважины, избегание опасных сближений скважин при проектировании и снижение рисков аварийных пересечений, получение геологических данных для подсчета запасов, определения положения залегания пластов и забоев.

Требования к методическому и техническому обеспечению проведения инклинометрических измерений в скважинах, оценке качества и погрешностей измерений приведены в «Технической инструкции по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах», утвержденной в 2001 г. Однако эта инструкция не отражает современный уровень науки и технологий в области инклинометрической съемки.

За рубежом проблемами точности определения пространственного положения скважин и закономерностей накопления погрешностей занимается Отраслевой международный комитет по точности обследования скважин (ISCWSA). Комитет ISCWSA совместно с Society of Petroleum Engineers (SPE) разрабатывает отраслевые стандарты и публикует научно-практические исследования в области ориентирования и точности проводки скважин.

Для определения влияния различных источников погрешностей на неопределенность положения траектории скважины были разработаны четыре модели, одна из которых создана экспертами ISCWSA и является международным промышлен-

ным стандартом в отрасли. Модель описывает множество источников возникновения погрешностей, их величину и особенности распространения, постоянно дополняется новыми исследованиями и совершенствуется, а эффект от ее использования заключается в значительном снижении неопределенности положения скважины (рисунок 1).

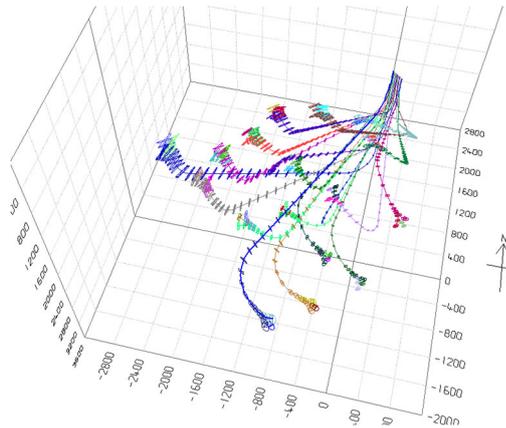


Рисунок 1 – Трехмерное изображение скважин с эллипсами неопределенности

По принципу работы азимутального датчика инклинометрические системы классифицируют на магнитные и гироскопические. При проектировании, измерении профиля скважин непосредственно во время бурения (технология MWD) и в случаях повторных измерений положения скважин магнитными приборами необходим учет изменения магнитного поля Земли. Минимизация погрешностей, связанных с магнитным полем Земли, достигается путем применения современных моделей глобального магнитного поля, моделей локальных магнитных аномалий и аэромагнитной съемки.

Для расчета положения оси скважин существует несколько методов построения инклинограммы на основе данных первичных полевых измерений, среди которых метод минимальной кривизны фактически считается промышленным стандартом и более предпочтителен для использования в современном программном обеспечении.

Таким образом, теоретические аспекты российской науки и практики основаны на научных положениях конца 1980-х гг. и не соответствуют современному

состоянию в отрасли. Зарубежные авторы в вопросах точности ориентации скважин значительно продвинулись вперед.

Для повышения точности бурения скважин и инклинометрических измерений требуется повышение инструментальной точности приборов ориентирования в скважинах. Разработка подходов к повышению надежности инклинометрии скважин является актуальной задачей отрасли.

Как показывает международная практика, современные модели накопления погрешностей и методики обработки инклинометрических данных не учитывают корреляции измерений смежных интервалов при инклинометрических измерениях, а это, в свою очередь, может занижать размер конуса неопределенности положения ствола скважины.

Во втором разделе рассматриваются вопросы накопления погрешностей при инклинометрической съемке скважин на примере анализа выборки из более 500 повторных (магнитных и гироскопических) инклинометрических исследований скважин, основываясь на стандартных представлениях ISCWSA, но с учетом взаимного влияния соседних интервалов измерений.

Проблема определения погрешностей измерений при обработке инклинометрических измерений заключается в оценках «истинного» значения измеряемых величин. На практике положение оси скважины определяется из измерений, отягощенных погрешностями несовершенства инклинометров, непостоянства внешней среды при наблюдениях и влиянием множества неконтролируемых факторов на данные измерений.

Модель накопления ошибок по версии ISCWSA не учитывает все возможные вариации физических явлений, действующих в процессе измерения параметров пространственного положения скважины и опирается на статистические методы анализа и теорию распределения вероятностей. Модель основана на предположении о распределении погрешностей согласно закономерностям нормального гауссового распределения и обеспечивает строгий математический подход к объединению различных источников возникновения погрешностей в область неопределенности пространственного положения скважин.

Конечным результатом моделирования погрешностей измерений является ковариационная матрица, описываемая эллипсоидом в определенной точке ствола скважины и выраженная в виде параметров области неопределенности.

Для описания ковариационной матрицы погрешностей предполагается следующее: в конце каждого j -го интервала измерены величины (l_j – длина интервала; θ_j – зенитный угол; α_j – азимут), которые составляют вектор r_j измерений:

$$r_j = \begin{vmatrix} l_j \\ \theta_j \\ \alpha_j \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Погрешности измерений образуют вектор погрешностей δr_j , составляющие которого являются независимыми случайными величинами без систематического смещения, с известными стандартными отклонениями σ , определяемыми техническими характеристиками инклинометров:

$$\delta r_j = \begin{vmatrix} \delta l_j \\ \delta \theta_j \\ \delta \alpha_j \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Ковариационная матрица, без учета взаимосвязи смежных интервалов K_j (по стандартным представлениям ISCWSA), является одинаковой для всех интервалов, а погрешности измерений в них независимы попарно:

$$K_j = \begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Поинтервально вычисляя приращения координат, находят координаты оси скважины. Вектор координат конца X_k интервала представлен следующим выражением:

$$X_k = f_1(r_1) + \sum_{j=2}^k f_j(r_{j-1}, r_j). \quad (4)$$

Векторные функции приращения координат на интервалах $f_j(r_{j-1}, r_j)$ зависят от метода вычисления координат. Вектор ΔX_k погрешностей координат составит:

$$\Delta X_k = \frac{\partial f_1(r_1)}{\partial r_1} \delta r_1 + \frac{\partial f_2(r_1, r_2)}{\partial r_1} \delta r_1 + \frac{\partial f_2(r_1, r_2)}{\partial r_2} \delta r_2 + \frac{\partial f_3(r_2, r_3)}{\partial r_2} \delta r_2 + \frac{\partial f_3(r_2, r_3)}{\partial r_3} \delta r_3 + \dots + \frac{\partial f_k(r_{k-1}, r_k)}{\partial r_{k-1}} \delta r_{k-1} + \frac{\partial f_k(r_{k-1}, r_k)}{\partial r_k} \delta r_k, \quad (5)$$

где векторные частные производные представляют собой матрицы:

$$\frac{\partial f_j(r_{j-1}, r_j)}{\partial r_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varphi_x}{\partial l_j} & \frac{\partial \varphi_x}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha_j} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial l_j} & \frac{\partial \varphi_y}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \varphi_y}{\partial \alpha_j} \\ \frac{\partial \varphi_z}{\partial l_j} & \frac{\partial \varphi_z}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \varphi_z}{\partial \alpha_j} \end{bmatrix} = F_{j,j}. \quad (6)$$

Таким образом, ковариационная матрица погрешностей точки вычисления координат определяется формулой:

$$M_k = (F_{1,1} + F_{2,1})K_1(F_{1,1} + F_{2,1})^T + (F_{2,2} + F_{3,2})K_2(F_{2,2} + F_{3,2})^T + \dots + (F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1})K_{k-1}(F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1})^T + F_{k,k}K_k F_{k,k}^T. \quad (7)$$

В случае применения метода магнитной инклинометрии азимуты измеряются относительно магнитного меридиана, при этом необходим учет угла магнитного склонения $-\delta_M$ при пересчете координат X_k в геодезическую систему координат по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_k^\Gamma &= x_k \cos \delta_M - y_k \sin \delta_M; \\ y_k^\Gamma &= x_k \sin \delta_M + y_k \cos \delta_M; \\ z_k^\Gamma &= z_k. \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Ковариационная матрица M_k^Γ в геодезической системе с учетом матрицы поворота системы координат магнитного меридиана A имеет вид:

$$M_k^\Gamma = A M_k A^T. \quad (9)$$

Элементы эллипса неопределенности вычисляются в каждой точке оси ствола скважины с учетом связи соседних интервалов измерений по ковариационной матрице погрешностей координат конца интервала M_k^r :

$$M_k^r = \begin{bmatrix} m_x^2 & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{xy} & m_y^2 & m_{yz} \\ m_{xz} & m_{yz} & m_z^2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где m – средние квадратические ошибки определения координат.

В третьем разделе представлена разработанная методика перевычисления координат оси скважины повторных измерений инклинометрии, которая в последующем использована при подготовке данных для автокорреляционного анализа. Проведен отбор скважин, имеющих многократные гироскопические измерения инклинометрии. Выполнен статистический анализ отклонений и разработан механизм фильтрации данных измерений. Исследованы вероятностные статистические характеристики параметров выборки скважин и предложен новый метод расчета области неопределенности пространственного положения с учетом выявленных статистических свойств погрешностей измерений.

Сущность предлагаемой методики сравнения значений координат заключается в переходе к анализу формы участков скважины в пространстве без привязки к системам координат. Такой способ представления оси скважины позволяет однозначно определять проекции вектора отклонения. Ось скважины рассматривается как плоская пространственная кривая в некоторой области вокруг точки сравнения, которую можно построить по трем точкам из двух соседних интервалов. Участок траектории ствола состоит из двух соседних интервалов (векторы r_i, r_{i+1}) и образует соприкасающуюся плоскость с центром O к оси скважины (рисунок 2).

В качестве исходных данных для анализа использованы повторные гироскопические измерения по 198 скважинам на территории Западной Сибири, где условия бурения и проведения инклинометрии скважин идентичны, а сами измерения являются равноточными ввиду использования аналогичных приборов.

Вектор r_{Δ_i} вычисляется из разностей координат по значениям двух измерений скважины, где $\bar{e}_x, \bar{e}_y, \bar{e}_z$ – единичные векторы системы координат $iXYZ$.

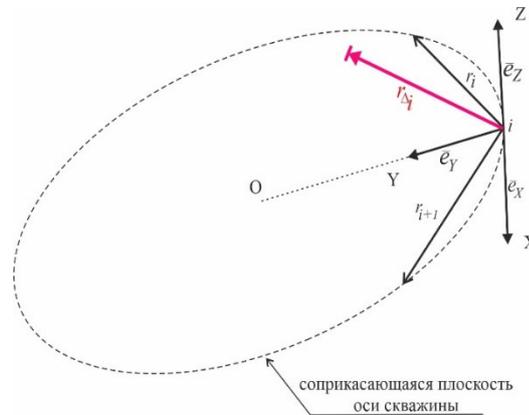


Рисунок 2 – Схема сравнения координат скважины на участке из двух соседних интервалов

Отклонения координат вычисляются по направлению касательной к оси скважины в точке сравнения двух измерений Δ_x , в плоскости оси скважины по направлению к центру Δ_y и по нормали к плоскости оси скважины Δ_z .

Совокупность отклонений в угловых величинах измерений рассматривается как случайный процесс. Вычисленные отклонения для разных скважин объединяются в группы по глубинам интервалов. Значения в группе анализируются как независимые однородные случайные величины в реализации случайного процесса. Для каждой группы рассчитаны средние и стандартные отклонения случайных составляющих.

В вычисленных отклонениях осей скважин из повторной инклинометрии систематическая составляющая превышает случайную. Влияние погрешностей измерения зенитных углов на порядок меньше, чем влияние погрешностей измерения азимутов. Встает задача разработки способа фильтрации в выборке от некорректных измерений скважин, в качестве которого используется уравнение тренда изменения разностей азимутов.

На рисунке 3 слева продемонстрированы графики, характерные для всей выборки из 198 скважин, слева – графики с применением тренда разностей азимутов,

величина которого была определена опытным путем в 20° . Отклонения положения точек сравнения в плоскости скважин существенные. Использование фильтра позволило на 30 % сократить количество скважин в выборке. Повторная обработка (рисунок 3 справа) скважин показывает, что исключение из выборки ошибочных данных в измерениях уменьшает значения параметров.

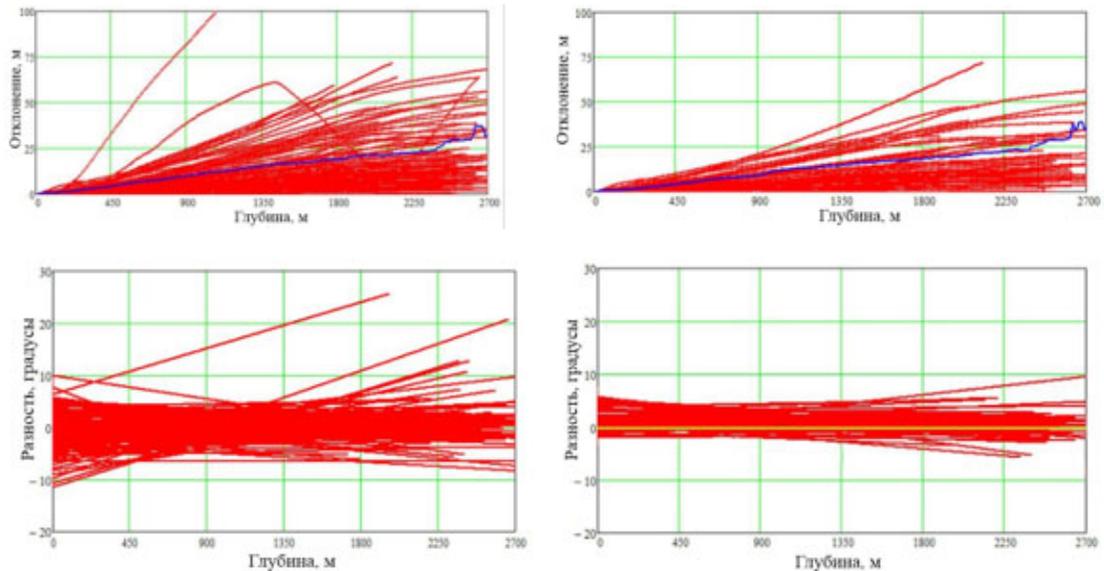


Рисунок 3 – Сравнение координат скважины на участке из двух соседних интервалов: а) линейное смещение забоя 2-го измерения; б) графики линий тренда разностей азимутов

На рисунке 4 показаны средние значения отклонений (M_x , M_y , M_z и ML) и стандартные отклонения случайных составляющих (S_x , S_y , S_z и SL), вычисленные по предложенной методике. График M_m – ожидаемая величина линейного смещения забоя, определенная согласно стандартной инструкции и паспортным параметрам точности пространственных измерений в скважинах при предположении о независимости измерений в соседних интервалах.

Линейные смещения координат скважин в теории в два раза меньше, чем на практике, а теория накопления погрешностей пространственного положения скважин, изложенная в инструкции, противоречит данным реальных измерений скважин, и, возможно, не учитывает влияния неких факторов.

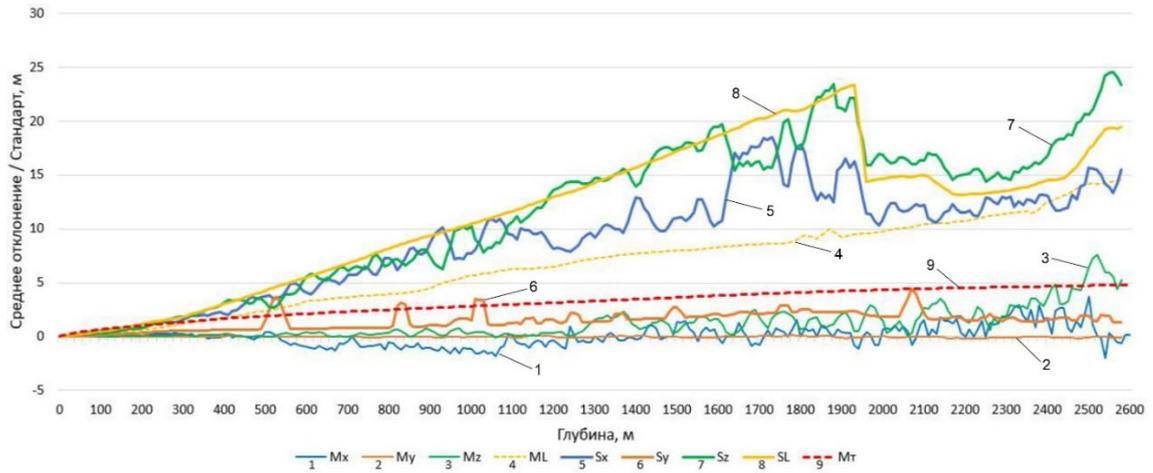
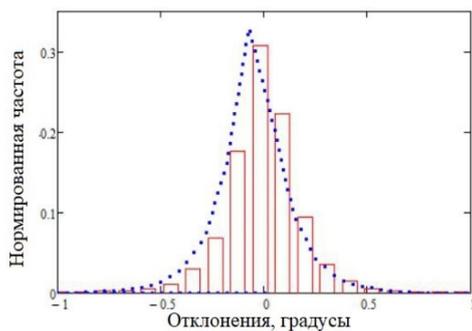
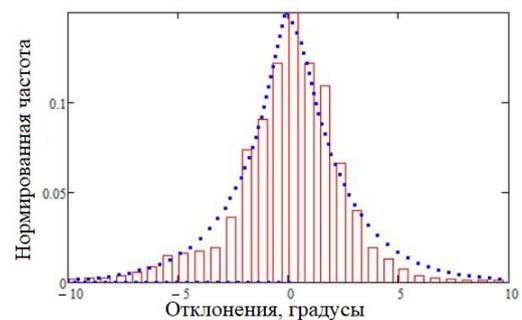


Рисунок 4 – Графики средних квадратических отклонений и стандартов случайных составляющих

Случайные погрешности угловых величин в данных инклинометрии обусловлены совокупностью действия разнообразных факторов и описываются одним из законов теории предельных распределений. Гистограммы распределения разностей (рисунок 5), измеренных при инклинометрии параметров, подобны экспоненциальному распределению Лапласа, который можно использовать в качестве рабочей гипотезы и исследовать вероятностные свойства. Пунктирные кривые аппроксимируют гистограммы функцией плотности вероятностей $g(x)$.



$$\lambda=0,13 \quad \theta=0$$



$$\lambda=1,7 \quad \theta=0,8$$

Рисунок 5 – Гистограммы разностей: а) зенитных углов; б) азимутов

Использование медианной оценки при выводе значения средних квадратических ошибок позволяет избежать влияния случайных всплесков, полученных в выборке после фильтрации по тренду разностей азимутов, средние квадратические ошибки составляют:

$$\begin{aligned} \text{зенитные углы} - \quad m_z &= \frac{M_{zenit}}{\sqrt{2}} = 0,27^\circ ; \\ \text{азимуты} - \quad m_\alpha &= \frac{M_{azimut}}{\sqrt{2}} = 2,99^\circ . \end{aligned}$$

Стационарный случайный процесс (повторная инклинометрия) характеризуется нормированной корреляционной функцией разностей угловых величин $R(\tau)$, которую можно определить по δ_i отклонениям разностей от линии тренда:

$$R(\tau) = \frac{1}{N_\tau} \sum_l^{N_\tau} \frac{\delta_i \delta_{i+\tau}}{\sigma^2} \quad \{i \in 1..n\}, \quad (11)$$

где N_τ – число пар разностей, между которыми расположено τ интервалов;

n – количество интервалов измерений оси;

σ^2 – дисперсия разностей из формулы $\sigma^2 = [\delta\delta] / n$.

Некоторые скважины (рисунок 6) имеют тренд разностей, значительно отклоняющийся от горизонтали, что может говорить о систематических погрешностях в одном из измерений, которые не были учтены при обработке данных сырой инклинометрии по методике комитета ISCWSA.

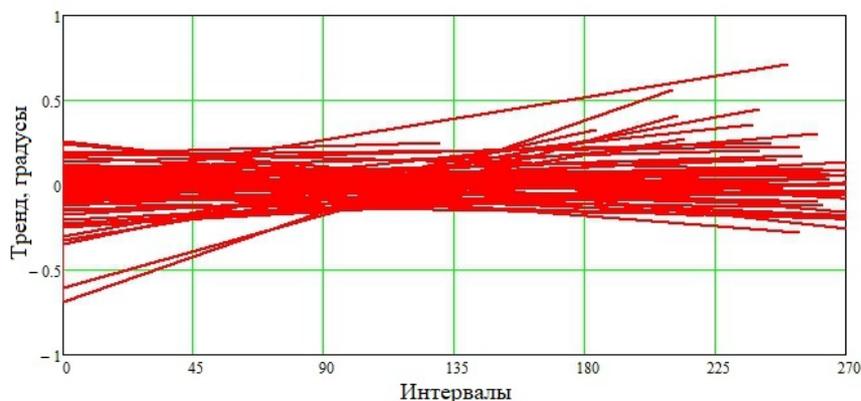


Рисунок 6 – Графики линейного тренда разностей зенитных углов

Графики корреляционных функций скважин случайны, по мере возрастания τ стремятся к нулю. Однако общая тенденция графиков разных скважин схожая (рисунок 7), ее отражает линия медианного среднего (синий цвет). Случайные погрешности угловых величин измерений в смежных интервалах имеют коэффициент корреляции около $+0,5$ и более.

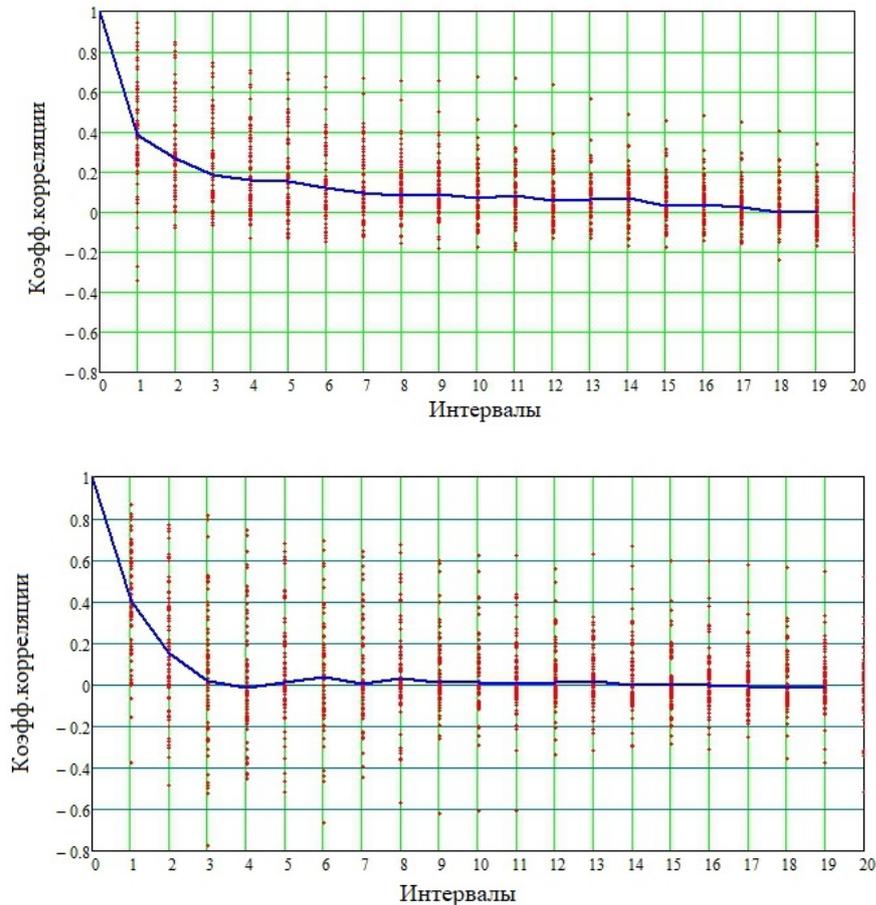


Рисунок 7 – Графики корреляционных функций выборки скважин (отдельные скважины – точки красного цвета; медианное среднее – синий):

а) зенитные углы; б) азимуты

С учетом установленной выше корреляции угловых измерений на концах соседних интервалов инклинометрии ковариационная матрица $M_{j,j+1}$ векторов погрешностей измерений δr_j и δr_{j+1} будет иметь вид:

$$M_{j,j+1} = \begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 & 0 & \varepsilon_\theta \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 & 0 & 0 & \varepsilon_\alpha \sigma_\alpha^2 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\theta \sigma_\theta^2 & 0 & 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\alpha \sigma_\alpha^2 & 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где ε_θ и ε_α – коэффициенты корреляции погрешностей измеренных значений на концах интервалов, соответственно зенитного угла θ и азимута α .

Формулу (6) представим в следующем виде:

$$\Delta X_k = |F_{1,l} + F_{2,l} + F_{2,2} + F_{3,2} \cdots + F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1} + F_{k,k}| \Delta_r, \quad (13)$$

где Δ_r – общий вектор погрешностей измеренных величин.

Таким образом, $M_{\Delta X_k}$ – ковариационная матрица погрешностей координат k -й точки оси скважины при гироскопических измерениях представлена формулой:

$$M_{\Delta X_k} = F \cdot M \cdot F^T, \quad (14)$$

где F – блочная матрица-строка в формуле (13).

Медианные значения предельных разностей координат двух измерений, приведенные из данных фактической инклинометрии, описывает график 1 (рисунок 8). График 2 характеризует ожидаемые предельные значения разностей координат двух измерений согласно инструкции без учета корреляции измерений, 3 – с учетом коэффициента корреляции $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\theta = 0,5$. Корреляционная зависимость на концах соседних интервалов измерений частично объясняет различия между ожидаемыми и фактическими отклонениями в координатах.

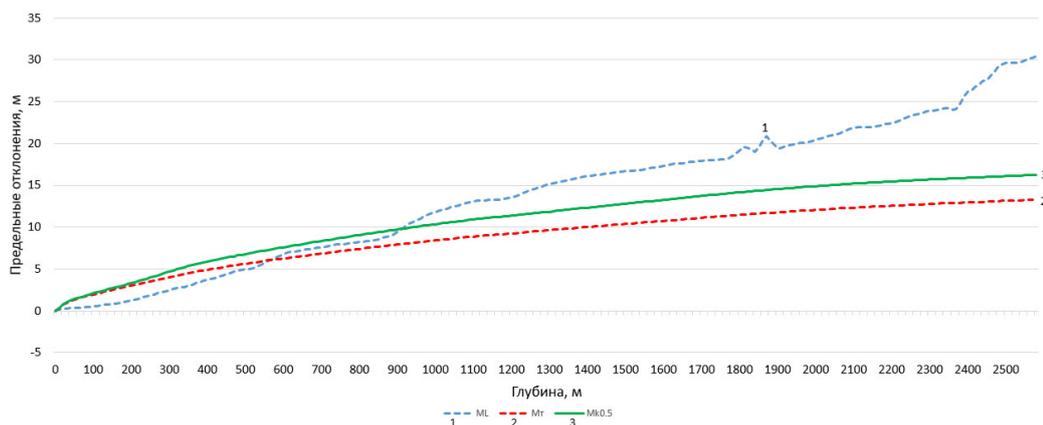


Рисунок 8 – Графики значений неопределенности положения скважины

В четвертом разделе описана практическая реализация предложенного метода и алгоритмов обработки и статистического анализа данных повторной инклинометрии в виде программы «Анализ инклинометрии». Приведена схема базы данных инклинометрических замеров, описана интерфейсная часть программы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований повторной инклинометрии скважин автором получены следующие результаты и выводы:

- выполнен аналитический обзор научно-технических разработок в области инклинометрии скважин, методических подходов к математической обработке результатов измерений, способов расчета инклинометрии, моделей накопления систематических и случайных погрешностей определения пространственного положения оси скважин, что позволило определить существующую проблематику и сформулировать цель и задачи диссертационного исследования;

- выполнен статистический и корреляционный анализ накопления погрешностей пространственного положения оси скважины при инклинометрической съемке, на основе которого выявлены закономерности накопления погрешностей, позволяющие утверждать, что в настоящее время математическая обработка результатов измерений выполняется некорректно, и существующая теория накопления погрешностей инклинометрической съемки и методика расчета ожидаемых погрешностей определения положения скважины не соответствует практическим результатам измерений более чем в два раза;

– исследованы вероятностно-статистические характеристики разностей измеряемых параметров скважины и разработан алгоритм расчета области неопределенности положения оси скважины с учетом коррелированности измерений смежных интервалов и выявлено, что учет корреляции увеличивает область неопределенности на 30–40 % по сравнению со стандартной, применяемой в настоящее время методикой расчета неопределенности;

– предложен алгоритм сравнения положения оси скважины с использованием соприкасающихся плоскостей, который позволяет анализировать форму участков скважины в пространстве без привязки к системам координат;

– разработано программное обеспечение и выполнена апробация усовершенствованной методики на примере скважин нефтегазовой отрасли Западной Сибири, которое позволяет автоматизированно обрабатывать инклинометрические измерения и точнее оценивать область неопределенности положения скважины, что повышает качество оценки бурения и безопасность эксплуатации скважин на нефтяных и газовых месторождениях.

Результаты исследования рекомендуются к использованию при выполнении расчета области неопределенности положения оси и забоя скважины с учетом корреляции измерений смежных интервалов. Предлагается дополнить нормативную документацию предложенной методикой расчета области неопределенности положения оси и забоя скважины. Способ сравнения разностей координат при повторных измерениях может быть включен в программу контроля качества маркшейдерских данных предприятия при проведении инклинометрической съёмки скважин, так как требования, предъявляемые к инклинометрическим измерениям и их обработке, приведенные в российской нормативной документации, не отличаются системностью и не соответствуют современному положению в отрасли. А в вопросах теоретического обоснования надежности и точности определения пространственного положения скважин эти требования основаны на зарубежных исследованиях и подходах, где современные модели накопления погрешностей и методики обработки данных инклинометрии не учитывают корреляции измерений граничащих интервалов

Описанная методика фильтрации недостоверных измерений на основе тренда разностей азимутов может быть полезна для маркшейдерских и геофизических служб предприятий при оценке качества повторной инклинометрической съемки скважин. Уточнение полученных закономерностей требует детального статистического анализа производственных данных с учетом типов скважин и применяемых инклинометров на максимально возможном числе многократных измерений. Кроме того, при моделировании области неопределенности пространственного положения скважин в горной среде необходим учет всевозможных физических факторов, влияющих на размерность эллипсоидов неопределенности.

Перспективы дальнейших исследований в представленной тематике обусловлены тем, что корреляция соседних интервалов измерений не в полной мере объясняет отклонения ожидаемых теоретических значений от фактических данных реальной инклинометрии и требует дальнейшего поиска и учета закономерностей, влияющих на процесс проведения и обработку инклинометрических измерений. Полученные в ходе исследования результаты свидетельствуют о необходимости продолжить исследования для поиска неучтенных систематических погрешностей измерений, детального статистического и корреляционного анализа с учетом сложности профилей скважин и используемых для проведения инклинометрии приборов. В то же время размеры области допуска попадания забоя скважины в соответствии с проектным положением для различных горно-геологических районов и технологических условий разработки месторождений необходимо определять для конкретного месторождения или группы месторождений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Могильный, С. Г. Статистический анализ повторной инклинометрии скважин / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. В. Дверницкая – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 1. – С. 6–15. – DOI 10.33764/24111759-2025-30-1-6-15.

2 Могильный, С. Г. Исследование накопления случайных ошибок при инклинометрии скважин / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. В. Дверницкая – Текст

: непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 2. – С. 13–23. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-2-13-23.

3 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682091 Российская Федерация. Анализ инклинометрии: № 2023681656: дата поступления 23.10.2023: дата публикации: 23.10.2023 / Дверницкая Е. В., Шоломицкий А. А. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (RU). – Текст: непосредственный.

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

5 Дверницкая, Е. В. Анализ траектории скважин по данным нескольких измерений / Е. В. Дверницкая. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс, 17–19 мая 2023 г., Но-восибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. № 1. – С. 73–77. – DOI 10.33764/2618-981X-2023-1-1-73-77.

6 Дверницкая, Е. В. Практические аспекты коррекции инклинометрии по данным повторных измерений / Е. В. Дверницкая. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XX Международный научный конгресс, 15–17 мая 2024 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1: Международная научная конференция «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2024. – С. 66–70. – DOI 10.33764/2618-981X-2024-1-66-70.

7 Дверницкая, Е. В. Новые подходы к анализу данных повторных измерений инклинометрии / Е. В. Дверницкая. – Текст: непосредственный // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2025. – Том 12, № 1. – С. 72–77.