

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Дверницкая Екатерина Валерьевна



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

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Шоломицкий Андрей Аркадьевич

Новосибирск – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Обзор методов инклинометрической съёмки скважин	10
1.1 История развития и современное состояние	10
1.2 Методы съёмки инклинометрии скважин	18
1.3 Методы обработки инклинометрии	23
1.4 Неопределенность геопространственного положения скважины.....	27
1.5 Выводы по разделу 1	33
2 НАКОПЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ СКВАЖИН	35
2.1 Основные теоретические положения	35
2.2 Модель ошибок ISCWSA	40
2.3 Накопление инструментальных ошибок	44
2.4 Оценка допустимых отклонений ствола скважины от проектного положения профиля	52
2.5 Выводы по разделу 2	57
3 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВТОРНОЙ ИНКЛИНОМЕТРИИ.....	59
3.1 Предварительный анализ данных повторной инклинометрии	59
3.2 Способ сравнения координат оси скважины при повторных измерениях.....	61
3.3 Механизм фильтрации измерений	65
3.4 Статистический анализ отклонений.....	68
3.5 Выводы по разделу 3	79
4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ.....	83
4.1 Алгоритм программы «Анализ инклинометрии».....	84
4.2 Импорт исходных данных.....	86
4.3 Схема базы данных	88
4.4 Интерфейс программы.....	90
4.5 Выводы по разделу 4	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	99

ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Таблица величин вероятностей PSk	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Пример реализации алгоритма автокорреляционного анализа скважины в программе «Анализ инклинометрии».....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Файл настроек программы «Анализ инклинометрии».....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) Вкладка «Отчет»	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) Трехмерная визуализация скважин кустовой площадки.....	118

ВВЕДЕНИЕ

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.

1 ОБЗОР МЕТОДОВ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ СКВАЖИН

1.1 История развития и современное состояние

В настоящее время на практике инклинометрическая съёмка является единственным способом определения пространственного положения нефтяных и газовых скважин в горном массиве. Результаты инклинометрии применяются для решения широкого спектра задач. К ним относятся: контроль параметров проводки скважины в пространстве непосредственно в процессе бурения, контроль перегибов профиля скважины, предотвращение опасных сближений скважин при проектировании и снижение рисков аварийных пересечений, получение геологических данных для подсчета запасов, определения положения залегания пластов и забоев [77]; а также создание трехмерных геологических моделей месторождений [63] и оптимизация затрат при планировании профилей скважин кустовым способом разработки зрелых месторождений [56].

Требования к методическому и техническому обеспечению проведения инклинометрических измерений в скважинах, оценке качества и погрешностей измерений приведены в «Инструкции по проведению инклинометрических исследований в скважинах», утверждённой в 1989 г. [28], которая являлась дополнением к «Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах», утверждённой в 1984 г. [73]. Однако эта инструкция не отражает современный уровень науки и технологий в области инклинометрической съёмки и была отменена в 2001 г. Взамен введена в действие «Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах» [77], которая во многом повторяет предыдущую версию, а требования к методическому обеспечению и обработке результатов измерений отданы на откуп программному обеспечению и должны работать с координатами оси скважины; абсолютными отметками глубин; приращениями длины ствола; смещением забоя скважины относительно устья; характеристиками неопределенности координат [77]. Теоретические аспекты инструкции 1989 г. [28] содержат в себе больше ин-

формации, чем в инструкции 2001 г. [77]. В инструкции [77] рекомендуется к использованию метод средних углов, а в случаях значительной интенсивности искривления скважины более точные методы расчета; со стороны метрологического обеспечения инклинометров поверочные мероприятия заменены на калибровку; приведены рекомендации к оценке точности пространственного определения оси скважины. Также в новой версии инструкции добавлены рекомендации повторных гироскопических измерений для проверки магнитной инклинометрии, рекомендации для компенсации дрейфа гироскопических инклинометров и учтены дополнительные виды систематических погрешностей, вызванные изменением напряжения питания и изменением температуры внешней среды. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации [78] устанавливает некоторые подходы к инклинометрии скважин в части маркшейдерско-геодезического обеспечения строительства скважин.

За рубежом вопросами точности определения пространственного положения стволов скважин и закономерностей накопления погрешностей занимается Отраслевой международный комитет по точности обследования скважин (ISCWSA) [88]. ISCWSA совместно с Society of Petroleum Engineers (SPE) [102] на основе многочисленных производственных данных разрабатывает промышленные стандарты моделей ошибок [90] и публикует научные-практические исследования [91] в области ориентирования и точности проводки скважин. В группу экспертов комитета ISCWSA входят представители ведущих добывающих и сервисных компаний мира. Теоретическая основа подходов, представленных ISCWSA, учитывает большее количество глобальных и систематических погрешностей при проведении и обработке результатов инклинометрической съемки, чем инструкция [28].

Многие российские компании устанавливают собственные требования к проектированию и контролю за траекториями скважин с наклонно-направленными профилями и профилями скважин с горизонтальными окончаниями, создавая на основе инструкции [77] и исследований, представленных ISCWSA и SPE, внутренние корпоративные документы и стандарты [45, 74].

Необходимость определения пространственного положения скважин при добыче нефти возникла в начале XX в. в США и была обусловлена многочисленными спорами о нарушении границ арендованных участков земли. В начале истории освоения нефтяных месторождений и бурения скважины бурились вертикально относительно поверхности земли, а отход от вертикали рассматривался как дефект. Первые исследования кривизны нефтяных скважин в горном пространстве были скорее искусством, чем технологией [90].

В 1928 г. Александр Андерсон опубликовал исследование на основе данных по наклону, полученных из пробуренных скважин, которое и обратило внимание отрасли на необходимость изучения положения осей скважин в пространстве. В результате этого исследования в 1929 г. компанией Sperry-Sun Well Surveying Company был спроектирован и разработан первый гироскопический геодезический прибор, который определял угол и направление наклона оси скважины. Прибор включал в себя гирокомпас, наложенный на пузырьковый уровень с постоянной записью результатов измерений, полученной с помощью камеры [90].

Постепенно технологии освоения месторождений нефти перешли от бурения вертикальных скважин к наклонно-направленному бурению, а затем и созданию скважин с протяженными горизонтальными участками с целью повышения эффективности разработки месторождений. Вместе с усложнением технологий разработки месторождений углеводородов активно развивались и претерпевали серьезные изменения технологии производства инструментов для проведения инклинометрической съемки, что было обусловлено переходом к бурению на больших глубинах, с большим изменением азимута и вовлечением в эксплуатацию месторождений на высоких широтах. Оптимизируя затраты на строительство скважин, производители инструментов сокращали диаметры гироскопических инклинометров, увеличивали скорости их вращения. Появились технологии, обеспечивающие передачу данных об ориентировании приборов на поверхность земли по проводной линии связи.

В конце 1970-х гг. на зарубежном рынке начали появляться системы MWD (Measurements While Drilling – измерения во время бурения) или забойные телеметрические системы, предназначенные для контроля за траекторией ствола наклонно-направленной скважины непосредственно в момент её бурения, разработанные фирмами Scientific Drilling и Sperry Sun [33].

Начиная с 1950-х гг. в разных уголках СССР активно начинают разрабатываться приборы и технологии для инклинометрической съемки в скважинах. В 60–70-е гг. несколькими научно-исследовательским институтами и конструкторскими предприятиями разрабатывались и совершенствовались конструкции и технологии для забойных телеметрических систем с беспроводным каналом связи, например, Уфимским авиационным институтом, который создавал измерительные датчики с повышенной точностью, вибро- и ударопрочностью. Подробные теоретические и экспериментальные исследования инструментальных погрешностей первичных датчиков и конструкций инклинометров, проводимых в 1994–1998 гг. в Институте механики УНЦ РАН, позволили разработать технологичные малогабаритные инклинометры с неподвижными феррозондами и акселерометрами [33].

Современное развитие технологий гироскопической съемки в России началось в 1990-х гг. и сопровождалось переходом к повсеместному использованию наклонно-направленного бурения. В настоящее время на нефтегазовых промыслах нашей страны широко применяется отечественный гириноклинометр ИГН 73-100/80 [2], работающий в режиме непрерывного измерения азимута во время движения, производства НПО «Темп-Авиа» (г. Арзамас).

Технологии направленного бурения скважин получили широчайшее распространение по всему миру и в настоящее время используются множеством нефтесервисных компаний для контроля ориентации ствола скважины в подземном пространстве, контроля перегибов профиля и снижения рисков опасных сближений и пересечений с другими скважинами.

Во второй половине XX в. было разработано несколько дополнительных технологий, улучшающих гироскопические системы: вибрационные гироскопы, гироскопы с полусферическим резонатором, кварцевые датчики скорости, волоконно-

оптические гироскопы, лазерные гироскопы, МЭМС-гироскопы (микроэлектромеханические системы). В настоящее время считается, что наиболее перспективными для нефтяной промышленности являются лазерные и МЭМС-приборы. Однако текущие возможности таких гироскопов пока не соответствуют желаемым характеристикам, но имеют потенциал в будущем [90].

Начиная с 1970-х гг. наряду с улучшением инструментальных характеристик и внедрением различных конструктивных решений при производстве инклинометров начинают разрабатываться методы повышения точности инклинометрической съёмки при обработке данных полевых измерений, появляются модели ошибок измерений, создаются модели неопределенности геометрического положения оси скважины.

Стоит отметить, что подрядные геофизические организации используют различные вариации модели неопределенности, предложенной ISCWSA, а также разнообразные математические модели для определения магнитного поля Земли и могут вносить в методику расчета области неопределенности положения скважины свои коррективы.

При расчете области неопределенности при использовании инклинометрии скважин, выполненной магнитометрической съёмкой и в процессе навигации скважин во время бурения, особое влияние имеет точность определения составляющих магнитного поля Земли. Для коррекции влияния колебаний магнитного поля Земли и сокращения размеров эллипсов погрешностей скважин буровыми подрядчиками используются коммерческие статистические геомагнитные модели высокого разрешения, объединяющие в себе информацию о значениях магнитного поля Земли с наземных обсерваторий, магнитных спутниковых наблюдений [10, 13, 48]. Большинство нефте-сервисных компаний, занимающихся бурением и геофизическими исследованиями скважин в северных регионах РФ, до недавнего времени использовали ежегодно обновляемую коммерческую Глобальную геологическую модель Британской геологической службы (BGGM). Однако в 2022 г. с Российской Федерацией прекратился обмен данным с российскими геомагнитными обсерваториями для глобальных моделей высокого разрешения BGGM (BGS Global Geomagnetic

Model) [88] и HDGM (High Definition Geomagnetic Model – Геомагнитная модель высокого разрешения) [85], которые в настоящее время стремительно теряют свою актуальность на территории РФ. В настоящее время общероссийская модель общего магнитного поля, применимая для целей расчета областей неопределенности скважин, находится в стадии разработки. В связи с этим российскими сервисными компаниями на данный момент могут быть использованы только данные моделей низкого разрешения открытого доступа IGRF (International Geomagnetic Reference Field – Международное геомагнитное эталонное поле) [88], WMM (World Magnetic Model – Мировая магнитная модель) [47] и ее расширенная версия EMM (Enhanced Magnetic Model – Усовершенствованная магнитная модель) [82], в которых размеры эллипсов неопределенности значительно увеличены в сравнении с расчетами по моделям высокого разрешения. Это в свою очередь снижает точность позиционирования и навигации по геомагнитному полю, увеличивает риск пересечения скважин в высоких широтах и может привести к аварийным ситуациям. Справедливо отметить, что в условиях отсутствия качественной геомагнитной информации некоторые компании разрабатывают локальные уточненные модели магнитного поля на основе аэромагнитных съемок для одиночных месторождения или групп месторождений.

При определении траектории скважины и расчетах области неопределенности скважины имеет значение протяженность интервалов между точками измерений – чем меньше интервалы между точками наблюдений при инклинометрической съемке скважин, тем точнее определение оси. Несмотря на то, что вертикальная разрешающая способность метода составит 10 см [60], адекватными считаются интервалы, протяженностью 10–30 м. Интервалы менее 10 м хоть и создают избыточность в измерениях, но дают более точное представление о положении скважины. Интервалы свыше 30 м, а в случаях значительного изменения кривизны профиля скважины – более 14 м [25], отрицательно сказываются на расчете конусов погрешностей.

Важно отметить, что стандартные отраслевые модели систематических погрешностей традиционно не учитывают влияние длины интервала между точками

измерений инклинометрии. Очень трудно количественно определить, каким может быть влияние отсутствующих данных, поэтому модели ошибок опубликуются с оговоркой, что для точного отражения геометрии траектории скважины должны быть проведены соответствующие исследования [90].

В некоторых российских нефтегазодобывающих и геофизических компаниях при наличии у одной скважины нескольких измерений с различной глубиной по стволу прибегают к формированию совмещенной траектории скважины, т. е. производят «сшивку» результатов измерения гироскопической и магнитной инклинометрии (рисунок 1) [38, 62, 46]. Но эти предложения не имеют каких-либо научно обоснованных доводов для улучшения достоверности данных инклинометрии [22]. Вместе с тем в зарубежной литературе [90] встречается опыт создания комбинированной траектории по данным нескольких измерений, с учетом весовых коэффициентов точности инклинометров. При этом сообщается, что получившаяся таким образом синтетическая траектория наилучшим образом описывает совокупность всех исходных данных, снижая погрешности определения положения скважины до 30–60 см на 1 000 м глубины. Стандартное значение погрешности определения координат на 1 000 м глубины принимается ± 2 м [90].

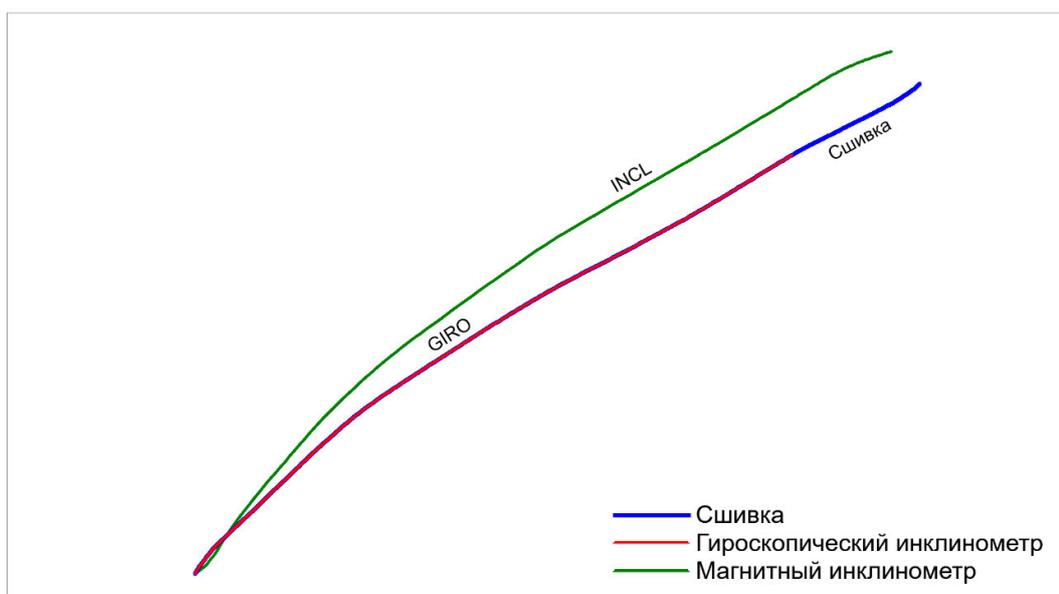


Рисунок 1– Совмещение измерений инклинометрии

С целью автоматизации обработки и хранения, поступающей в маркшейдерскую службу предприятия информации о пространственном положении скважин, для построения траекторий скважин, выполнения расчетов, анализа качества измерений и планирования строительства скважин многие компании внедряют и используют геоинформационные системы для ведения базы пространственных данных инклинометрических замеров.

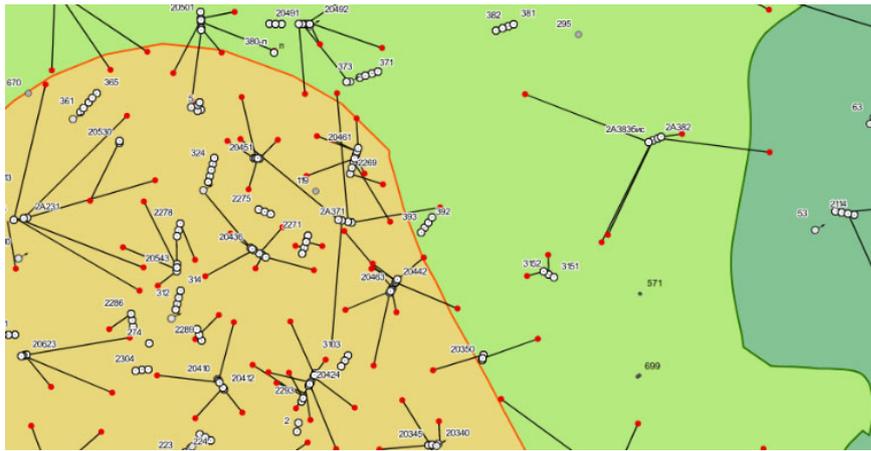


Рисунок 2 – Пример визуализации инклинометрии [64]

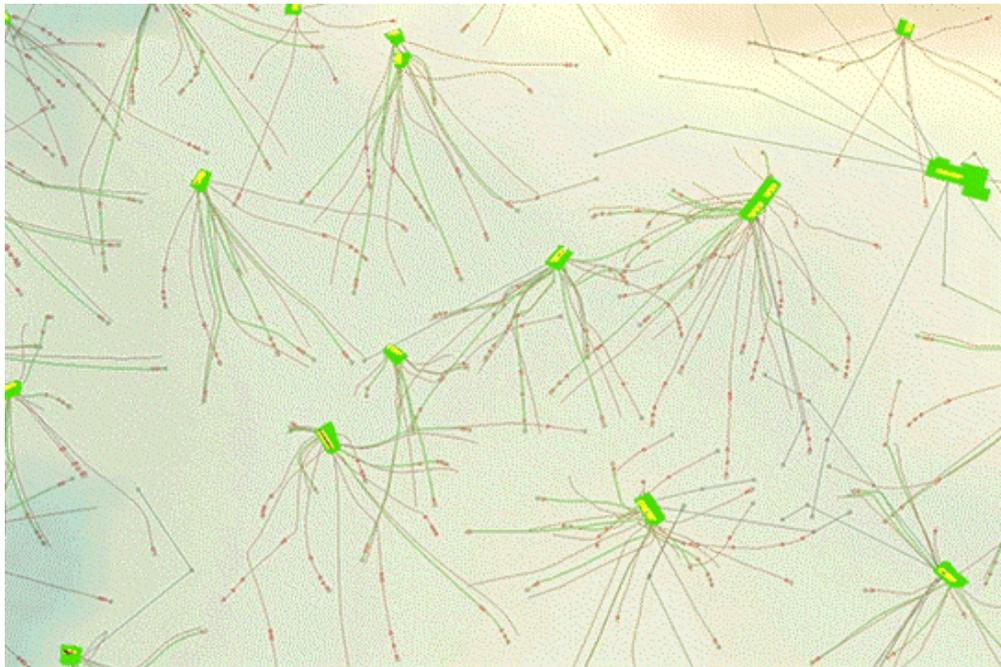


Рисунок 3 – Пример 3D визуализации инклинометрии [108]

В настоящее время на российском рынке представлено несколько программных продуктов для обработки и визуализации инклинометрии (рисунки 2, 3) [52, 64, 108]. Приведенные примеры основаны на картографической визуализации инклинометрии и стандартном наборе функций для ее анализа, без учета статистического подхода к обработке данных инклинометрии. Нефтяные компании часто самостоятельно разрабатывают корпоративные приложения для обработки инклинометрии с необходимым набором функционала.

В опубликованных исследованиях последних лет поднимаются вопросы надежности определения оси скважины при инклинометрии [86, 106], исследования точности магнитной инклинометрии [83, 84, 94, 110], моделирования геомагнитного поля Земли [105], исследования влияния вариаций геомагнитного поля на исследования инклинометрии [9]. Большое внимание уделяется исследованиям точности при гироскопическом ориентировании [30, 87, 98, 107], во время измерений забойными телеметрическими системами [31], при бурении горизонтальных скважин [1, 68]; повышению точностных характеристик инклинометрических систем [53]. Также рассматриваются вопросы косвенного определения погрешностей данных инклинометрии при помощи геологического моделирования пластов и месторождений углеводородов [4, 63]. Обращает на себя внимание развитие новых технологий, использующих системы подземного позиционирования в горных выработках [67], однако возможности таких систем на текущем уровне развития не отвечают запросам нефтегазовой отрасли.

1.2 Методы съёмки инклинометрии скважин

Инклинометр – прибор, предназначенный для измерения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли [18], позволяет измерять величину угла наклона и направление (азимут). Инклинометрические системы широко применяют в горном деле для контроля за развитием деформационных процессов подземных коммуникаций [44] и в нефтегазовой отрасли с целью измерения и контроля параметров навигации скважины в горном массиве. В соответствии

с физическими принципами действия, условиями эксплуатации, возможностью автономной работы, каналами связи устье-забой, числом измеряемых параметров, режимами регистрации измерений и поставленными задачами инклинометрические системы сгруппированы в несколько классификаций [29, 33, 42].

В зависимости от физических принципов работы азимутального датчика инклинометры основаны на использовании гироскопического эффекта или магнитного поля Земли. Принцип работы датчика азимута определяет условия эксплуатации прибора, подходы для дальнейшей обработки и точность получаемых материалов инклинометрических измерений.

В процессе инклинометрических наблюдений измеряют три величины: вертикальный угол, азимутальный угол (истинный или магнитный) и глубину по стволу скважины. Остальные параметры пространственного положения скважин рассчитывают на основе значений измеренных величин. Зенитный угол, измеряемый в градусах, соответствует значению отклонения оси инклинометра от линии истинной вертикали, 0° – направление по истинной вертикали, 90° – горизонтальное направление. Азимутальный угол представляется как горизонтальная составляющая траектории оси инклинометрической системы, определяемая относительно известного направления на истинный, магнитный или картографический север, принятого за начало отсчёта (от 0 до 360°). Измеряемая глубина по стволу соответствует фактической глубине пробуренной скважины вдоль направления оси скважины от поверхности до пересечения с геологическими пластами, вскрываемыми скважиной, или до глубины забоя [58].

Перечень используемых инклинометрических систем на текущем уровне развития технологий позиционирования скважин весьма обширен, некоторые из них: ИГН-73-100/80 [43], ИОН-1 и ИОН-2 [60], ИМА-42, OnTrak [80], SlimPulse [101]. Обобщенную схему инклинометрической системы можно представить следующим образом: скважинный модуль, наземное устройство для обработки измерений и канал связи. Скважинный модуль содержит датчики измеряемых параметров – маг-

нитометры, акселерометры, гироскопы; промежуточный преобразователь и передатчик сигнала [29]. В забойных телесистемах дополнительно предусмотрен контроль угла установки отклонителя бурового инструмента [59].

Магнитные инклинометрические системы основаны на использовании магнитного поля Земли для определения направления на магнитный север. С целью исключения влияния стальных конструкций бурового инструмента магнитометрические модули применяются в открытом (необсаженном) стволе или в немагнитной колонне.

Для определения зенитного угла в конструкции любой инклинометрической системы предусмотрены гравитационные датчики, позволяющие определять силу гравитационного поля Земли вдоль своей оси, т. е. направление вектора силы тяжести [29]. Наиболее широкое распространение получили датчики измерения силы гравитации путем определения линейных ускорений – акселерометры. Погрешность измерения гравитационных составляющих кратно влияет на погрешность расчета азимутального угла [57].

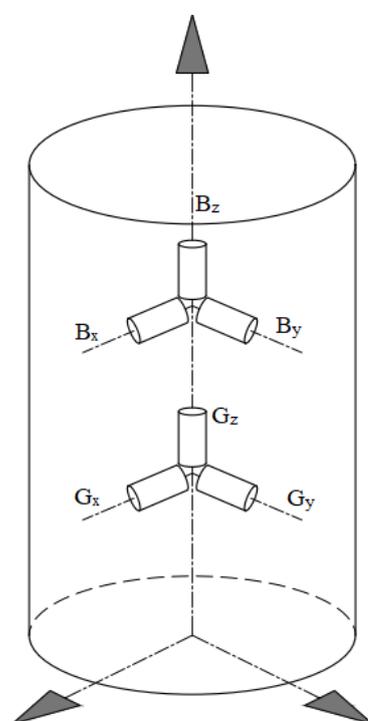


Рисунок 4– Схема установки датчиков в магнитных инклинометрах

Для измерения векторных составляющих магнитного поля магнитометры устанавливаются в трех ортогональных плоскостях V_x , V_y и V_z , направление V_z определяется вдоль оси инструмента. Три акселерометра устанавливаются в ортогональных плоскостях G_x , G_y и G_z , аналогично компоновке магнитометров (рисунок 4).

Это позволяет измерять все углы магнитного направления и вертикального наклона в пространстве, соответственно суммировав векторные составляющие [90]. Таким образом, магнитный азимут измеряется в горизонтальной плоскости поверхности Земли (рисунок 5, а), а зенитный угол – в вертикальной плоскости (рисунок 5, б).

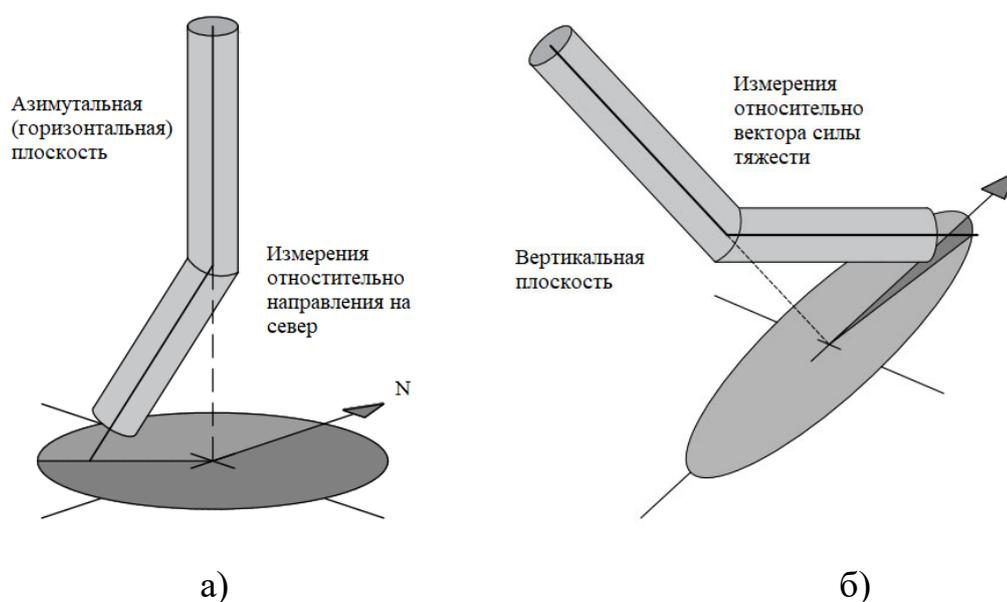


Рисунок 5 – Принцип измерений магнитного азимута и зенитного угла

Как и все приборы гироскопического ориентирования, скважинные гироскопы при определении азимутального угла имеют физическое свойство сохранять заданное положение своей оси и при этом измерять повороты своего основания в пространстве. Конструкция имеет диск-маховик, который вращается с высокой частотой (10–40 тыс. оборотов в минуту), а ось диска ориентирована в направлении истинного меридиана, имея три степени свободы [15, 55]. В результате действия силы

Кориолиса, возникающей из-за вращения Земли, гироскопические измерения свободны от влияния ее магнитного поля, соответственно могут использоваться в открытых и обсаженных стволах.

Современные конструкции гироскопических инклинометрических систем состоят из двух-трех гироскопических датчиков и измерителей ускорения (акселерометров). Для обеспечения измерений угловой скорости и ускорения по трём ортогональным осям гироинклинометры, предназначенные для работы в любых положениях, содержат полный комплект – триаду гироскопов и триаду акселерометров [90]. Перед спуском инклинометра в скважину необходимо выполнить начальную азимутальную ориентацию (НАО) [43] относительно географического меридиана. Для этого инклинометрическую систему закрепляют на устье скважины, соединяя с наземным блоком геофизическим кабелем, определяют начальную азимутальную и горизонтальную ориентации инклинометра, фиксируя показания ускорений акселерометра и угловую скорость. Затем проводятся измерения траектории ствола скважины в автономном режиме. Сигналы, полученные от гироскопов и акселерометров, обрабатываются в процессоре.

В бурящейся скважине измерения производятся по технологии MWD скважинным магнитометром, расположенным в немагнитной капсуле на конце буровой колонны. Обычно скважинный модуль состоит из трех магнитометров и трех акселерометров. Технология забойных навигационных систем с применением магнитометрической съемки является значительно более экономичной, чем ориентирование с применением гироскопов, при этом магнитные инклинометры достаточно стабильны к физическим факторам воздействия в скважинной среде [11]. Кроме того, при использовании магнитных инклинометров, как в случае забойных систем, так и отдельных инклинометрических систем, необходимо отслеживать изменчивость магнитного поля во времени и пространстве. Коррекция погрешностей, связанных с магнитными вариациями, достигается использованием математических моделей глобального магнитного поля [82, 85, 88] и учетом локальных возмущений, особенно в высоких широтах.

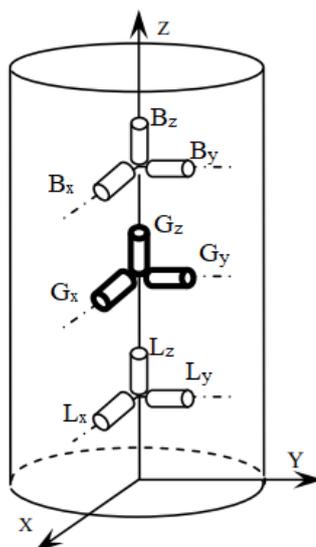


Рисунок 6 – Комбинированная инклинометрическая система

Дальнейшее развитие инклинометрических систем стоит ожидать в совместном использовании гироскопических, магнитометрических датчиков и акселерометров в составе одной компоновки (рисунок 6). Такой подход позволит корректировать источники возникновения погрешностей измерений и проводить замеры в обсаженных и открытых стволах, повысить точность и надежность определения местоположения скважины в горном пространстве [26, 109].

1.3 Методы обработки инклинометрии

Для расчета положения оси скважин существует восемнадцать [79] методов расчета траектории на основе первичных полевых измерений: метод касательных, сбалансированный метод касательных, метод десяти хорд, тангенциальный метод, метод средних углов, сбалансированный тангенциальный метод, метод минимальной кривизны, кольцевых дуг, метод сплайнов, метод радиуса кривизны, квадратичный метод и т. д. [5, 6, 24].

Тангенциальным методом расчета относительно легко рассчитывать ось скважины вручную. Метод предполагает, что зенитный угол и азимут направления траектории скважины остаются неизменными в течение интервала измерений, и не

учитывает значения углов в предыдущей точке измерений. Метод может привести к накоплению значительных ошибок вдоль траектории скважины.

Усовершенствованием этого метода стал метод среднего угла, в котором зенитный угол и азимут на протяжении одного интервала (L_{1-2}) рассчитываются по средним арифметическим значениям измерений в начале и конце интервала. Приращения координат определяются по формулам [5, 79, 95].

$$\Delta x = L_{1-2} \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}; \quad (1)$$

$$\Delta y = L_{1-2} \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}; \quad (2)$$

$$\Delta z = L_{1-2} \cos \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}, \quad (3)$$

где α_1 и α_2 – зенитные углы, а φ_1 и φ_2 – азимутальные углы в начале и конце интервала в градусах.

Дальнейшим улучшением стал сбалансированный тангенциальный метод, при котором измеряемый угол наносится на половину предыдущего интервала и на половину следующего, а погрешности вычисления на предыдущем интервале компенсируются текущим.

Вышеперечисленные методы имеют один общий недостаток – ось скважины моделируется как ломаная линия, такие методы подходят лишь для расчета инклинограммы вертикальных и наклонно-направленных скважин. Другая группа методов, таких как метод минимальной кривизны, метод радиуса кривизны и другие представляет профиль скважины отрезками кривой линии и подходит для извилистых и горизонтальных профилей скважин.

До середины 1970-х гг., а в России и гораздо позже в некоторых компаниях полевые данные по результатам измерений инклинометрии рассчитывали вручную ввиду ограниченности вычислительных возможностей компьютеров. В связи с этим метод среднего угла, являясь простым и достаточно точным методом расчета [79], использовался повсеместно [29]. На профилях с незначительными горизонтальными отклонениями от устья скважин метод среднего угла дает хорошие ре-

Учитывая наличие погрешностей в разных методах расчета (таблица 1), при пространственном моделировании траектории скважины смежными службами предприятия с применением разных программных комплексов следует согласовывать метод расчета инклинометрии во избежание отклонений координат пластопересечений и забоев.

Таблица 1 – Допустимые отклонения значений точек вскрытия пластов от проектного положения скважины [78]

Метод расчета	Погрешность определения истинной глубины по вертикали, м	Погрешность определения отклонения от вертикали, м
Тангенциальный	-1,45	4,4
Среднего угла	0	-0,08
Радиуса кривизны	-0,01	-0,09
Минимальной кривизны	-	-

На практике нередки случаи, когда геологическая модель месторождения может содержать исторические данные инклинометрии ликвидированных или консервированных скважин, тогда проведение повторных измерений в стволе затруднительно. Часто в таких данных могут частично отсутствовать результаты измерений на значительных интервалах. Тогда для проверки расчёта инклинограммы целесообразно применять квадратичный метод, где интервал представляется кривой, для которой плановые X и Y координаты полиномы второй степени координаты глубины Z , коэффициенты определяются по измеренным азимутальным и зенитным углам на концах интервала [100]:

$$x = a_1 z^2 + a_2 z + a_3; \quad (4)$$

$$y = b_1 z^2 + b_2 z + b_3; \quad (5)$$

$$z = z. \quad (6)$$

В работе [90] указывается дополнительный метод расчета для контроля результатов съемки – метод изменяющейся кривизны. Суть состоит в построении трех графиков: измеренной глубины, координат широты и долготы. На графиках строится плавная линия из всех измеренных точек, а площадь под графиком будет соответствовать измеренным значениям, поскольку любые отклонения на интервале будут сильно отличаться от значений смежных интервалов.

1.4 Неопределенность геопространственного положения скважины

Для определения доверительных интервалов съёмки в скважинах, ISCWSA предложено использовать общеизвестные статистические методы оценки вероятного попадания в геологическую цель в условиях неопределенности навигации скважины. Результаты измерений азимутальных и зенитных углов и их истинные погрешности рассматриваются как отдельные значения непрерывной случайной величины, как и другие геодезические измерения подчиняются нормальному закону распределения Гаусса [27, 29, 90].

В теории ошибок нормальное распределение случайных погрешностей характеризуется средним квадратическим отклонением σ [16, 19] относительно некоего математического ожидания измеряемого параметра – зенитного угла или азимута. Величина σ («сигма») является единицей измеренного рассеивания величин полученных параметров и позволяет практически определять интервал возможных значений ошибок измерений [62], в том числе и при инклинометрической съёмке. Необходимо определить, как часто случайная величина появляется в окрестности некоторого математического ожидания при повторении измерения [23].

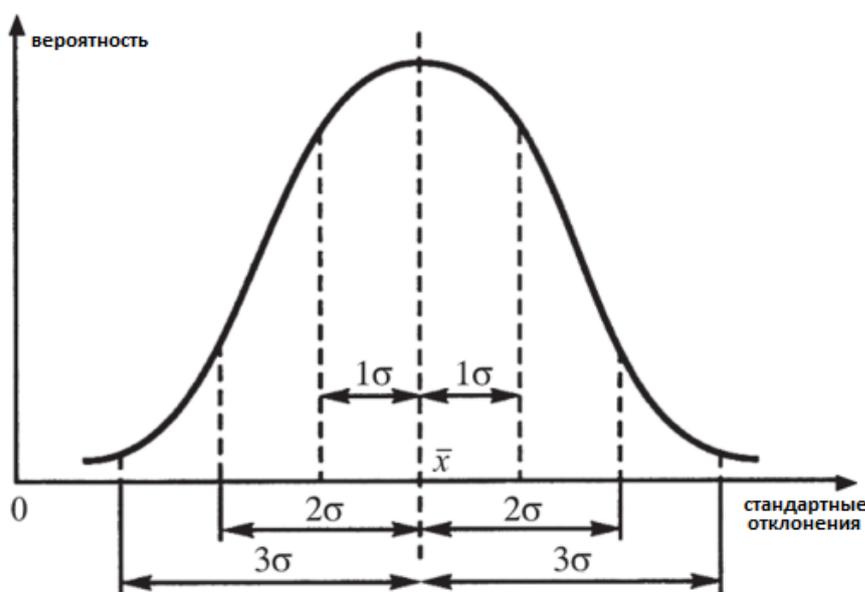


Рисунок 8 – Правило трех сигм

«Правило трёх сигм» означает, что практически все значения нормально распределённой случайной величины лежат в интервале от -3σ до $+3\sigma$ [8, 19]. Измерения, которые отклоняются более чем на три стандартных отклонения (рисунок 8) от ожидаемого значения, следует рассматривать как грубые ошибки [16]. И в соответствии с рекомендациями ISCWSA для расчёта ориентации и положения ствола скважины следует использовать только измерения, попадающие в интервал $\pm 3\sigma$ [90].

Вероятность попадания случайной ошибки измерения обычно определяется в «сигмовых интервалах» следующим образом: $\pm\sigma$ до 68 %, $\pm 2\sigma$ – вероятность 95 %, $\pm 3\sigma$ – вероятность 99 %. В приложении А [36] приведены уточненные значения вероятности для задания областей неопределённости пространственного положения скважин на основании результатов инклинометрии.

Стандарт [78] хоть и не определяет модель ошибок при инклинометрических измерениях скважин, однако устанавливает размер для трехмерной области неопределенности как вероятность 95 %, а значение среднеквадратического ошибки как $2,79\sigma$. Однако в компаниях, занимающихся проектированием и строительством скважин на территории России, во внутренних регламентирующих документах могут устанавливаться различные значения стандартного отклонения («сигма») для задания уровня достоверности области неопределённости скважины – 1σ , 2σ , $2,8\sigma$.

Параметры неопределенности положения скважины в подземном пространстве необходимы для расчета коэффициента сближения (в разных вариантах – коэффициент расхождения или разделения) скважин при кустовом способе бурения, при определении положения забоя скважины относительно круга допуска и корректирования траектории бурения [6]. В случае расхождения коэффициента сближения на любой глубине скважины и использовании заказчиком и буровым подрядчиком разных доверительных уровней вероятности, стороны договариваются о том, что разница между осями проектируемой скважины не должна превышать 3 % от глубины.

При кустовом способе разработки бурения скважин необходимо обеспечить попадание забоев в зону круга допуска геологической цели с координатами, регламентированными проектом разработки месторождения [66].

Для определения влияния различных источников ошибок на неопределенность положения траектории скважины было разработано несколько моделей: модель конуса неопределенности, модель ошибок Вольфа и де Вардта, модель ошибок SESTEM, модель ошибок ISCWSA [90], топографическая модель TERM [6]. Все эти модели основаны на исследовании возникновения различных источников ошибок и зависимости от них точности позиционирования скважин.

Конус неопределенности – простая модель, применявшаяся в ранних версиях программного комплекса COMPASS (для проектирования наклонно-направленных и горизонтальных скважин), состоящая в соотношении измеренной глубины и углов наклона профиля скважины в виде усеченного конуса. Эта модель широко использовалась, однако не учитывает влияния значений измеряемых углов и типа инклинометра, а также не предназначена для бурения в сложных условиях.

В работе [6] рекомендуется к использованию модель погрешностей Вольфа и де Вардта, которая предусматривает генерацию эллипсоида неопределенности в трех ортогональных осях. Размерность эллипсоида складывается из погрешностей длины скважины вдоль оси скважины, большая полуось характеризует погрешности азимута, малая – зенитного угла. Модель учитывает влияние пяти источников ошибок: погрешность отсчета по компасу, намагниченности бурильной

колонны, неточность наклона; ошибка несоосности, отклонение относительной глубины. Для каждого прибора определялся набор коэффициентов, значения которых применимы только к используемым инструментам и только буровых операций в районе Северного моря [90, 95].

Топографическая модель TERM являлась развитием модели Вольфа и де Варда и описывается в виде матрицы, ожидаемых параметров неопределенности для отдельных измерительных инструментов и технических условий [6].

В 1987 г. Р. Хартман предложил расширенную версию модели систематических инструментальных ошибок для внутреннего использования компанией Shell (SESTEM). Она обеспечила значительное улучшение точности по сравнению с предыдущими моделями неопределенности [90], учитывает завышенные значения зенитного угла по глубине для компенсации азимута [6]. Дополнительно включает условия работы оборудования, расположение скважины, точность фонового магнитного поля и рассматривает источники ошибок измерения на уровне отдельных компонентов.

Примерно в это же время экспертами комитета ISCWSA была разработана сложная математическая модель неопределенности положения скважин, признанная мировым профессиональным сообществом промышленным стандартом. Модель описывает множество источников возникновения погрешностей, их величину и особенности распространения.

Стандарт учитывает более 98 источников возникновения систематических погрешностей для магнитных и гироскопических инклинометров, постоянно дополняется новыми исследованиями и совершенствуется. Эффект от использования модели заключается в значительном снижении неопределенности положения скважины со всеми преимуществами повышенной точности и снижения рисков пересечений с соседними скважинами (рисунок 9).

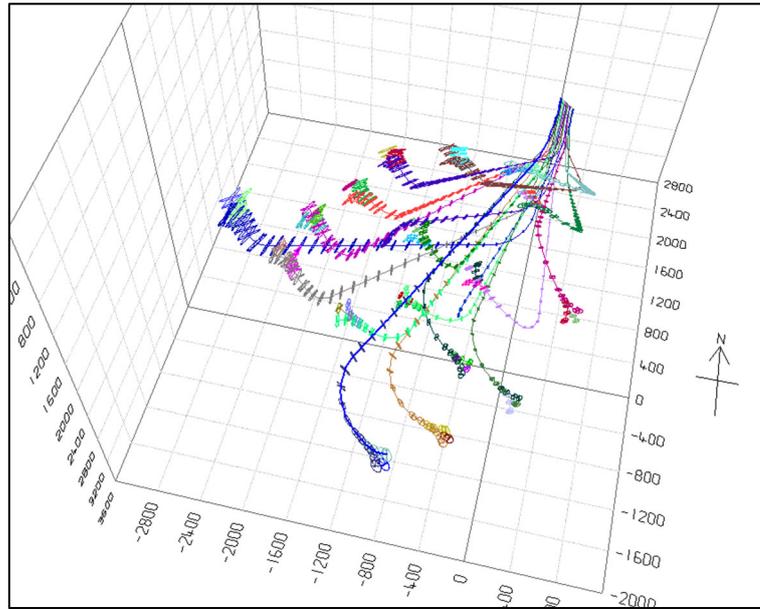


Рисунок 9 – Трехмерное изображение куста скважин с эллипсами неопределенности

Основным критерием успешной модели ошибок геопространственного положения скважин является возможность выбора правильных значений для типов различных инструментов и использования надежных данных для внесения поправок.

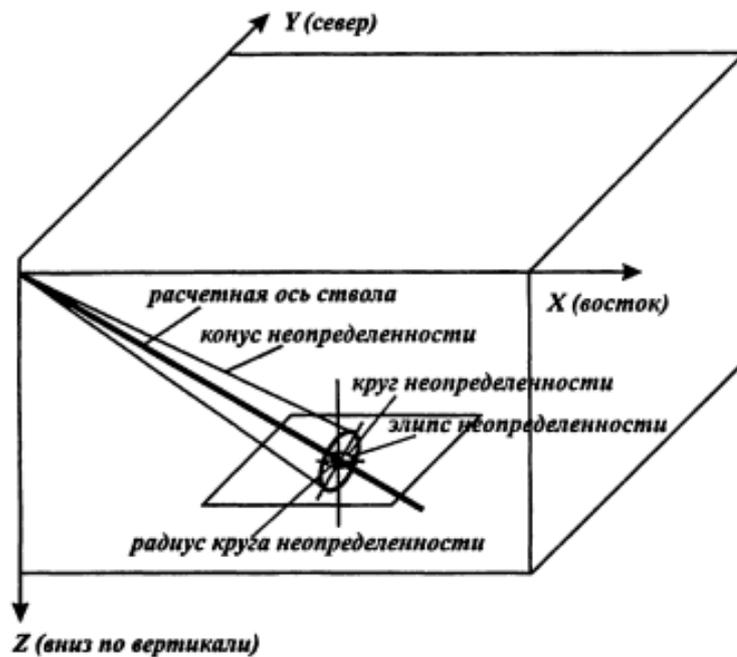


Рисунок 10 – Схематичное представление вариантов областей неопределенности оси скважины [6].

На рисунке 10 приведены различные варианты отображения областей неопределенности пространственного положения скважин, которые могут быть представлены отрезком прямой (неопределённость по заданному направлению), в плоскости (эллипс в виде проекции на плоскость, круг допуска) или в трехмерном пространстве (эллипсоиды неопределенности и конус, построенный по множеству таких эллипсоидов). Для таких задач, как предотвращение пересечения скважин и определение размеров геологической цели, важно количественно оценить размерность пространства неопределенности положения вокруг оси ствола скважины. В пределах такой области неопределённости ось скважины может принимать любое вероятное положение.

Моделирование эллипсоидов неопределенности также применяется для анализа пространственного положения проектируемых и существующих скважин при проектировании строительства скважин. Для реализации этой задачи ведется расчёт коэффициента расхождения (другое название – коэффициент сближения скважин) [45, 66, 95] при определении расстояния между эллипсоидами ошибок скважин и вероятности их пересечения. Коэффициент определяется по следующей формуле:

$$K = \frac{AD}{AD+CD}, \quad (7)$$

где AD – расстояние между осями соседних скважин; AB и CD – значения больших полуосей эллипсоидов неопределенности ближайших скважин (рисунок 11).

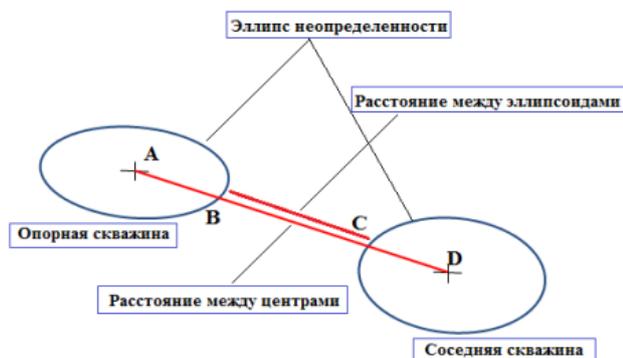


Рисунок 11 – Коэффициент расхождения скважин [66]

Если коэффициент расхождения скважин равен или меньше значения $K = 1$ [45, 65, 92], то проектная скважина в бурение не допускается, а профиль корректируют. При значении коэффициента расхождения менее 5 необходимо выполнить проверку достоверности данных об инклинометрии (магнитное склонение, сближение меридианов, тип инклинометра и его погрешности) и геопространственном положении (координаты и альтитуды устьев) соседних скважин. В районах уплотненного бурения на зрелых месторождениях и при невозможности корректировки профиля планируемой скважины производят корректировку схемы разработки месторождения с изменением координат расположения геологических целей.

1.5 Выводы по разделу 1

Таким образом, теоретические аспекты российской науки основаны на научных положениях конца 1980-х гг. и не соответствуют современному состоянию в отрасли. Информация, касающаяся надежности и точности позиционирования скважин в подземном пространстве, обработки результатов измерений инклинометрии, изложенная в российской нормативной документации, не носит системного характера и значительно отстаёт от зарубежных научных исследований и современных производственных подходов. Российская практика опирается на исследования зарубежных авторов и компаний, которые в вопросах точности ориентации скважин значительно продвинулись вперед.

Для проведения инклинометрии скважин существует два физических принципа регистрации азимутального направления скважины: магнитометрический и гироскопический. Технологии измерения траектории скважин непрерывно совершенствуются, улучшаются инструментальные характеристики инклинометров. В последнее время ведутся разработки, рассматривающие комбинирование магнитометрических и гироскопических датчиков в составе телеметрических забойных систем.

Для снижения погрешностей при обработке результатов инклинометрической съемки скважин разработано множество подходов, среди них: проведение калибровки и метрологической поверки инклинометрических систем во избежание

накопления инструментальных погрешностей; уточнение магнитного поля Земли с помощью глобальных геомагнитных моделей в сочетании с фиксацией локальных вариаций поля; применение метода минимальной кривизны при расчете инклинограммы; разработка математических моделей ошибок при инклинометрии и учет большого количества разнообразных систематических погрешностей; широкое внедрение статистических методов для оценки вероятного положения скважины в горном массиве.

Дальнейшее развитие и совершенствование в области инклинометрии скважин сводится к снижению инструментальных погрешностей инклинометров, учету максимально возможного числа физических факторов воздействия на процесс измерений при обработке полевых данных, повышению оперативности получения геопространственной скважинной информации, оптимизации затрат на проведение исследования геометрии скважин. Поэтому разработка подходов повышения надежности и точности инклинометрии скважин является актуальной задачей отрасли.

2 НАКОПЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ СКВАЖИН

2.1 Основные теоретические положения

Во время использования приборы для инклинометрической съёмки, и особенно инклинометры в составе забойных телеметрических систем, подвержены влиянию различных физических факторов в скважине: вибрациям, колебаниям температур и давления среды, намагниченности горных пород и самого инструмента, конструктивных элементов скважины и т. д. Поэтому исследования инклинометрии подвержены множеству погрешностей различного происхождения, а результаты скважинных измерений связаны с неопределенностями пространственного положения скважин. В процессе инклинометрических наблюдений, как и любых других геодезических измерений, в результате действия различных физических сил возникают ошибки измерений, которые по характеру проявления в инклинометрических измерениях скважин определяются как грубые, систематические и случайные ошибки измерений [17, 27, 34].

Наличие грубых ошибок, таких как промахи, просчеты, описки [27], в каком-либо из замеров инклинометрии возможно обнаружить при стандартном анализе допусков на отклонение от проектного профиля или при графическом сравнении повторных измерений. Однако не всегда информация о проектном положении доступна специалисту-маркшейдеру, а также фактическая траектория может существенно отличаться от плановой ввиду изменения в процессе строительства скважины. Кроме того, при повторных измерениях в скважинах нельзя с уверенностью сказать конкретно, в каком из измерений присутствует такая ошибка. Грубые ошибки при обработке инклинометрии могут быть связаны с некорректной идентификацией скважины (рисунок 12), расчетом оси скважины без учета поправок или избыточным их применением, расчетом в разных системах координат, неисправностью прибора, человеческими ошибками [20]. Вследствие вышесказанного, необходимо найти способ для идентификации и элиминации грубых отклонений из выборки.

В течение длительной разработки и эксплуатации скважин месторождения одна и та же скважина зачастую подвергается повторным инклинометрическим измерениям ее оси в связи с необходимостью уточнения её положения для проектирования соседних скважин, зарезки боковых стволов, изменениям назначения скважины и т. д. В базе данных предприятия накапливается несколько инклинометрических съёмок скважины, в результате сравнения и анализа нескольких измерений, проведенными разными приборами и в разные периоды времени, могут быть выявлены значительные отклонения от допустимых значений погрешностей исследований (рисунок 12) [20].

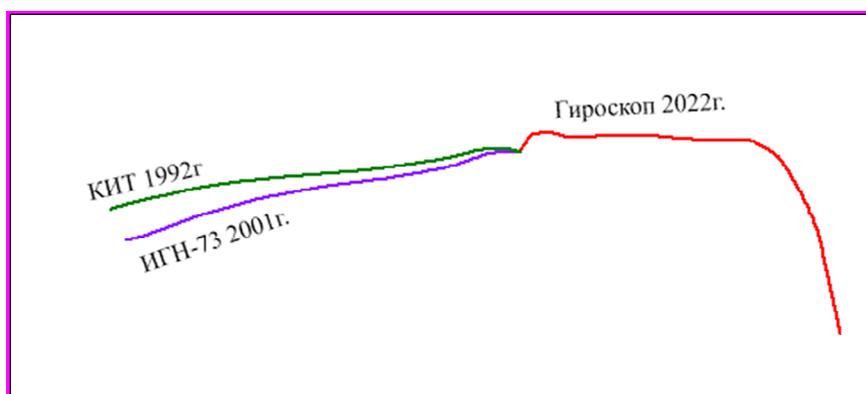


Рисунок 12 – Данные наблюдений в скважине. Ошибки идентификации скважины

Систематические погрешности являются основной причиной проявления неопределенности оси скважины в подземном пространстве и остаются постоянными или закономерно изменяются в процессе многократных измерений и проявляются в виде функциональных зависимостей [27]. Такие ошибки имеют свойство накапливаться при измерениях с нарастанием глубины скважины или при переходе к измерению других скважин. Учет и снижение их влияния достигаются путем определения источника возникновения и особенностей распространения ошибки с последующим внесением поправки в данные при обработке измерений [27]. Систематические погрешности при инклинометрии накапливаются вследствие множества

причин, например: ошибка определения магнитного склонения, магнитная интерференция, неисправность инклинометра, ошибка в методе расчета координат оси скважины, ошибка расположения прибора и несоосность и т. д. [6, 34].

Случайные погрешности возникают при воздействии на приборы различных условий в процессе измерений непредсказуемым образом, величина и знак которых случайно изменяются от измерения к измерению [27]. Повысить надежность измерений и ослабить влияние случайных ошибок на результат измерений можно путем проведения повторных измерений и математической обработкой. Погрешности такого характера определяют разброс результатов измерений относительно математического ожидания [16]. Влияние случайной ошибки обычно менее значительно сказывается на размерности области неопределенности оси скважины, чем влияние систематической составляющей. Хотя есть исключения, например в периоды магнитных возмущений погрешности измерений в случайной реализации могут на порядок превышать допустимые отклонения [11].

Маркшейдерская служба предприятия, используя данные инклинометрии от подрядных организаций, часто не имеет информации о состоянии инклинометров, их калибровке и поверке. В этой связи судить о возможных систематических погрешностях измерений и точности координат положения скважины в горном массиве не всегда доступно.

Единственной возможностью оценить точность проводки скважины различными приборами для инклинометрии является проведение многократных повторных инклинометрических наблюдений в скважинах. В инструкции [77] есть указание на проведение последовательных повторных наблюдений, однако на практике это условие выполняется нечасто ввиду дороговизны этих мероприятий.

Для оценки накопления инструментальных ошибок были отобраны 500 парных магнитных и гироскопических инклинометрических исследований скважин, расположенных на зрелых месторождениях Западной Сибири (рисунок 13). Это позволяет предполагать, что горно-геологические и технологические условия при

строительстве скважин и проведении инклинометрии скважин эквивалентны. Отобранные скважины были занесены в программный комплекс для контроля проводки скважин «Wells» [75].

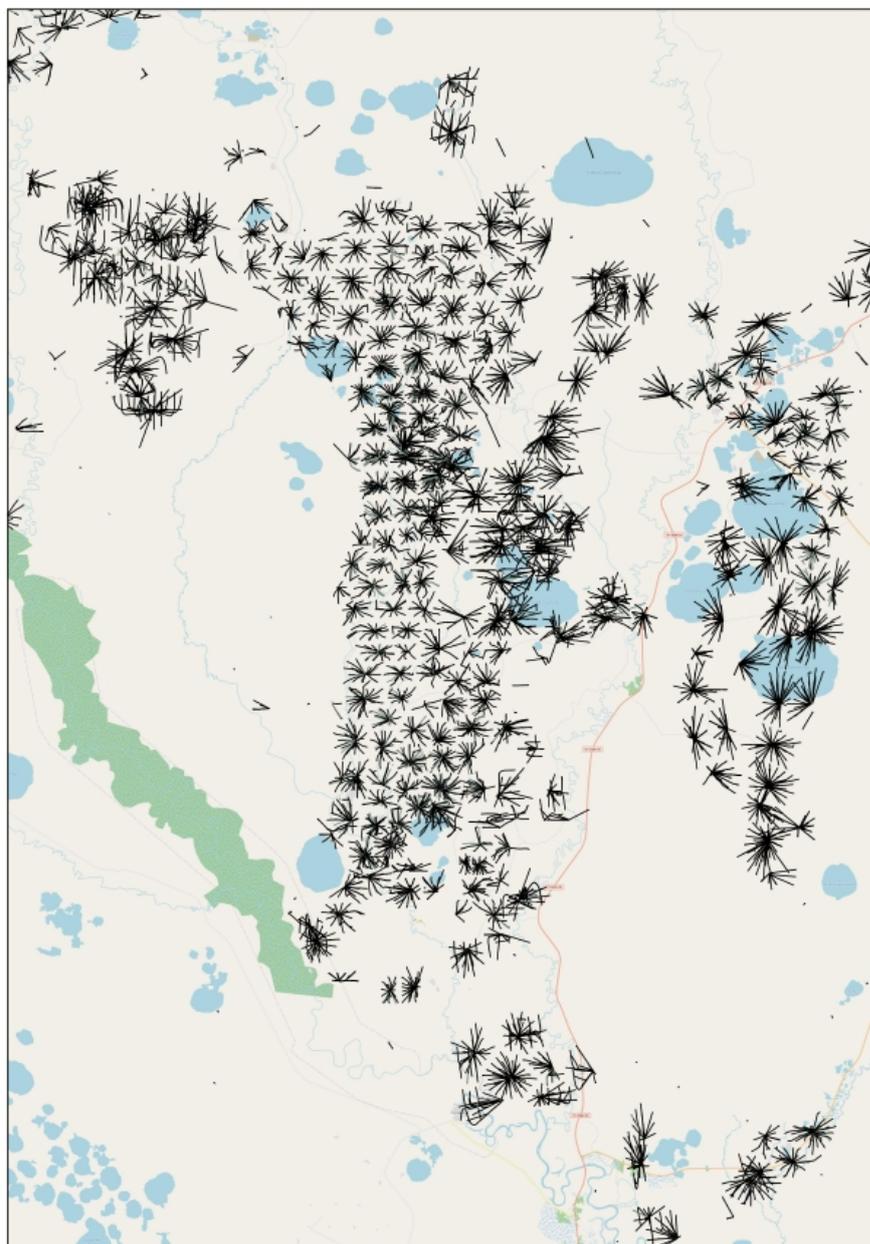


Рисунок 13 – Маркшейдерский ковер бурения

Выбор скважин месторождений, длительно находящихся в разработке, обусловлен накоплением повторных и контрольных измерений инклинометрии, выполненных различными методами измерений и типами инклинометров. В выборку

приняты скважины, повторные замеры, которых проводились в последние два десятилетия и более-менее соответствуют современному уровню технологий инклинометрии. Недостатком представленных в выборке производственных данных является то, что измерения уже прошли математическую обработку и устранение систематических составляющих погрешностей и уже представлены заказчику как финальная версия инклинометрии.

Выполнение анализа собранных данных инклинометрии основано на следующих предварительных теоретических предположениях [50]:

- ввиду отсутствия альтернативных методов контроля оси скважины повторные измерения положения осей скважин являются единственным объективным источником информации о погрешностях инклинометрии в реальных условиях;
- общая картина накопления погрешностей характеризуется разностями координат осей повторной инклинометрии скважины;
- при инклинометрической съёмке скважин вычисленные координаты оси скважины являются реализацией случайной функции в процессе измерений;
- разности координат повторных измерений инклинометрии считаются случайными функциями;
- совокупность попарных отклонений в плоскости одной скважины азимутальных и зенитных углов рассматривается как случайный процесс;
- характеристики случайных погрешностей разных типов инклинометров принимаются идентичными;
- положение пунктов измерений для сравнения разных скважин определяется в соответствии с глубиной интервала от устья скважины;
- используются не первичные полевые данные, а прошедшие коррекцию в соответствии с подходами ISCWSA при обработке измерений в зависимости от типов инклинометров;
- разности вычислялись по принципу «второе – первое», исходя из даты проведения инклинометрии;
- интервал измерений на осях скважин соответствует 10 м или приводится к этому значению.

2.2 Модель ошибок ISCWSA

Модели ошибок, разработанные ISCWSA, постоянно обновляются и модернизируются. При создании моделей ошибок исследователями тщательно анализировались многочисленные производственные материалы, полученные в условиях реальной эксплуатации скважин преимущественно на европейских и американских нефтегазовых промыслах. Следовательно, типичные значения для моделирования погрешностей инклинометрических измерений Западно-Сибирского нефтегазопромысла ранее не изучались. При этом факторы, воздействующие на показания инклинометрических систем, могут существенно отличаться в зависимости от горно-геологических и технологических условий разработки месторождения [21].

Модели ошибок создаются для основных типов приборов. Первые общие математические модели описывали закономерности накопления погрешностей для забойных телеметрических систем [110]. В целом, ошибки, накапливающиеся при измерениях телеметрическими системами для разных марок оборудования во многом схожи, так как они имеют аналогичные характеристики.

Вслед за моделями для применения при телеметрии начали разрабатываться общие для гироскопических систем модели области неопределенности. Такие модели содержат набор коэффициентов ошибок для разных источников возникновения погрешностей с учетом их влияния на неопределённость положения оси скважины в соответствии с конфигурациями датчиков и режимами работы оборудования [98]. Для стандартизации и реализации в программных продуктах модели основаны на общей статистической основе для учета распространения ошибок при гироскопических и магнитометрических измерениях, однако имеют некоторые различия. Выбор модели ошибок IPM (Instrument Performance Model) определяется типом инклинометрической системы, используемой моделью магнитного поля и содержит набор коэффициентов [12]. Справедливо отметить, модель ISCWSA не утверждает конкретные значения погрешностей. В настоящее время выявлен 41 источник влияния на измерения для магнитометрических и 48 для гироскопических датчиков инклинометрических систем. Общими для магнитных и гироскопических

моделей накопления ошибок являются 9 источников погрешностей. То есть модель ошибок для гироскопов является более расширенной версией модели для MWD.

При выборе версии модели ошибок необходимо ее предварительное согласование между проектной организацией и недропользователем на этапе планирования скважины во избежание невозможности внесения корректировок в запланированный профиль.

В моделях ISCWSA математически описаны физические факторы, которые влияют на ориентацию скважины в подземном пространстве. Однако никакая модель не может учесть все возможные вариации физических факторов, возникающих в момент конкретного измерения и, тем более, во время бурения скважины. Не существует скважины, ось которой можно было измерить с высокой надежностью и принять ее в качестве эталона. Поверочные стендовые испытания инклинометров в лабораторных условиях не дают представления о реальной точности измерений, так как в процессе измерения в реальной скважине на оборудование действует множество факторов, далеко не все из которых известны и возможны для моделирования на стенде.

Известно, что в случае исследования ошибок измерений, в том числе и при проведении инклинометрической съемки, складывающихся из множества различных неконтролируемых факторов [90], при достаточно большом объеме выборки предположение о нормальности распределения оправдано [19]. Поэтому семейство моделей ISCWSA реализовано на представлении о том, что ошибки, возникающие в процессе проведения измерений инклинометрии скважин, подвержены закону нормального гауссового распределения, так как являются суммой большого числа независимых случайных факторов. При этом используется предельное значение $\pm 3\sigma$ с доверительным уровнем 99,7 %. Результаты измерений, выходящие за диапазон «три сигма», считаются выполненными с грубыми ошибками и требуют повторного измерения. Однако нет информации о том, какого объема выборки скважин исследовали в ISCWSA и SPE.

В работах [93, 97] было выдвинуто предположение о том, что магнитное склонение, определённое по глобальным магнитным моделям, соответствует нормальному обратному гауссовому распределению (распределение Лапласа) и проявляется в удлинении «хвостов» распределения на гистограмме. Применение распределения Лапласа сопряжено с возникновением проблем определения коэффициента стандартных отклонений («сигма»). Для определения коэффициента стандартного отклонения в этом случае необходимо определить пределы достоверности значений, снятых с геомагнитных моделей, разделить на полученный коэффициент и далее использовать как нормальное распределение. Поэтому ISCWSA и по сей день придерживается гипотезы о нормальном распределении случайных величин измерений инклинометрии.

Кроме того, оценку точности неинформативно проводить с использованием проектного профиля скважины, ввиду того, что проект и действительность могут отличаться вследствие отклонения фактических результатов бурения от планируемых по самым разным причинам.

При применении модели необходимо: регулярно проводить калибровку и поверку инклинометра; проверять качество полевых данных; снижать влияние магнитных помех для съёмок во время бурения. Интервалы между измерениями не должны превышать 30 м.

Каждый источник ошибок имеет: набор весовых функций, описывающих влияние на фактические измерения глубины, наклона и азимута; режим распространения, определяющий корреляцию с другими факторами; для конкретного инклинометра каждый источник ошибок имеет свою величину ошибки и определяется производителем инструмента.

Также предполагается, что источники возникновения погрешностей статистически независимы, а влияние всех источников ошибок является линейным.

Погрешности при магнитометрической съёмке и измерений во время бурения (MWD), включенные в модель ISCWSA: ошибки магнитометров и акселерометров;

погрешности определения магнитного поля Земли; влияние магнитной интерференции; погрешности, связанные с несоосностью инструмента; ошибки определения измеренной глубины.

При обработке «сырых» замеров для акселерометров и магнитометров моделируются коэффициенты смещения и масштабирования по всем осям инструмента. Также используется метод многоточечной коррекции (MSA – Multi Station Analysis) осевых помех для устранения воздействия магнитной интерференции от КНБК и намагниченности бурового раствора [96, 103].

Влияние магнитного поля Земли на направление азимута скважины характеризуется величиной общей напряженности, склонением и наклоном и определяется с помощью глобальных моделей магнитного поля с учетом геомагнитных вариаций и локальных отклонений намагниченности горных пород. Метод точной геомагнитной привязки IFR (In-Field Referencing) реализуется на основе высоко-точной воздушной магниторазведки [81, 89] и позволяет значительно снижать размерность эллипсоидов неопределённости [12, 103].

Погрешности, обусловленные магнитной интерференцией, возникают из-за влияния намагниченных элементов бурильной установки и корректируются использованием метода короткого НУБТ (немагнитные утяжелённые бурильные трубы) (SCC –Short Collar correction) [31].

Ошибки несоосности инструмента корректируются учётом прогиба КНБК (компоновки низа бурильной колонны) под действием силы тяжести методом SAG [68], устраняющим погрешности измерения зенитных углов и нивелирующим ошибку расчета глубины.

Ошибки определения измеренной глубины объединяют случайные и систематические, а также ошибки масштабного коэффициента глубины и растяжение бурильной трубы под действием веса бурильной колонны.

Из-за большого количества вариантов гироскопических инструментов, ошибки при съёмке могут содержать следующие источники в разных вариациях: коэффициенты смещения по осям датчиков, коэффициенты масштабирования, погрешности для азимутальной ориентации, коэффициенты несоосности датчиков

с инструментом. Ошибки, возникающие при измерениях гироскопом также зависят от режима работы инструмента: стационарный режим гирокомпасирования или непрерывный режим съемки. В случае работы гироскопической системы в непрерывном режиме ошибки зависят от времени запуска – ошибки дрейфа гироскопа. Кроме того, режим измерений может меняться по мере продвижения по стволу скважины.

Для повышения надежности статистических расчётов при использовании семейства моделей ISCWSA требуется метод итоговой проверки результатов измерений, основанный на статистическом анализе разностей координат многократных измерений.

Таким образом, рекомендованные ISCWSA модели накопления ошибок инклинометрических измерений в скважинах, а также рассмотренные выше методики обработки данных не учитывают корреляции измерения смежных интервалов, что может занижать размер области неопределенности положения ствола скважины при инклинометрической съемке.

2.3 Накопление инструментальных ошибок

За время эксплуатации приборы для инклинометрии в скважинах должны проходить периодическую метрологическую поверку или калибровку [77], это условие на практике может не соблюдаться. Кроме того, известно, методики калибровки и поверки инклинометрических систем не могут гарантировать требуемых значений точностных показателей на всем протяжении межкалибровочного интервала [53]. В результате накапливаются инструментальные погрешности, для снижения влияния на точность измерений аппаратуры которых целесообразно и экономически выгодно использовать различные математические подходы, позволяющие повысить надежность измеряемых данных.

Трудность определения погрешностей измерений при обработке инклинометрических измерений заключается в том, что оценка «истинного» значения измеряемых величин на практике определяется из измерений, отягощенных погрешностями в силу несовершенства инструментов для проведения инклинометрической

съемки, непостоянства внешней среды при наблюдениях и влиянием множества неконтролируемых факторов на данные измерений. Поэтому «истинные» значения измеряемых параметров возможно рассматривать теоретически как некую научную абстракцию и впоследствии оценивать надлежащими статистическими методами.

В инструкции [77] в качестве оценки точности инклинометрических измерений устанавливается определение значения средней квадратической погрешности δ , вычисленной по разностям двойных измерений:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=2}^n \frac{d_i^2}{2n}}, \quad (8)$$

где d_i – разность двойных измерений угла в i -й точке,

n – число двойных измерений.

Рассчитанное по инструкции [77] значение среднеквадратической погрешности не должно превышать значения основной погрешности инклинометра. Однако такой подход объективно не соответствует результатам анализа реальных производственных материалов, об этом подробно описано в третьем разделе.

Поэтому целесообразно применять моделирование доверительных областей для оценивания ошибок инклинометрических измерений как многомерной системы случайных величин в виде пространственных эллипсоидов вероятного расположения оси скважины. Поиск и учет влияния систематических погрешностей снижает размерность пространства неопределенности. Такой эллипсоид неопределенности пространственного положения оси скважины складывается из ошибок измеренной глубины, погрешностей азимутального и зенитного направлений. Размер малой полуоси эллипсоида определяется влиянием погрешностей зенитного угла, размер большой полуоси – влиянием погрешностей по азимутальному углу, ошибка измеренной глубины влияет на высоту эллипсоида вдоль оси скважины. Расчеты и построение эллипсоидов неопределенности целесообразно проводить в специализированном программном обеспечении, пример приведен в работе [65].

При расчете эллипсоидов неопределенности для каждого значения измеренного значения параметров инклинометрической съёмки (глубины, азимута, зенитного угла) вокруг оси скважины суммируется область неопределённости, имеющая вид «воронки» (рисунок 14), которую можно использовать для безопасного проектирования на месторождениях с кустовым способом бурения.

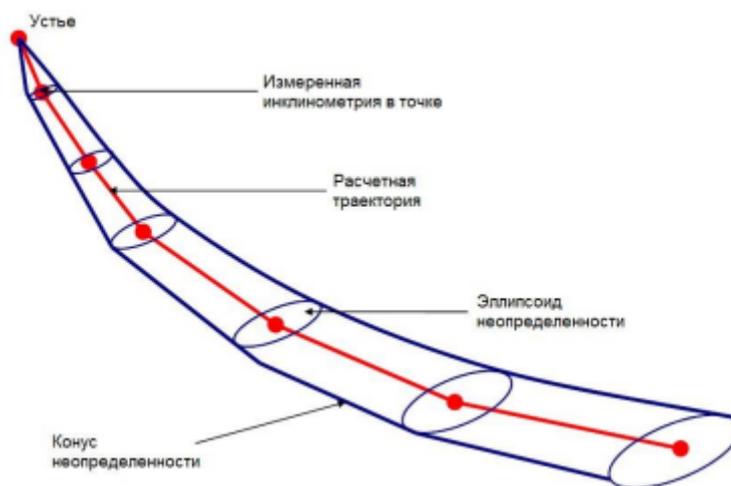


Рисунок 14 – Траектория скважины с конусом неопределенности [45]

В случае многомерных величин, которыми и являются реализации каждого измеренного значения на оси скважины при инклинометрии, ковариационная матрица обобщает дисперсии и описывает разброс случайной величины. При составлении ковариационной матрицы накопления ошибок необходимо учитывать принципы распространения случайных и систематических погрешностей: какие-то сохраняются на протяжении одного замера, другие – от одной скважины к другой (погрешности при определении магнитного склонения). После составления матрицы необходимо определить размер и ориентацию трёх осей эллипсоида неопределенности. Формулы расчета неопределенности в горизонтальной плоскости для точки измерений приведены в работе [32].

Для описания ориентации трехмерного эллипса неопределенности положения скважины подходят собственные векторы ковариационной матрицы, указывающие направления осей, вдоль которых разброс данных максимален. Соответствующие

собственные значения таких векторов определяют длину осей: чем больше значение, тем больше информации несёт этот вектор. Для квадратной матрицы собственные векторы являются единичными. Единичный вектор, который максимизирует дисперсию проекции на ковариационную матрицу, является собственным вектором с наибольшим собственным значением.

В ковариационной матрице по диагонали располагаются дисперсии признаков (азимута, зенитного угла и измеренной глубины), а в остальных колонках и строках – ковариации (взаимосвязи) соответствующих пар признаков. В силу симметричности ковариации такая матрица тоже будет симметрична. Векторы, составляющие основные размеры эллипса, располагаются на главной диагонали с нулями для всех ковариаций осей в случае отсутствия взаимосвязи признаков. Таким образом, преобразование ковариационной матрицы 3×3 в собственные векторы и собственные значения выполняется для определения размеров и ориентации эллипсоида неопределённости.

Весовые функции источников возникновения погрешностей определяются через векторные частные производные.

Основываясь на стандартных представлениях ISCWSA о закономерностях накопления ошибок съёмки для описания ковариационной матрицы погрешностей предполагаем 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:

$$r_j = \begin{pmatrix} l_j \\ \theta_j \\ \alpha_j \end{pmatrix}. \quad (9)$$

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:

$$\delta r_j = \begin{vmatrix} \delta l_j \\ \delta \theta_j \\ \delta \alpha_j \end{vmatrix}. \quad (10)$$

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

$$K_j = \begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Поинтервально вычисляя приращения координат, находят координаты оси скважины.

Вектор координат конца k -го интервала представим следующим выражением:

$$X_k = f_1(r_1) + \sum_{j=2}^k f_j(r_{j-1}, r_j), \quad (12)$$

где вектор конца интервала представляет собой вектор-столбец измеренных значений по осям X, Y, Z:

$$X_k = \begin{vmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{vmatrix}, \quad (13)$$

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

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

$$f_j(r_{j-1}, r_j) = \begin{vmatrix} \varphi_x(r_{j-1}, r_j) \\ \varphi_y(r_{j-1}, r_j) \\ \varphi_z(r_{j-1}, r_j) \end{vmatrix}, \quad (14)$$

где функции $\varphi_x(r_{j-1}, r_j)$, $\varphi_y(r_{j-1}, r_j)$, $\varphi_z(r_{j-1}, r_j)$ выражаются скалярными величинами.

Поэтому при предположении о взаимном влиянии граничащих интервалов измерений и в соответствии с формулой (12) вектор ΔX_k погрешностей координат k -й точки представим следующим выражением:

$$\Delta X_k = \frac{\partial f_1(r_1)}{\partial r_1} \delta r_1 + \frac{\partial f_2(r_1, r_2)}{\partial r_1} \delta r_1 + \frac{\partial f_2(r_1, r_2)}{\partial r_2} \delta r_2 + \frac{\partial f_3(r_2, r_3)}{\partial r_2} \delta r_2 + \frac{\partial f_3(r_2, r_3)}{\partial r_3} \delta r_3 + \dots + \frac{\partial f_k(r_{k-1}, r_k)}{\partial r_{k-1}} \delta r_{k-1} + \frac{\partial f_k(r_{k-1}, r_k)}{\partial r_k} \delta r_k. \quad (15)$$

Весовые функции источников возникновения погрешностей определяются через векторные частные производные и представляют собой матрицы, которые с учётом формулы (14) для вектора r_j и соседнего с ним r_{j-1} будут иметь следующий вид:

$$\frac{\partial f_j(r_{j-1}, r_j)}{\partial r_j} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_x}{\partial l_j} & \frac{\partial \varphi_x}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha_j} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial l_j} & \frac{\partial \varphi_y}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \varphi_y}{\partial \alpha_j} \\ \frac{\partial \varphi_z}{\partial l_j} & \frac{\partial \varphi_z}{\partial \theta_j} & \frac{\partial \varphi_z}{\partial \alpha_j} \end{vmatrix} = F_{j,j}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial f_j(r_{j-1}, r_j)}{\partial r_{j-1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \varphi_x}{\partial l_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_x}{\partial \theta_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_x}{\partial \alpha_{j-1}} \\ \frac{\partial \varphi_y}{\partial l_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_y}{\partial \theta_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_y}{\partial \alpha_{j-1}} \\ \frac{\partial \varphi_z}{\partial l_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_z}{\partial \theta_{j-1}} & \frac{\partial \varphi_z}{\partial \alpha_{j-1}} \end{vmatrix} = F_{j,j-1}. \quad (17)$$

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

$$M_k = (F_{1,1} + F_{2,1})K_1(F_{1,1} + F_{2,1})^T + (F_{2,2} + F_{3,2})K_2(F_{2,2} + F_{3,2})^T + \dots + (F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1})K_{k-1}(F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1})^T + F_{k,k}K_kF_{k,k}^T. \quad (18)$$

В связи с тем, что при использовании метода магнитной инклинометрии азимутальные углы измеряются относительно магнитного направления на северный полюс, необходимо учитывать угол магнитного склонения $-\delta_m$, а при переходе к вычислению координат X_k в геодезической системе следует пользоваться формулами:

$$\left. \begin{aligned} x_k^\Gamma &= x_k \cos \delta_M - y_k \sin \delta_M; \\ y_k^\Gamma &= x_k \sin \delta_M + y_k \cos \delta_M; \\ z_k^\Gamma &= z_k. \end{aligned} \right\} . \quad (19)$$

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

$$M_k^\Gamma = A M_k A^T, \quad (20)$$

где A^T – транспонированная матрица и матрица A имеет следующий вид:

$$A = \begin{vmatrix} \cos \delta_M & -\sin \delta_M & 0 \\ \sin \delta_M & \cos \delta_M & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Элементы эллипса погрешностей вычисляются по M_k^Γ – ковариационной матрице погрешностей координат конца каждого интервала.

Следовательно, элементы эллипса неопределённости в каждой точке оси ствола скважины вычисляются с учетом связи соседних интервалов измерений по ковариационной матрице погрешностей координат конца интервала в геодезической системе координат M_k^Γ :

$$M_k^\Gamma = \begin{bmatrix} m_x^2 & m_{xy} & m_{xz} \\ m_{xy} & m_y^2 & m_{yz} \\ m_{xz} & m_{yz} & m_z^2 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где m_x , m_y , m_z – средние квадратические ошибки определения координат по соответствующим осям, а m_{xy} , m_{xz} и m_{yz} – средние квадратические ошибки определения ковариаций между этими осями измерений.

Тогда дирекционный угол θ , определяющий направление полуоси накопления азимутальных ошибок эллипса погрешностей, вычисляется из следующей формулы с использованием среднеквадратических ошибок определения координат:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2m_{xy}}{m_y^2 - m_x^2}. \quad (23)$$

Затем вычисляются размеры полуосей эллипса погрешностей по азимутальной оси A – и зенитной оси B – по следующим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} A^2 &= R + w; \\ B^2 &= R - w \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где R – радиус области неопределенности, а w – величина для вычисления полуосей эллипсоида.

Для расчета радиуса области неопределенности и величины для вычисления полуосей эллипсоида также необходим учет среднеквадратических ошибок определения координат:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{m_x^2 + m_y^2}{2}; \\ w &= \frac{m_{xy}}{\sin 2\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

В связи с тем, что погрешность определения координат по оси Z , соответствующей глубине измерения, слабо связана с погрешностями плановых координат по осям X и Y , полуось C эллипсоида погрешностей пространственного положения конца интервала можно принимать равной m_z из формулы (22).

Для практического использования в соответствии с утверждённым уровнем вероятности, полученные из формулы (24) значения полуосей эллипсоида ошибок необходимо умножать на соответствующий коэффициент (Приложение А). Например, для того чтобы эллипсоид погрешностей соответствовал вероятности 95 %, в соответствии с таблицей величин вероятностей коэффициент составит значение 2,8.

Таким образом, приведённые выше закономерности определяют зависимость измерений граничащих интервалов скважин и, следовательно, влияют на расчет величины эллипсоидов погрешностей оси скважины, тем самым увеличивая параметры области неопределенности.

2.4 Оценка допустимых отклонений ствола скважины от проектного положения профиля

Размер допустимого отклонения ствола скважины от проектного положения оси скважины задается кругом, радиус которого составляет максимально возможное расстояние от точки вскрытия продуктивного пласта и в большинстве случаев устанавливается геологической службой предприятия-недропользователя.

При определении предельно допустимых отклонений положения скважины в горном массиве необходим учет геологических и технологических условий разработки месторождений. Так, в работах [29, 40] приведена методика вычисления по эмпирическим формулам ГНИПИ «Гипроморнефтегаз» значений допустимых отклонений точек вскрытия пластов и забоев (в случае отсутствия технического задания на бурение скважины) от проектного положения в зависимости от глубины и геологических условий залегания геологических пластов в складчатых и платформенных областях (таблица 2). Однако приведенные значения не превышают радиуса 50 метров для любых скважин глубже 3 000 метров и не учитывают множество выявленных на сегодняшний день факторов возникновения погрешностей, конструкцию профиля скважины и тип оборудования для инклинометрии скважин.

В работе [29] допускается зависимость отклонения от забоя скважины, от размерности сетки разработки месторождения и определяется до 5 % от глубины скважины, при этом с уменьшением шага сетки круг допуска имеет тенденцию к сужению. Стоит отметить, что современные инженеры по бурению скважин при возникновении спорных ситуаций в процессе планирования и бурения скважин придерживаются негласного правила в 3 % от глубины скважины.

Таблица 2 – Допустимые отклонения значений точек вскрытия пластов от проектного положения скважины [29]

Глубина скважин, м	Платформенные области			Складчатые области		
	расстояние между скважинами S, м	допустимые отклонения		расстояние между скважинами S, м	допустимые отклонения	
		% от S	м		% от S	м
до 2 000	200	10	20	135	15	20
2 000-2 500	250	12	30	150	20	30
2 500-3 000	267	15	40	160	25	40
более 3 000	250	20	50	167	30	50

Однако многочисленные практические данные расчёта области неопределённости по методике ISCWSA для скважин, расположенных на равнинных территориях Западной Сибири, показывают, что часто области неопределённости в значительной степени могут превышать указанные значения допусков.

После окончания бурения скважины маркшейдерская служба предприятия выполняет контроль соответствия проектного профиля и фактических данных инклинометрии путем оценки положения забоя скважины по данным инклинометрии относительно круга допуска заданной геологической цели [40, 78]. В этом случае возможны варианты расположения положения забоя скважины и области его неопределённости по отношению к кругу допуска геологической цели:

- забой скважины и область возможных погрешностей располагаются внутри проектного круга допуска (рисунок 15, а);
- забой находится внутри круга допуска, а эллипс частично за границей (рисунок 15, б);
- забой лежит на границе круга допуска, но более 50 % площади эллипса погрешностей внутри границ круга (рисунок 15, в);
- забой находится за границами круга допуска, область неопределённости частично (рисунок 15, г) или полностью (рисунок 15, д) лежит внутри круга допуска.

В случае вариантов, показанных на рисунках 15, а, 15, б, 15, в скважину принимают в эксплуатацию, в случаях показанных на рисунках 15, г и 15, д скважина

не принимается в эксплуатацию, а положение её оси в пространстве необходимо скорректировать.

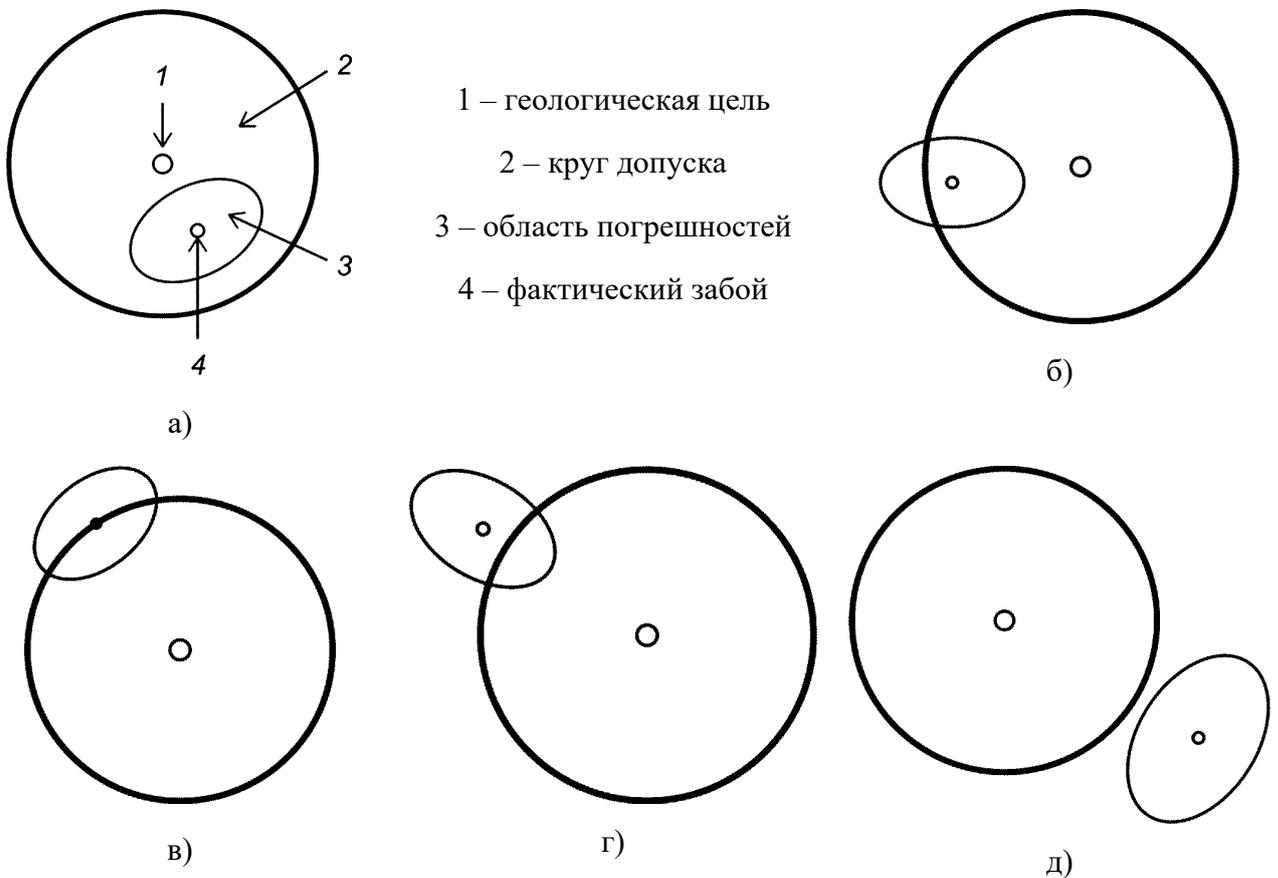


Рисунок 15 – Оценка попадания цели и забоя скважины в допуск

Предварительный национальный стандарт [78] содержит пояснение о необходимости дополнительной оценки рисков совпадения забоя и геологической цели в случае превышения размеров области неопределенности относительно круга допуска геологической цели путем применения более точных инклинометров и моделей геомагнитного поля Земли высокого разрешения.

В работе [6] приводятся значения погрешности измерения (таблица 3) для расчета круга неопределенности, радиус которого определяется по формуле:

$$R = \sqrt{(X - X_{и})^2 + (Y - Y_{и})^2 + (Z - Z_{и})^2}, \quad (26)$$

где X, Y, Z – расчетные координаты, а $X_{и}, Y_{и}, Z_{и}$ – координаты точек оси скважины с учетом погрешности измерения по типам инклинометров.

Ошибка измерения длины ствола определяется как $\pm 1/500$ до $\pm 1/1\ 000$ длины бурильной колонны [6].

Таблица 3 – Погрешности измерений для расчета области неопределенности

Зенитный угол, град	Тип инклинометра	Погрешность измерения зенитного угла, град.	Погрешность измерения азимута, град.
<5	Магнитные	± 0.25	± 5.0
	Телесистемы с проводным каналом	± 0.25	± 5.0
	Телесистемы с гидравлическим каналом	± 0.25	± 5.0
	Гироскопические инклинометры	± 0.25	± 5.0
>5	Магнитные	± 0.20	± 2.0
	Телесистемы с проводным каналом	± 0.15	± 1.5
	Телесистемы с гидравлическим каналом	± 0.10	± 1.25
	Гироскопические инклинометры	± 0.10	± 1.25

Задачу оценки строительства скважины с надлежащим качеством, предполагающую расчёт соответствия эллипсоида неопределённости положения забоя с допустимой областью отклонения от проектного профиля, целесообразнее решать статистическими методами.

С помощью ковариационной матрицы ошибок геопространственного положения (см. формулу (22)) генерируется область неопределённости оси скважины.

Далее необходимо определить, насколько объем эллипсоида ошибок находится в области допустимых отклонений от проекта. Пространство допуска представляет собой цилиндр с круговым сечением горизонтальной плоскостью заданного радиусом допуска и высотой, равной удвоенному допуску отклонения по глубине (рисунок 16).

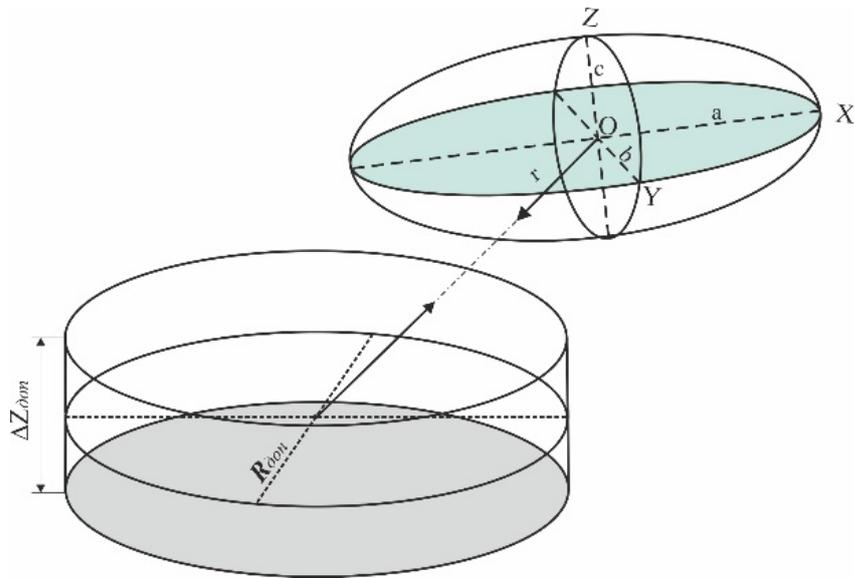


Рисунок 16 – Схема сопоставления эллипсоида неопределенности и допуска

В силу того, что построение математической модели в данном случае довольно затруднительно, вычисления предлагается выполнять методом статистических испытаний (метод Монте-Карло) [7, 37]. В пределах минимального параллелепипеда, содержащего предельный эллипсоид рассеяния (область неопределенности), случайным образом генерируются множество точек, являющихся случайной реализацией положения забоя скважины в пространстве, т. е. в процессе моделирования многократно реализуются случайные положения точки забоя. Плоскости минимального параллелепипеда касательны предельному эллипсоиду рассеяния и перпендикулярны осям эллипсоида. Затем определяется общее количество точек N , попавших в эллипсоид, из которых фиксируется p точек, которые находятся в пределах зоны допуска. Тогда отношение

$$q = \frac{p}{N} \quad (27)$$

будет оценкой близости забоя скважины к проектному положению. Поскольку количество генерируемых точек принимается $N = 100\,000$, ошибка не будет превышать нескольких десятых долей процента.

Для вычисления вероятности области неопределённости оси скважины необходимо выдвинуть гипотезу о законе распределения случайных вариантов расположения забоя скважины. Учитывая большое количество скважин в выборке с данными повторных измерений инклинометрии, предполагаем, что случайные погрешности координат забоев и оси скважины распределены по стандартному нормальному закону Гаусса. Поэтому в общем случае:

$$p(\bar{\Delta}_n) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |M_n|} e^{-\frac{1}{2} \bar{\Delta}_n^T M_n^{-1} \bar{\Delta}_n}, \quad (28)$$

где $\bar{\Delta}_n$ – случайный вектор размерности n , M_n – ковариационная матрица вектора $\bar{\Delta}_n$.

Представляя размеры пространства неопределенности в единицах сигма (стандартное отклонение), вероятность P области неопределенности S_k можно определить по следующей формуле [36]:

$$P(S_k) = \frac{\gamma\left(\frac{n k^2}{2}, \frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}, \quad (29)$$

где k – радиус области неопределенности в сигмовых единицах,

$\gamma()$ – неполная гамма функция:

$$\gamma(s, x) = \int_0^x t^{s-1} e^{-t} dt, \quad (30)$$

$\Gamma()$ – гамма-функция Эйлера:

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty t^{s-1} e^{-t} dt. \quad (31)$$

2.5 Выводы по разделу 2

В условиях отсутствия альтернативных методов контроля параметров оси скважин оценить точность проводки возможно лишь путем проведения многократных повторных наблюдений инклинометрии.

Как показывает международная практика, современные модели накопления погрешностей и методики обработки инклинометрических данных не учитывают

корреляции измеренных параметров на смежных интервалах при проведении инклинометрических съёмок, а это, в свою очередь, может занижать размер эллипсоида неопределённости положения ствола скважины.

Приведённые выше закономерности определяют зависимость измерений граничащих интервалов при проведении инклинометрии скважин и, следовательно, влияют на расчет величины эллипсоидов погрешностей оси скважины, тем самым увеличивая параметры области неопределённости. В стандартную методику расчета параметров области неопределённости внесены дополнения, учитывающие зависимость измеряемых величин в соседних точках измерений.

Описанные ISCWSA статистические подходы основаны на производственных материалах западных нефтепромыслов. В диссертационном исследовании для вывода и проверки закономерностей использовались реальные данные повторной инклинометрии скважин с нескольких месторождений в Западной Сибири. Поэтому определение области допуска попадания забоя скважины в соответствии с проектным положением в виде эмпирических зависимостей или расчетных размеров должно происходить для конкретного месторождения или группы месторождений со сходными горно-геологическими и технологическими условиями разработки.

В текущем разделе приведено теоретическое обоснование решения одной из важных задач инклинометрической съёмки скважин – совпадения эллипсоида неопределённости забоя скважины и области допуска от проектного положения: с помощью метода статистических испытаний вычислено совпадение эллипсоида неопределённости положения забоя с допустимой областью отклонения от проекта.

3 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВТОРНОЙ ИНКЛИНОМЕТРИИ

3.1 Предварительный анализ данных повторной инклинометрии

Из-за особенностей метода и технологии проведения инклинометрической съёмки в нефтегазовых скважинах и обработки результатов полученных измерений, стандартные подходы для оценки точности и корреляционного анализа геодезических измерений, представленных в [3, 27, 39, 70, 72], не подходят.

Предварительные теоретические предположения в общем случае соответствуют положениям, изложенным в разделе 2. Далее в исследовании оценки точности инклинометрии рассматриваются равноточные результаты измерений инклинометрии скважин, полученные инклинометрами примерно одного класса точности, и при выполнении на основе единого физического принципа – методом гироскопической съёмки. Для статистического анализа точности инклинометрии были отобраны скважины, для которых было выполнено хотя бы два гироскопических замера во временном интервале за последние 20 лет. Зенитные углы в скважинах, исследуемой выборки скважин не превышают 30° .

В программном комплексе «Wells» [75] была создана база данных по повторной гироскопической инклинометрии с введением 198 скважин месторождений Западной Сибири, с глубиной от 2 000 до 2 700 м и интервалами между измерениями в 10 м.

При анализе повторной гироскопической инклинометрии скважин (рисунок 17) встречаются четыре основных варианта отклонений. Рисунок 17, *a* характеризует стандартный вид отклонений положения забоев до 50 м и закономерным возрастанием разности значений измерений с увеличением глубины. Такой размер отклонений вписывается в круг допуска при повторных измерениях. На рисунке 17, *б* изображен вариант разностей в положении повторных замеров на забоях от 50 до 300 м со значительным систематическим отклонением скважин. Количество таких отклонений в измерениях по скважинам в представленной выборке составляет до 10 %.

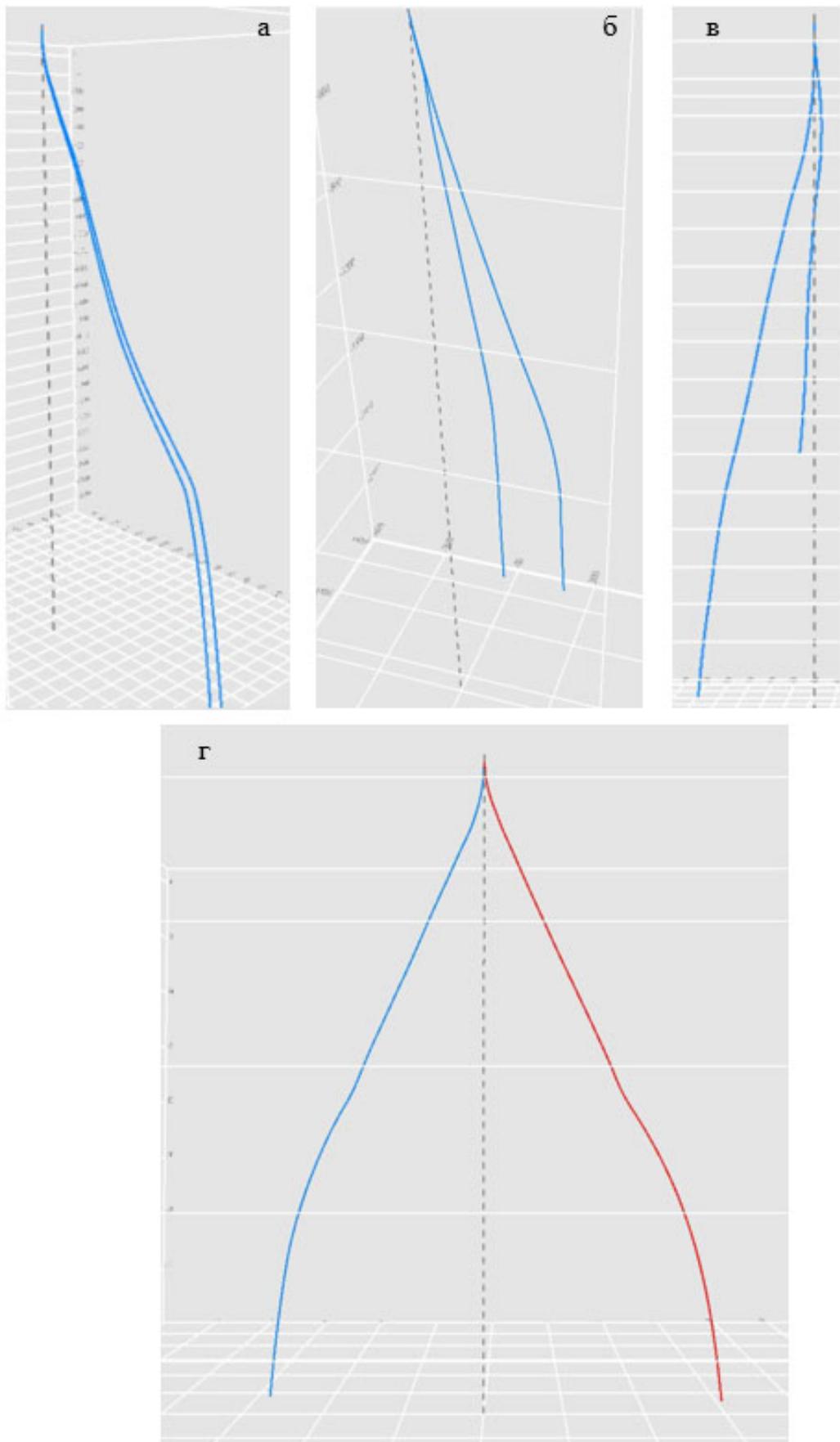


Рисунок 17 – Различные варианты отклонений повторных измерений при инклинометрической съёмке скважин

Рисунок 17, в описывает те случаи, когда по различным причинам исследования проводились не на всю глубину скважины, однако отклонения координат забоев соответствуют варианту, представленному на рисунке 17, б. Очень редко в выборке встречается тип расхождения измерений, представленный на рисунке 17, з, указывающий на явные «человеческие» ошибки, связанные с грубыми ошибками измерений, неправильной идентификацией измерений по скважинам или типов инклинометров при расчете азимутального угла, которые приводят к отклонениям положения забоя более 300 метров. В случае обнаружения в базе данных отклонений такого типа (рисунок 17, з), все данные по измерениям инклинометрии скважины должны быть тщательно проанализированы. По возможности необходимо выполнить поиск первоисточника измерений с корректировкой ошибочной инклинометрии, или таковые замеры должны быть исключены из производственных материалов во избежание использования маркшейдерской службой неверных данных о местоположении скважины.

Для дальнейшего анализа измеренных параметров из двух измерений скважины необходимо выполнить подготовку данных и привести к единому представлению. Затем отфильтровать явно ошибочные измерения.

3.2 Способ сравнения координат оси скважины при повторных измерениях

Для оценки точности результатов инклинометрических измерений, как и других геодезических параметров, можно использовать разности двойных измерений [27]. Поэтому при сравнении измеренных параметров пространственного положения скважин в процессе повторных исследований инклинометрии предлагается алгоритм со следующими этапами:

- 1 Загрузка в базу данных инклинометрии повторных гироскопических измерений.

- 2 Выполнение расчета оси скважины методом минимальной кривизны (предпочтительно, хотя возможно использование других методов расчета инклинограммы) по каждому измерению.

3 Из двух измерений поинтервально определяются координаты оси в точках измерений на равных глубинах от устья в соответствии с альтитудой стола ротора. Длина интервалов составляет 10 м, либо приводится к этому значению путем разращения точек измерения. Равенство глубины определяется с учетом точности измерений. Если глубины измерений не соответствуют друг другу, то координаты приводятся к первому измерению методом интерполирования отсутствующих значений.

4 Ось скважины представляется как плоская пространственная кривая (по аналогии с понятием соприкасающейся плоскости кривой в дифференциальной геометрии), в некоторой области вокруг точки измерения на определенной глубине. По трем точкам двух соседних интервалов строится плоскость. Таким образом, участок оси скважины состоит из двух соседних интервалов замера инклинометрии и образует соприкасающуюся плоскость к оси скважины.

В точке сравнения измерений оси i по векторам r_i, r_{i+1} повторных съёмов вычисляются координаты центра окружности.

Вектор погрешностей измерений r_{Δ_i} вычисляется из разностей координат двух измерений скважины:

$$r_{\Delta_i} = \begin{vmatrix} x_i^1 - x_i^2 \\ y_i^1 - y_i^2 \\ z_i^1 - z_i^2 \end{vmatrix}. \quad (32)$$

Единичные векторы системы координат $iXYZ$ определяются из выражения:

$$\bar{e}_Y = \begin{vmatrix} X_0 - X_i \\ Y_0 - Y_i \\ Z_0 - Z_i \end{vmatrix} \frac{1}{\sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2}}. \quad (33)$$

Для построения плоскости оси скважины выбираются соседние интервалы вверх и вниз по стволу скважины симметрично от точки сравнения измерений i (рисунок 18).

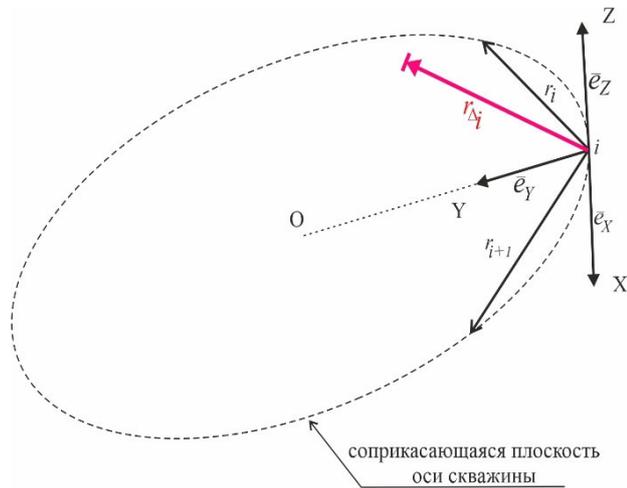


Рисунок 18 – Схема сравнения координат забоя скважины

Векторы \bar{r}_i, \bar{r}_{i+1} являются замыкающими, поэтому вектор \bar{e}_z определяется по следующим выражениям:

$$\bar{p} = (\bar{r}_i \cdot \bar{r}_{i+1}), \quad (34)$$

$$\bar{e}_z = \frac{1}{|\bar{p}|} \bar{p}, \quad (35)$$

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

а $|\bar{p}|$ – модуль вектора \bar{p} .

Вектор \bar{e}_x определяется из формулы:

$$\bar{e}_x = (\bar{e}_y - \bar{e}_z). \quad (36)$$

Область сравнения можно расширить до двух-трех вверх и вниз граничащих интервалов и вычислить некоторую усредненную плоскость (рисунок 19).

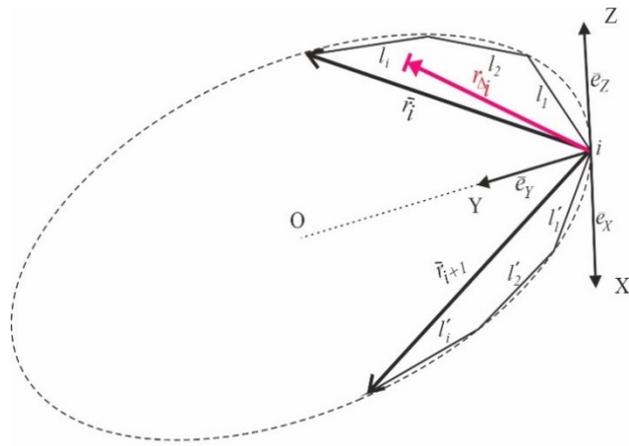


Рисунок 19 – Схема сравнения координат, расширенная на три интервала

Затем для каждого интервала в точке сравнения парных измерений вычисляются отклонения координат в плоскости оси скважины по отношению к центру O:

$$\Delta_Y = (r_{\Delta_i} \cdot \overline{e_Y}). \quad (37)$$

В плоскости оси скважины, по нормали к этой плоскости:

$$\Delta_Z = (r_{\Delta_i} \cdot \overline{e_Z}). \quad (38)$$

По направлению касательной к плоскости оси скважины:

$$\Delta_X = (r_{\Delta_i} \cdot \overline{e_X}). \quad (39)$$

А также линейное отклонение:

$$\Delta_l = |r_{\Delta_i}|. \quad (40)$$

Для разных скважин отклонения, вычисленные по разностям азимутальных и зенитных углов, объединяются в группы по одинаковым интервалам от устьев скважин. Значения в каждой такой группе являются независимыми однородными случайными величинами при реализациях случайного процесса измерений.

5 Для каждой группы интервалов вычисляется среднее арифметическое значение и дисперсия по следующим формулам:

$$m_i = \frac{[\Delta_j^{(i)}]}{N_i}, \quad (41)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{[\delta_j^{(i)} \delta_j^{(i)}]}{N_i - 1}}, \quad (42)$$

где m_i – среднее арифметическое значение в группе i ;

S_i – стандартное отклонение случайных составляющих $\delta_j^{(i)}$ 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 , определяется из выражения:

$$\delta_j^{(i)} = \Delta_j^{(i)} - m_i. \quad (43)$$

Таким образом, способ сравнения векторов отклонений из парных измерений позволил привести накопленный материал к единому представлению и подготовить данные к автокорреляционному анализу.

3.3 Механизм фильтрации измерений

После расчета отклонений координат парных измерений по направлениям из формул (37)–(40) и формирования групп по глубинам интервалов составлены графики, обобщающие отклонения всех скважин выборки (рисунок 20, *a–в*). Синяя линия на графиках обозначает медианные средние значения для приведенной величины. Использование медианных значений применяется для снижения случайных всплесков в графиках. Медианная фильтрация меньше подвержена влиянию больших отклонений («ураганных отклонений»). На рисунке 20, *г* приведены линейные смещения забоя второго измерения относительно первого для всех скважин из выборки.

Из графиков понятно, что в текущей выборке имеются измерения, выбивающиеся из общей картины отклонений. Кроме того, в отклонениях координат, рас-

считанных в плоскости оси скважины по направлениям, систематическая составляющая погрешностей измерений превышает случайные ошибки. Такие отклонения могут быть обусловлены присутствием в выборке искаженных измерений, вызванных поломками инклинометров, ошибками верификации замеров по скважинам, человеческим фактором и т. д.

Судя по графикам (рисунок 20) отклонения координат в плоскости скважин, рассчитанные по направлениям, довольно существенные. На рисунке 21, д изображены графики линий тренда разностей азимутов. Для разностей азимутов на рисунке присутствует большое число графиков со значительным отклонением угла линии тренда от горизонтали. Поэтому для дальнейшего исследования и вычленения из выборки таких измерений необходимо применять подходящий математический способ фильтрации качественных данных. В качестве такого механизма предлагается использовать уравнение тренда изменения разностей азимутов. Экспериментальным путем установлено, что наиболее оптимальной величиной допуска при использовании тренда разностей азимутов является значение тренда в 20° . Принимая во внимание географическое положение скважин выборки, где величина магнитного склонения в среднем находится около значения в 20° , вполне вероятно, что некоторые из представленных в выборке измерений в первоисточнике были ошибочно идентифицированы по типу инклинометра с необоснованным применением поправки на угол магнитного склонения. Тому же, сам факт наличия повторных гироскопических измерений в скважине может косвенно указывать на наличие грубых ошибок в некоторых парах измерений гироскопической инклинометрии.

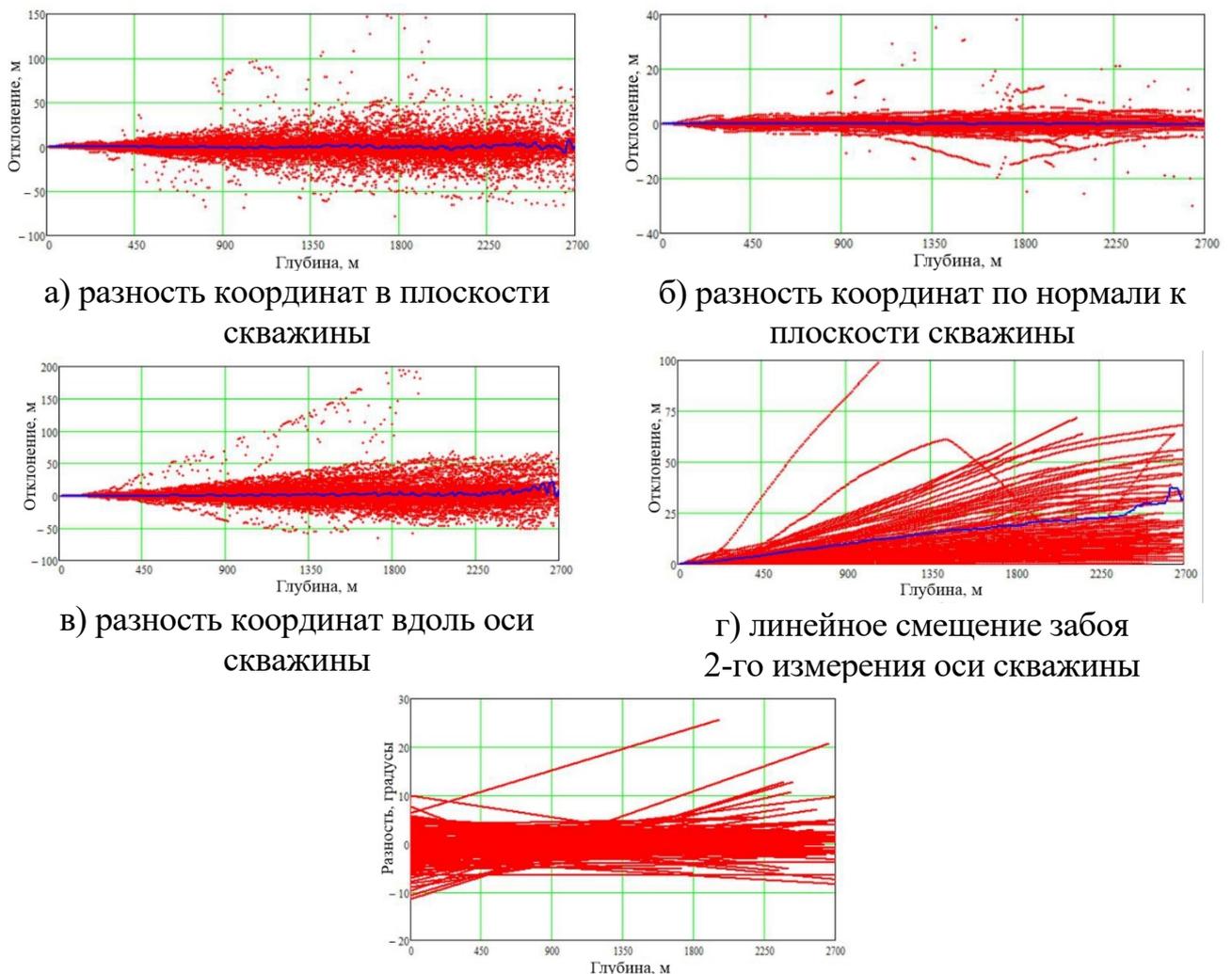
После отбраковки двойных замеров по тренду разности азимута из выборки исключено около 30 % измерений, т.е. в выборке осталось 127 скважин от первоначальной. Эта величина отклонений косвенно согласуется со схожими процентными показателями при исследовании отклонений забоев при массовом сравнении гироскопических и магнитных замеров в работах [38, 46].

Как известно из паспортных характеристик гироинклинометров, определение зенитных углов выполняется на порядок точнее, чем азимутальных. В связи с этим

для целей текущего исследования решено использовать допуск именно по величине отклонений тренда разностей азимута, а не зенитного угла.

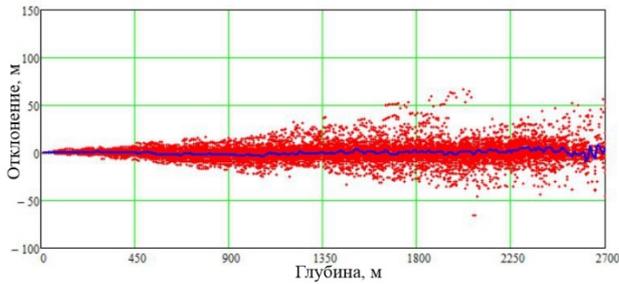
Таким образом, исключение явно ошибочных измерений позволило сократить значения исследуемых параметров и подготовить статистический материал для дальнейшего автокорреляционного анализа отклонений с помощью аппарата случайных функций. Далее для исследования вероятностных статистических характеристик двойных гироскопических замеров инклинометрии будет использоваться выборка, оставшаяся после фильтрации первичной выборки по величине тренда разностей азимутов в 20° .

На рисунках 21, а–д приведены те же расчетные параметры скважин после фильтрации по величине тренда разностей азимутов (127 скважин).

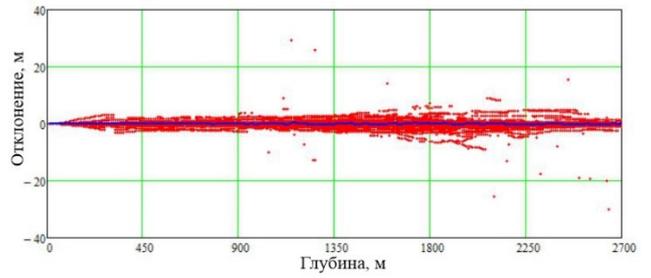


д) графики линий тренда разностей азимутов

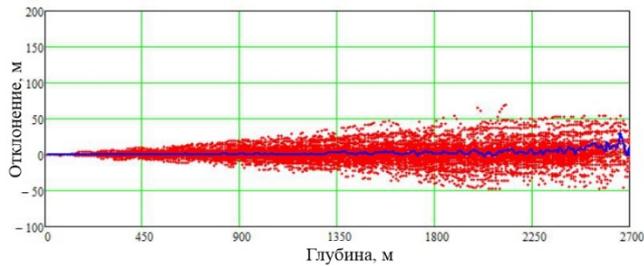
Рисунок 20 – Графики содержат некорректные измерения



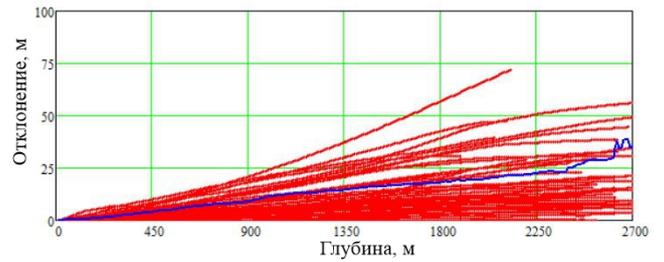
а) разность координат в плоскости скважины



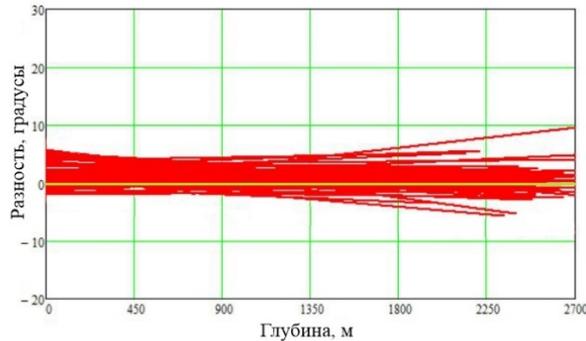
б) разность координат по нормали к плоскости скважины



в) разность координат вдоль оси скважины



г) линейное смещение забоя 2-го измерения оси скважины



д) графики линий тренда разностей азимутов

Рисунок 21 – Графики отфильтрованы по разностям азимутов

3.4 Статистический анализ отклонений

На графике (рисунок 22) изображены сводные кривые, характеризующие средние значения отклонений, вычисленные из формул (37)–(40) по глубинам интервалов:

- M_x – в плоскости оси скважины;
- M_y – по нормали к плоскости оси скважины;
- M_z – по направлению касательной к оси скважины;
- M_L – линейное отклонение.

Стандарты случайных составляющих S_x , S_y , S_z и SL , соответственно вычисленные по направлениям в плоскости оси скважины и скомпонованные в группы по глубине интервалов. Линия M_t – математическое ожидание линейного смещения забоя, определенное в соответствии с инструкцией [77], учитывающее паспортные характеристики точности приборов при измерении зенитных углов и азимутов при стандартном предположении ISCWSA, не подразумевающим зависимость соседних интервалов измерений.

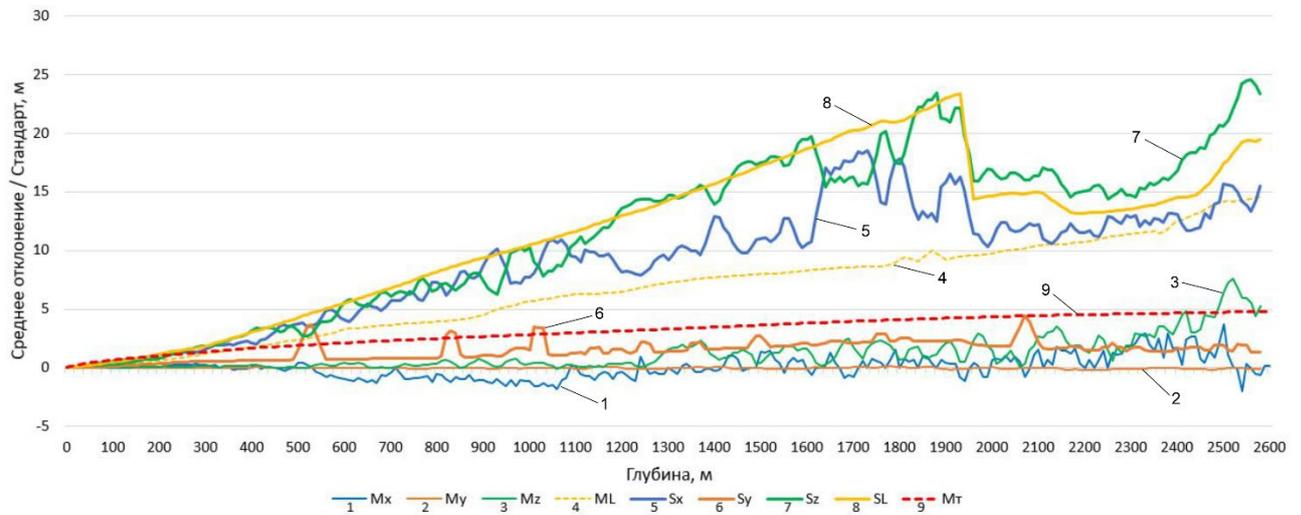


Рисунок 22 – Графики средних значений отклонений и стандартов случайных составляющих

Существенное различие графиков, предполагаемых инструкцией M_t , и фактических линейных отклонений ML указывает, что теоретические линейные смещения осей скважин в два раза меньше полученных линейных смещений осей по результатам практических измерений

Результат измерения скважины рассматривается как случайная функция, тренд которой детерминирован некоторой измеренной осью скважины и размыт случайными погрешностями процесса последовательных измерений [8, 14]. Такой подход обусловлен последовательной связью измерений во времени и пространстве.

Первичные и повторные замеры оси скважины являются независимыми реализациями случайного процесса, отличающегося только набором возникающих в моменте измерения случайных погрешностей. Поэтому разности измеренных параметров и отклонения координат в соответствующих по глубине интервалах так же являются случайными функциями реализации одного случайного процесса.

Однако возникающий в процессе измерений случайный процесс классифицировать как стационарный нельзя, в связи с чем для анализа такого процесса требуется специальная методика определения статистических параметров.

Угловые и линейные измерения осей скважин составляют отдельные участки этого случайного процесса, который для угловых и линейных измерений принимается стационарным. Как будет показано далее, такой процесс можно считать эргодическим [8, 14].

Значения величин разностей (рисунок 23) показывают, что они носят случайный характер их рассеивания. Но после фильтрации в выборке еще присутствуют некоторое количество заметных отклонений по азимутам, которые можно объяснить некачественным измерением или ошибками верификации скважин.

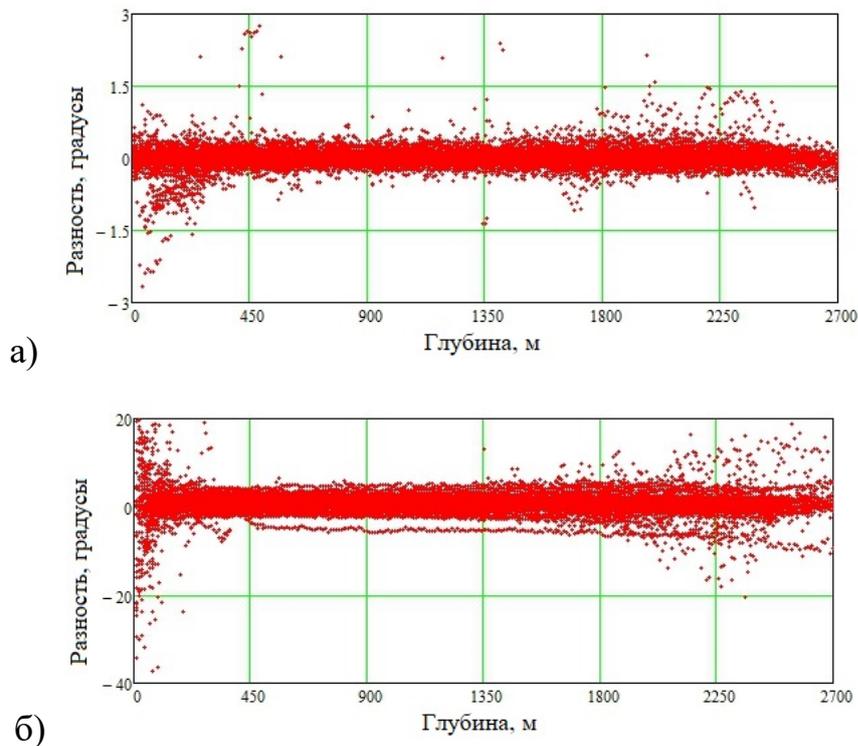


Рисунок 23 – Рассеяние разностей по глубине: а) зенитных углов; б) азимутов

Так как количество повторных измерений в выборке достаточно большое [16], были построены гистограммы распределения случайных величин (рисунок 24), по которым можно выдвинуть гипотезу об одном из известных законов распределения [61] разностей измеренных величин.

Случайные погрешности угловых измерений при инклинометрии скважин вызваны суммарным влиянием множества неконтролируемых факторов и при наличии достаточно большой выборки могут быть описаны одним из законов распределения согласно теории предельных распределений вероятностей.

Построенные по отклонениям координат оси скважины гистограммы имеют рассеяние, схожее с экспоненциальным распределением Лапласа, к которому может стремиться сумма случайных величин [14]. Пунктирные кривые на рисунке 24 аппроксимируют гистограммы функцией плотности вероятностей $g(x)$ следующего вида:

$$g(x) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{|x-\theta|}{\lambda}}, \quad (44)$$

где λ – масштаб распределения;

θ – местоположение распределения.

Приведенные на рисунке 24 значения параметров вычислены приближенно и являются ориентиром для более детальных исследований статистических свойств разностей отклонений в результатах повторной инклинометрии.

Однако для последующего использования некоторых вероятностных статистических свойств полученного распределения можно принять как рабочую гипотезу о том, что случайные величины отклонений в повторной инклинометрии распределены в соответствии с законом распределения Лапласа.

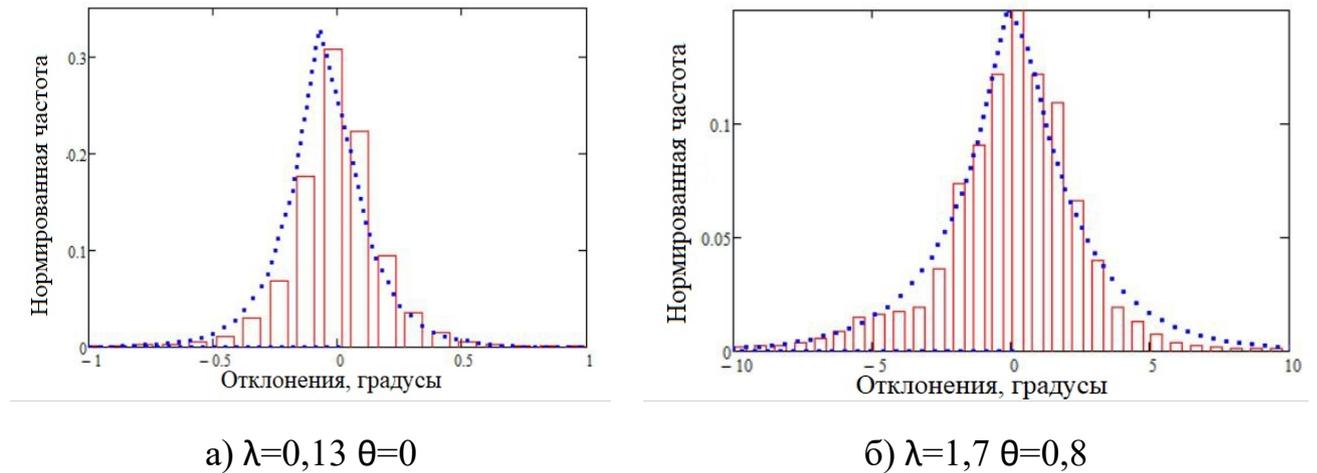


Рисунок 24 – Гистограммы разностей: а) зенитных углов; б) азимутов

Средние квадратические разности измеренных угловых величин по глубинам интервалов m_{h_i} можно вычислить по имеющейся совокупности скважин из выборки:

$$m_{h_i} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_j \delta_{i,j}^2}, \quad (45)$$

где h_i – глубина i -й точки от устья измерений;

N – количество скважин с повторной инклинометрией в выборке;

$\delta_{i,j}^2$ – разность измерений параметров инклинометрии в точке i скважины j (рисунок 25).

В призабойной зоне скважин значения средних квадратических разностей имеют довольно значительное рассеивание, что можно назвать граничным эффектом с характерным проявлением грубых погрешностей. В основной части графика погрешности отклонений скважин находятся в некоторой стабильной ограниченной области, которая и определяет точность инклинометрической системы.

Использование медианной оценки при выводе значения средних квадратических ошибок позволяет избежать влияния случайных всплесков [54], полученных в выборке после фильтрации по тренду разностей азимутов. В результате расчета получены срединные величины разностей:

$$\text{зенитные углы} - S_{zenit} = 0,18^\circ;$$

азимуты – $S_{azimut} = 2,17^\circ$.

Используя в качестве рабочей гипотезы предположение о том, что разности, как случайные величины, распределены по закону Лапласа, следует, что медианная оценка связана со средней квадратической разностью коэффициентом 2,04, т. е.

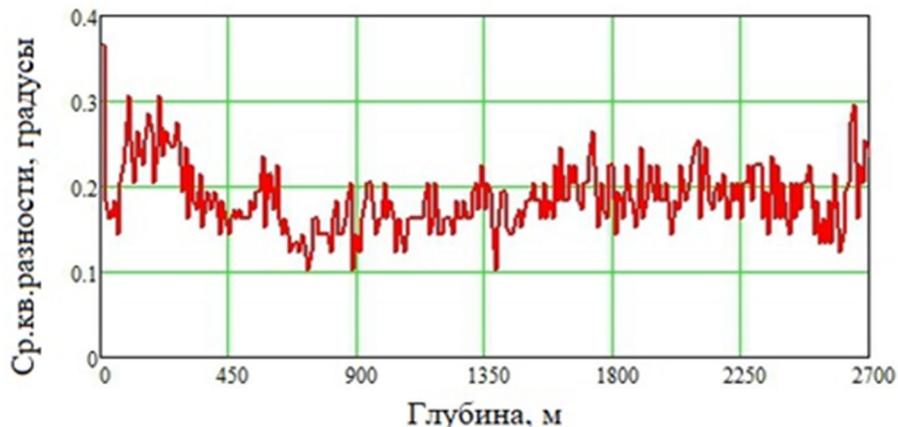
зенитные углы – $M_{zenit} = 2,04 \cdot S_{zenit} = 0,38^\circ$;

азимуты – $M_{azimut} = 2,04 \cdot S_{azimut} = 4,23^\circ$.

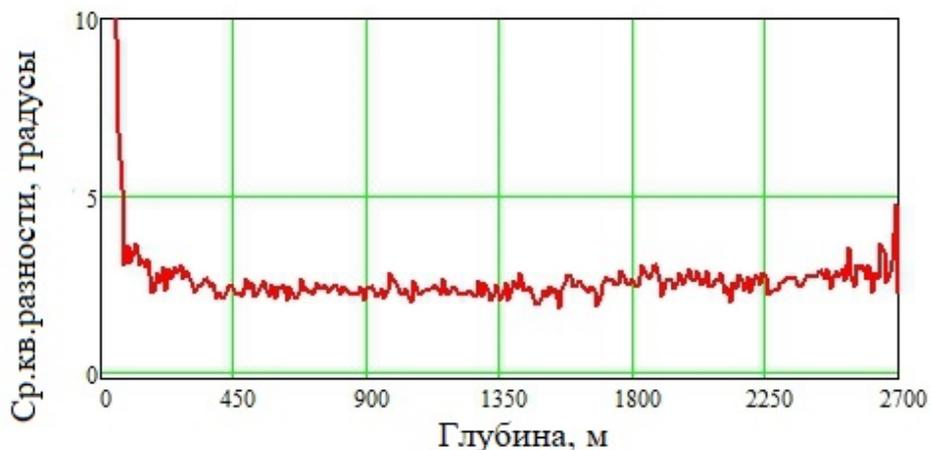
Исходя из того, что измерения в выборке принято считать равноточными, средние квадратические ошибки одного измерения составят:

зенитные углы – $m_z = \frac{M_{zenit}}{\sqrt{2}} = 0,27^\circ$;

азимуты – $m_\alpha = \frac{M_{azimut}}{\sqrt{2}} = 2,99^\circ$.



а)



б)

Рисунок 25 – Величины средних квадратических разностей по глубине:

а) зенитные углы; б) азимуты

В результате определены важные статистические характеристики разностей угловых измерений как стационарного случайного процесса: среднее значение и дисперсия. Полученные значения статистических параметров стоит рассматривать как приближенные в связи с тем, что для их расчета применена совокупность из 127 скважин, которые остались после фильтрации выборки по тренду разностей азимутов.

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

$$R(\tau) = \frac{1}{N} \sum_l^{N_\tau} \frac{\delta_i \delta_{i+\tau}}{\sigma^2} \{i \in l \dots n\}, \quad (46)$$

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

n – количество интервалов измерений оси;

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

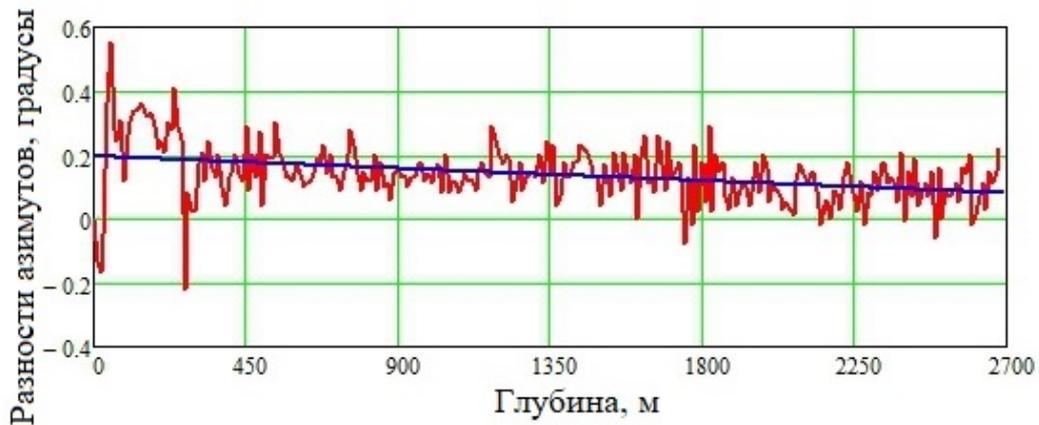


Рисунок 26 – График разностей азимутов по глубине (красная линия) и линейный тренд их изменения (синяя линия)

Изменения разностей угловых измерений одной скважины из выборки имеет выраженный линейный тренд (рисунок 26). Некоторые скважины имеют тренд разностей азимутов, значительно отклоняющийся от горизонтали, что может говорить

о неучтенных систематических погрешностях в одном из измерений, которые не были учтены при обработке данных сырой инклинометрии в соответствии с методикой комитета ISCWSA. Справедливо отметить, что подавляющее большинство трендов в выборке близки к горизонтальному направлению оси.

Таким образом, анализ трендов разностей азимутов в выборке может рассматриваться в качестве показателя надежности и кондиционности инклинометрических измерений, а также основанием для исключения скважины из выборки, как не пригодной для статистической оценки (рисунок 27).

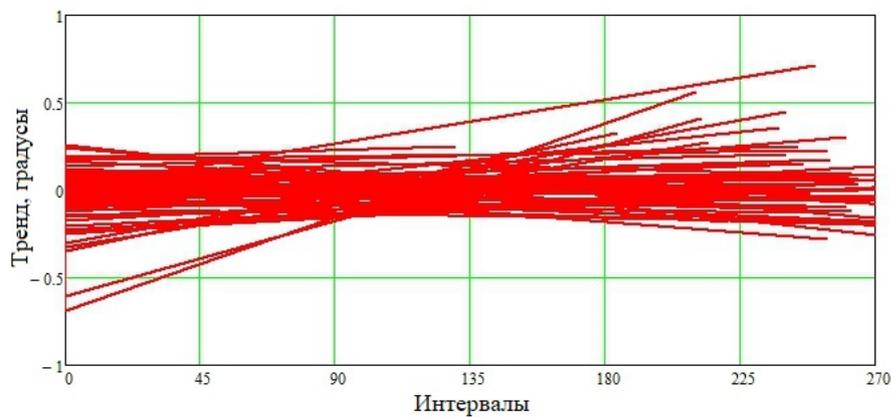


Рисунок 27 – Графики линейного тренда разностей зенитных углов

Графики корреляционных функций разностей измерений зенитных углов и азимутов для одной из скважин упомянутой выше выборки приведены на рисунке 28.

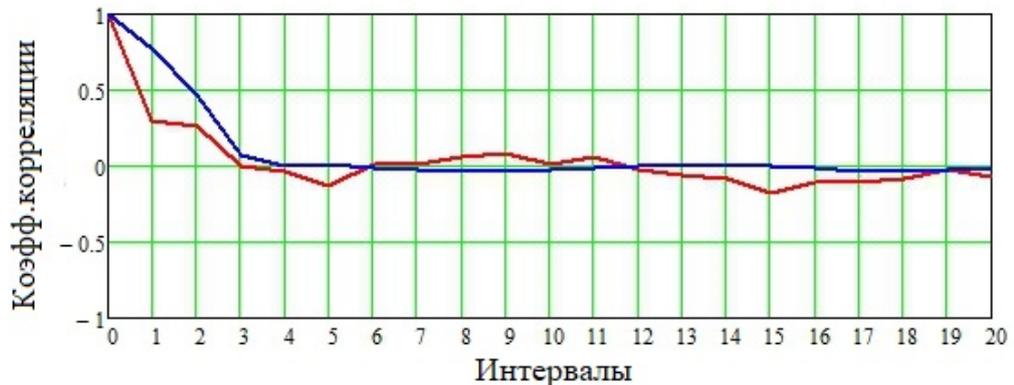
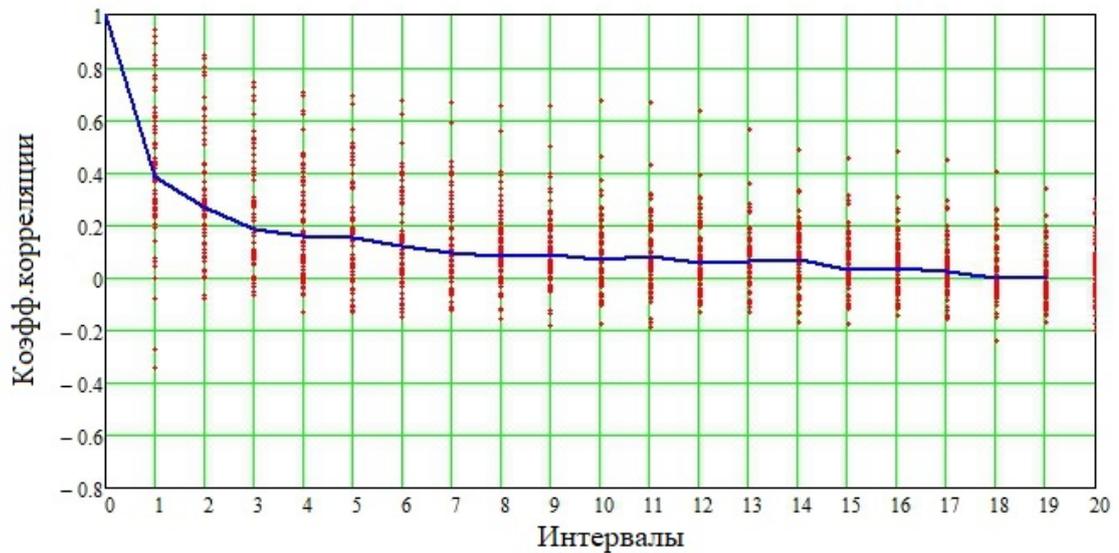
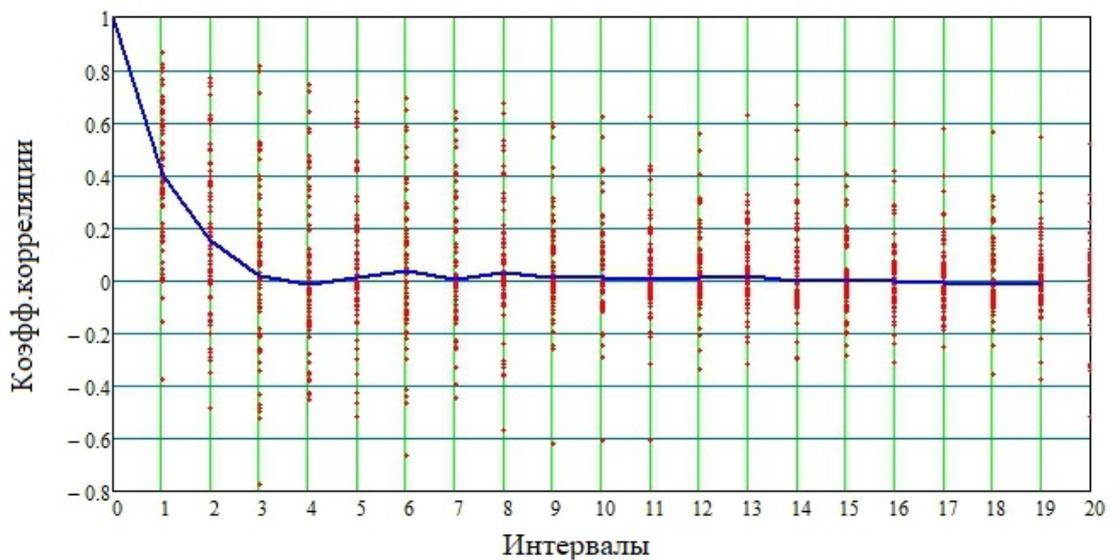


Рисунок 28 – Корреляционные функции разностей:
зенитные углы (красный), азимуты (синий)

Кроме того, общая тенденция графиков корреляционных функций разных скважин схожа и приведена на рисунке 29. Графики корреляционных функций скважин случайны, по мере возрастания удаленности интервалов τ от точки сравнения координат стремятся к нулю. Обобщенный вид корреляционной функции отражает линия медианного среднего (синий цвет). Случайные погрешности угловых величин измерений в граничащих интервалах по оси скважины имеют положительную статистическую зависимость с коэффициентом корреляции около $+0,5$ и более в зависимости от применяемого оборудования.



а) зенитные углы



б) азимуты

отдельные скважины – точки красного цвета; медианное среднее – синий

Рисунок 29 – Графики корреляционных функций выборки скважин

Во втором разделе рассматривалась модель накопления инструментальных погрешностей измерений с учетом корреляции при расчете приращений координат смежных интервалов.

Установленное выше значение коэффициента корреляции угловых измерений в точках измерения на соседних интервалах обуславливает актуальность дальнейших исследований влияния коррелированности между интервалами на накопление погрешностей в результатах инклинометрии.

С учетом выявленной выше коррелированности 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:

$$M_{j,j+1} = \begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 & 0 & \varepsilon_\theta \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 & 0 & 0 & \varepsilon_\alpha \sigma_\alpha^2 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\theta \sigma_\theta^2 & 0 & 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\alpha \sigma_\alpha^2 & 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 \end{vmatrix}, \quad (47)$$

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

Для обозначения субматриц погрешностей измерений на концах смежных интервалов ковариационной матрицы (47) примем следующие обозначения:

$$m_j = \begin{vmatrix} \sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\alpha^2 \end{vmatrix}, \quad m_{j,j+1} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\theta \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\alpha \sigma_\alpha^2 \end{vmatrix}. \quad (48)$$

Тогда матрица $M_{j,j+1}$ преобразуется:

$$M_{j,j+1} = \begin{vmatrix} m_j & m_{j,j+1} \\ m_{j,j+1} & m_{j+1} \end{vmatrix}. \quad (49)$$

В соответствии с принятыми обозначениями, ковариационную матрицу M всей совокупности измерений представить в следующем виде:

$$M = \begin{vmatrix} m_1 & m_{1,2} & & \dots & 0 \\ m_{1,2} & m_2 & m_3 & \dots & 0 \\ 0 & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & m_{n-2,n-1} & m_{n-1} & m_{n-1,n} \\ 0 & \dots & & m_{n-1,n} & m_n \end{vmatrix}. \quad (50)$$

Последовательным вычислением приращений координат оси по каждому интервалу и их суммированием находят координаты точек оси скважины.

Формулу (16) с учетом выражения (15) представим в следующем виде:

$$\Delta X_k = |F_{1,1} + F_{2,1} + F_{2,2} + F_{3,2} \dots + F_{k-1,k-1} + F_{k,k-1} + F_{k,k}| \Delta y, \quad (51)$$

где Δy – общий вектор погрешностей измеренных величин, т. е.

$$\Delta y = \begin{vmatrix} \delta r_1 \\ \delta r_2 \\ \vdots \\ \delta r_k \end{vmatrix}.$$

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

$$M_{\Delta X_k} = F \cdot M \cdot F^T, \quad (52)$$

где F – блочная матрица строка в формуле (51).

Далее были построены графики, характеризующие границы неопределенности скважины по глубине (рисунок 30). Координаты графика 1 получены по фактическим предельным разностям координат оси скважины из двойных измерений инклинометрии для всей совокупности выборки скважин. Для сглаживания значительно отклоняющихся значений разностей вместо среднего арифметического применилось медианные значения для каждой исследуемой глубины. Кривая 2 характеризует собой ожидаемые значения предельных допустимых отклонений координат двойных измерений, определенных по методике из инструкции [77] с уточнением из работы [51]. Кривая 3 вычислена при дополнении инструкции формулами

(12)–(17) и (51)–(52), полученными в ходе данного исследования, и величиной коэффициента корреляции соседних интервалов инклинометрической съёмки с учетом $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_\theta = 0,5$.

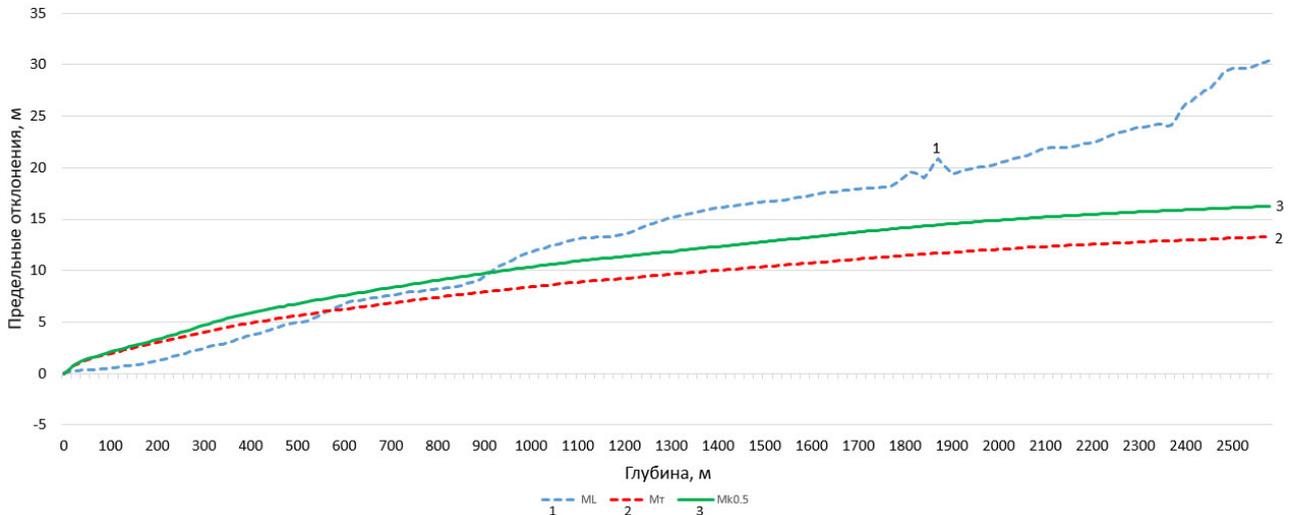


Рисунок 30 – Границы неопределенности положения скважины по глубине

Корреляционная зависимость на концах соседних интервалов измерений только частично объясняет различия между ожидаемыми и фактическими отклонениями в координатах. И есть основания полагать, что с увеличением глубины на процесс измерений имеют действие какие-то неучтенные систематические факторы процесса измерений.

3.5 Выводы по разделу 3

В третьем разделе описаны этапы статистического анализа данных повторной гироскопической инклинометрии скважин, предложены новые подходы к подготовке статистического материала посредством использования метода сравнения координат в плоскости скважин и фильтрации некорректных измерений с помощью уравнения тренда разностей азимутов.

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.

Переход к анализу формы участков скважины с помощью предложенного алгоритма сравнения координат повторных измерений позволяет однозначно распределять проекции вектора отклонения, привязывая их к изменению именно формы скважины в подземном пространстве без учета направления систем координат, в которых выполнены съёмки. Метод дает возможность анализировать результаты инклинометрии равноточных инклинометрических съёмок на примере гироскопических измерений. В перспективе дальнейших исследований необходима апробация метода на других данных, выполненных по технологиям гироскопической, магнитометрической или телеметрических съёмок независимо от систем координат, в которых записаны координаты скважин, и ориентирования направления азимута (магнитный или истинный). Таким образом, указанный подход для сравнения координат оси из повторных измерений позволяет привести пространственную информацию к единообразному виду и подготовить основу для исследования с помощью автокорреляционного анализа.

Экспериментальным путем определен критерий допуска на тренд разностей азимутов с величиной в 20° , в результате которого отбраковке подверглось около 30 % ошибочных измерений замеров инклинометрии. В случае с выборкой по гироскопическим съёмкам, после фильтрации выборка сократилась, соответственно снизились значения отклонений, угловых параметров в скомпонованных по глубинам интервалов группах. Описанный метод фильтрации ошибочных измерений позволяет определить измерения, выполненные с грубыми ошибками.

Описанная методика фильтрации недостоверных измерений на основе тренда разностей азимутов может быть полезна для маркшейдерских и геофизических служб предприятий при оценке точности проведения повторной инклинометрии скважин.

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.

В результате анализа установлено, что теоретические допустимые погрешности повторных съёмов, определенные по действующим в РФ нормативным документам [77, 78], в два раза ниже фактических линейных отклонения координат скважин по результатам массового исследования повторной гироинклинометрии. В процессе статистического анализа выявлено наличие в разностях угловых измерений линейного тренда. Эти два факта указывают на то, что теория накопления ошибок положения оси и забоя скважины не соответствуют практике и возможно не учитывают влияния каких-то систематических факторов на процесс измерений инклинометрии. В результате исследования доказано, что существующая методика расчета ожидаемой ошибки определения оси скважины не соответствует практическим результатам инклинометрических измерений.

На основе повторных измерений инклинометрии скважин исследованы вероятностные статистические характеристики разностей азимутальных и зенитных углов в точках сравнения оси скважины.

Исследованы некоторые свойства накопления погрешностей в определении осей скважин, которые могут быть использованы как нормативные параметры в требованиях при оценке соответствия результатов бурения проектному положению.

Предложен новый алгоритм расчета области неопределенности положения оси скважины в пространстве с учетом выявленных вероятностных свойств погрешностей измерений. Метод улучшает надежность расчета ожидаемых ошибок определения оси скважины.

Впервые на основе ошибок повторных измерений инклинометрии установлена положительная корреляционная зависимость и рассчитано значение коэффициента корреляции угловых измерений в точках измерений на соседних интервалах, что

актуально для дальнейших исследований закономерностей накопления погрешностей в связи с коррелированностью между соседними интервалами инклинометрии.

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 (в зависимости от конфигурации профиля скважины).

Справедливо отметить, что выявленная корреляционная зависимость граничащих интервалов измерений в полной мере не объясняет различия между ожидаемыми расчетными и фактическими отклонениями координат при повторных съёмках.

Уточнение полученных закономерностей требует расширенного детального статистического анализа производственных данных с учетом типов скважин и применяемых инклинометров на максимально возможном числе многократных измерений.

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ

Информация о всех инклинометрических съемках, результатах измерений геодезических параметров положения скважин в пространстве, датах, типах приборов должна храниться в БД маркшейдерско-геодезической информационной системы. Эффективность использования информации, содержащей данные о геопрограмственном положении скважин, зависит от организации данных и механизмов извлечения этих данных целью для их анализа для принятия проектных решений.

Программная реализация [69] маркшейдерско-геодезической информационной системы «Анализ инклинометрии» выполнена в соответствии с алгоритмами, изложенными в разделах 2 и 3 [49, 50, 51]. Информация хранится в БД, структура которой описана в Руководстве пользователя «Контроль проводки скважин» ('Wells') [76].

Модуль «Контроль проводки скважин» (сокращенное название "Wells"), предназначен для формирования пространственных осей скважин по данным, полученным в ходе инклинометрических съемок скважин. Также в модуле предусмотрена функция для построения эллипсоидов неопределенности геопрограмственного положения скважин, оценки качества бурения скважины, контроля проводки по данным телеметрии или инклинометрии.

Программа «Анализ инклинометрии» разработана для осуществления выборки данных измерений инклинометрических исследований скважин из базы данных, их предварительной обработки для целей автокорреляционного анализа методом случайных функций и поиска закономерностей в накоплении погрешностей определения положения оси скважин. При предварительной обработке данные измерений инклинометрии приводятся к локально-кусочным плоскостям скважины, что позволяет исключить систематические погрешности ориентирования инклинометра и погрешности определения магнитного азимута [69].

В этом разделе кратко описывается последовательность действий и операций по импорту данных инклинометрии в БД «Wells», последующей обработке результатов измерений, их статистическому анализу и изучению закономерностей накопления ошибок в маркшейдерско-геодезической системе «Анализ инклинометрии».

4.1 Алгоритм программы «Анализ инклинометрии»

В общем виде схема обработки и анализа инклинометрических данных сводится к следующим этапам:

- занесение результатов всех доступных измерений инклинометрии по каждой скважине в БД с вводом информации по типу применяемого оборудования, датой измерения, пространственных параметров (координаты устьев скважин и альтитуды стола ротора) и расчетом положения оси скважины (процедура описана в 4.2);
- определение критериев для выборки скважин (типы приборов, которыми были выполнены измерения, даты измерений, типы конфигурации профилей скважин, географическое положение, геофизический подрядчик и т. д.) из БД;
- непосредственное осуществление выборки скважин, по определенным выше критериям;
- расчет и извлечение разностей измеряемых параметров при инклинометрии скважин из БД (процедура описана в 4.4);
- расчет параметров автокорреляции по разностям азимутальных и зенитных углов в программном обеспечении MathCAD.

Для статистической обработки и расчета параметров автокорреляции по разностям данных повторной инклинометрии установлен следующий порядок обработки выборки скважин:

1 Подготовка текстового файла с перечнем идентификаторов (номеров), выбранных для исследования скважин. Данные по скважинам располагаются в последовательном порядке, число строк переменное. Подготовленный файл с выбранной группой повторных измерений скважин (например, «Gintel_1_2.txt») выбирается в массив Dat. Скважина описывается следующими строками:

1-я строка содержит <имя скважины >, остальные столбцы содержат <0>.

2-я строка и последующие строки в содержит данные в столбцах:

–столбец 0 – глубина по стволу точки первого измерения скважины, м;

–столбец 1 – зенитный угол первого измерения скважины, град.;

–столбец 2 – азимут первого измерения скважины, град.;

–столбец 3 – глубина по стволу точки второго измерения скважины, м;

–столбец 4 – зенитный угол второго измерения скважины, град.;

–столбец 5 – азимут второго измерения скважины, град.;

–столбец 6 – глубина точки забоя скважины, м;

–столбец 7 – разность координат забоя, разница второго и первого измерений в плоскости оси скважины, м;

–столбец 8 – разность координат забоя, разница второго и первого измерений по нормали к плоскости оси скважины, м;

–столбец 9 – разность координат забоя, разница второго и первого измерений вдоль оси скважины, м;

–столбец 10 – линейное смещение забоя относительно первого измерения.

2 В ПО MathCAD выполняется функция $Oglaw1(D)$, в результате:

– азимуты приводятся к интервалу от -180 град. до $+180$ град.;

– зенитные углы устанавливаются со значениями больше нуля;

– определяются начало и конец строк каждой скважины;

– результат массивы $DatM$ и Ogl ;

– функция $Fsort(D)$ сортирует $DatM$ по глубине (результат $Dsort$);

– строятся профили осей скважин на отвесную плоскость.

3 Анализ закона распределения разностей по соответствующим гистограммам.

Подбирается функция $p(x, \alpha, b, c) = \alpha e^{\frac{-|x+c|}{b}}$, близкая к форме гистограмм, которая похожа на распределение Лапласа.

Для распределения Лапласа определяется соотношение СКО к серединной величине, которая соответствует медиане распределения.

Строятся графики 1 – 4 (Приложение Б) рассеяния отклонений координат по столбцам массива $Dsort$. Выполняется функция $FraznostKoord(Dsort, 10)$, результат

массив R, где для каждой глубины скважины вычисляется медианное среднее. Медиана используется для того, чтобы исключить влияние ураганных разностей для малых мощностей выборок. На графики 1 – 4 (Приложение Б) наносится линия медианных средних (синяя).

4 Для вычисления разностей зенитных углов и азимутов применяется функция RaznostUglov, в результате генерируется:

- массив Rsort из сортированных данных;
- массив PDat из несортированных данных;
- строятся графики рассеяния разностей углов;
- график рассеяние разностей азимутов в зависимости от величины соответствующего зенитного угла, функции $Faz=DazimForZenit(Rsort)$.

5 На основе анализа разностей зенитных углов азимутов строятся следующие графики:

- рассеяния средних разностей зенитных углов;
- рассеяния средних разностей азимутов;
- рассеяния СКО разностей зенитных углов;
- рассеяния СКО разностей азимутов;

6 Выполняется анализ разностей угловых измерений как случайных функций и построение автокорреляционных функций как отдельной скважины, так и общей функции для всей выборки скважин.

4.2 Импорт исходных данных

До начала работы с программой «Анализ инклинометрии» необходимо сформировать и наполнить базу данных инклинометрическими съёмками скважин. Для создания БД необходимо выполнить команду «Создать базу данных» через меню «Проект». Затем внести название в поле «Месторождение» и выполнить команду «Добавить запись». Внести номер куста в поле «Куст» и выполнить команду «Добавить запись». Команда «Выбрать» служит для активации записей в полях «Месторождение» и «Куст».

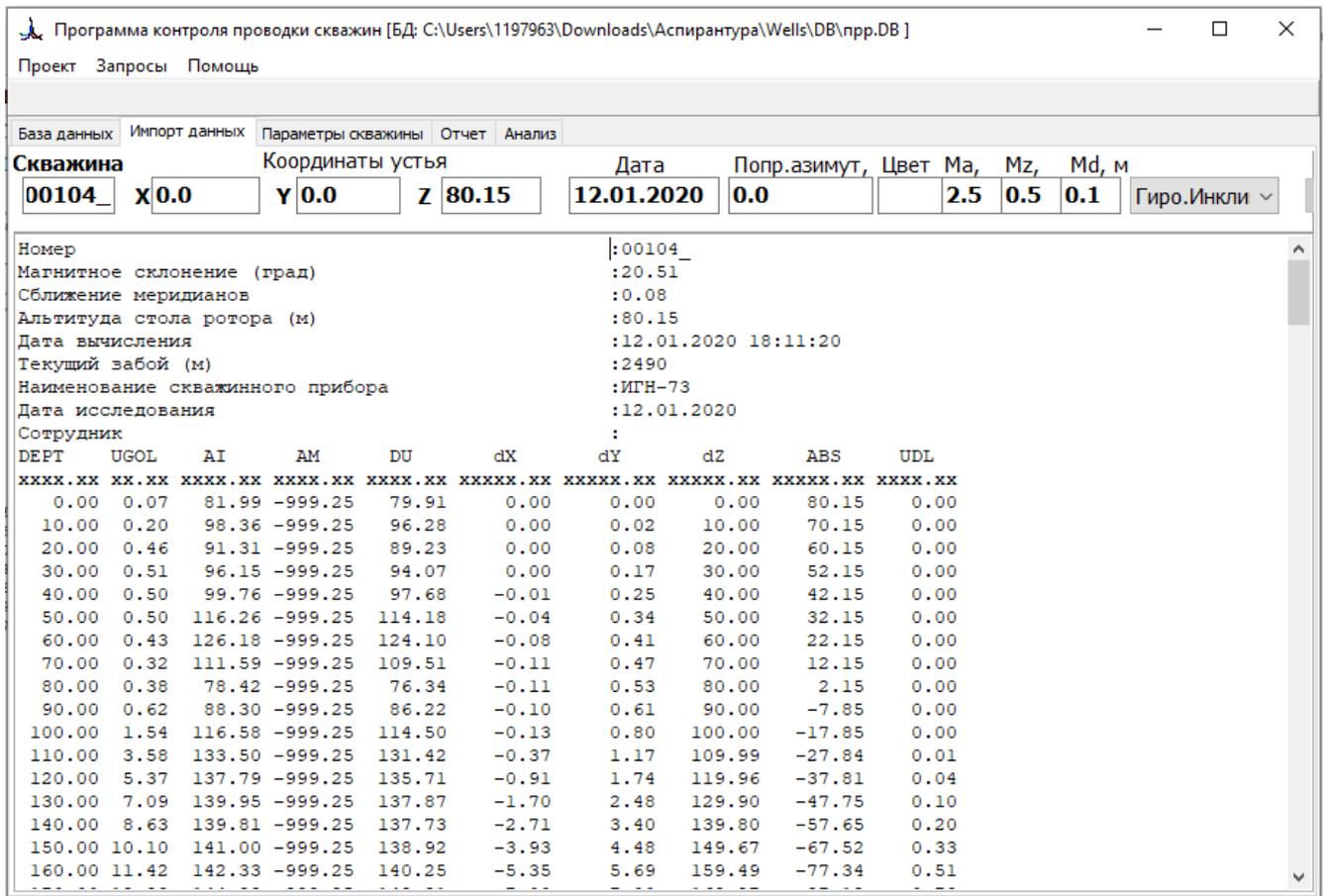


Рисунок 31 – Вкладка «Импорт данных»

После того, как выбраны месторождение и куст, можно приступить к импорту данных инклинометрии, для этого служит инструмент «Импорт данных по скважине», эта же команда дублируется из главного меню (рисунок 31). Данные в полях редактирования можно изменить.

В большинстве случаев данные фактической инклинометрии и проектные профили передаются в форматах *.xsl или *.xlsx или в текстовых форматах *.div, *.txt, *.zak. Эти форматы могут незначительно отличаться заголовками таблиц и информацией в конце таблицы (рисунки 32 и 33). Данные инклинометрии в табличных форматах следует пересохранить в файл текстового формата.

При загрузке инклинометрии в БД следует выбирать тип применяемого инклинометра или указать проектный профиль. При выборе типа будут заполнены поля «Ma» (ошибка измерения азимута), «Mz» (ошибка измерения зенитного угла), «Md» (ошибка измерения длины на отрезке 100 м). Данные для каждого типа скважин задаются в файле настроек программы «Wells.ini» (Приложение В).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
7	Скважина		2313Г		Куст.	24	Месторождение: Киньяминское						
8	Инклинометрия (сводное заключение)												
9													
10													
11	Альтитуда стола ротора, м								57.89				
12	Магнитная поправка, град.								15.91667				
13	Забой, м								3718				
14	Тип телесистемы								MWD				
15	Тип канала передачи информации								Электромагнитный / гидроканал				
16	Дата поверки телесистем/инклинометра								19.09.2019 / 07.11.2019 / 26.11.2019				
17													
18	Примечания:												
19													
20													
21	Интервал		N точ.		Прибор		Характеристика замера			Дата		Оператор	
22	Кондуктор 0-981 м		38		МЭС-50 №372/1090		Замер в процессе бурения			20.11.2019		Ялаев Р.А./Гараев Р.Р.	
23	Транспортный ствол 981-3298 м		90		CDST#40747		Замер в процессе бурения			26.11.2019		Барабаш А.В./Рианов А.В	
24	Хвостовик 3298-3718 м		18		IDS#59097		Замер в процессе бурения			05.12.2019		Барабаш А.В./Рианов А.В	
25													
26													
27													
28													
29													
30	№	Глубина	Зенит Угол	Азимут магнит.	Дир. угол смещ-ия	Смеще-ние	Удлине-ние	Абс. Глубина	Глуб. по вертикали	С-Ю	В-З	Простр. Инт-ть	Угл. Инт-ть
31		м	град.	град.	м	м	м	м	м	град.	град.	м	м
32	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
33	0	0.00	0.00	344.08	0.00	0.00	0.00	57.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	1	10.00	0.30	91.99	107.91	0.03	0.00	47.89	10.00	-0.01	0.03	0.30	0.30
35	2	20.00	0.60	91.99	107.91	0.11	0.00	37.89	20.00	-0.03	0.10	0.30	0.30
36	3	30.00	0.91	91.99	107.91	0.24	0.00	27.89	30.00	-0.07	0.23	0.30	0.30
37	4	40.00	0.92	99.62	108.95	0.40	0.00	17.89	40.00	-0.13	0.38	0.22	0.12
38	5	50.00	0.83	113.03	112.48	0.55	0.00	7.89	50.00	-0.21	0.51	0.22	0.09

Рисунок 32 – Данные фактической инклинометрии

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
12	ПРОФИЛЬ												
13	Скважина 55192Г куст 522 Приобское месторождение												
14	Вер. 2 от 21.07.2016												
15													
16													
17	Глубина по стволу	Зенитный угол	Азимут картогр.	Азимут маг.	Глубина по вертикали	Абсолютная отметка	С-Ю	В-З	Отход	Азимут картогр. Отхода	Простран. инт-ть	Удлинение ствола	Примечание
18	м	град	град	град	м	м	м	м	м	град	град/10м	м	
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-51.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Стол ротора
20	30.00	0.00	0.00	0.00	30.00	-21.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Направление 324 мм
21	95.00	0.00	0.00	0.00	95.00	43.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
22	100.00	0.25	90.00	73.82	100.00	48.53	0.00	0.01	0.01	90.00	0.50	0.00	
23	110.00	0.75	90.00	73.82	110.00	58.53	0.00	0.10	0.10	90.00	0.50	0.00	
24	120.00	1.25	90.00	73.82	120.00	68.53	0.00	0.27	0.27	90.00	0.50	0.00	
25	130.00	1.75	90.00	73.82	129.99	78.52	0.00	0.53	0.53	90.00	0.50	0.01	
26	140.00	2.25	90.00	73.82	139.99	88.52	0.00	0.88	0.88	90.00	0.50	0.01	
27	150.00	2.75	90.00	73.82	149.98	98.51	0.00	1.32	1.32	90.00	0.50	0.02	
28	160.00	3.25	90.00	73.82	159.97	108.50	0.00	1.84	1.84	90.00	0.50	0.03	
29	170.00	3.75	90.00	73.82	169.95	118.48	0.00	2.45	2.45	90.00	0.50	0.05	

Рисунок 33 – Проектный профиль

4.3 Схема базы данных

Схема базы данных «Анализ инклинометрии» состоит из источников пространственной информации (фактическая и проектная инклинометрия, координаты

скважин) и трех взаимосвязанных иерархически упорядоченных элементов (рисунок 34), которые представлены в реляционной СУБД в виде взаимосвязанных таблиц.

СУБД SQLite эффективно работает с файлами до 200 Гб, поэтому рекомендуется создавать БД для отдельного месторождения или участка месторождения.

В укрупненном виде схема БД «Анализ инклинометрии» представлена на рисунке 34.

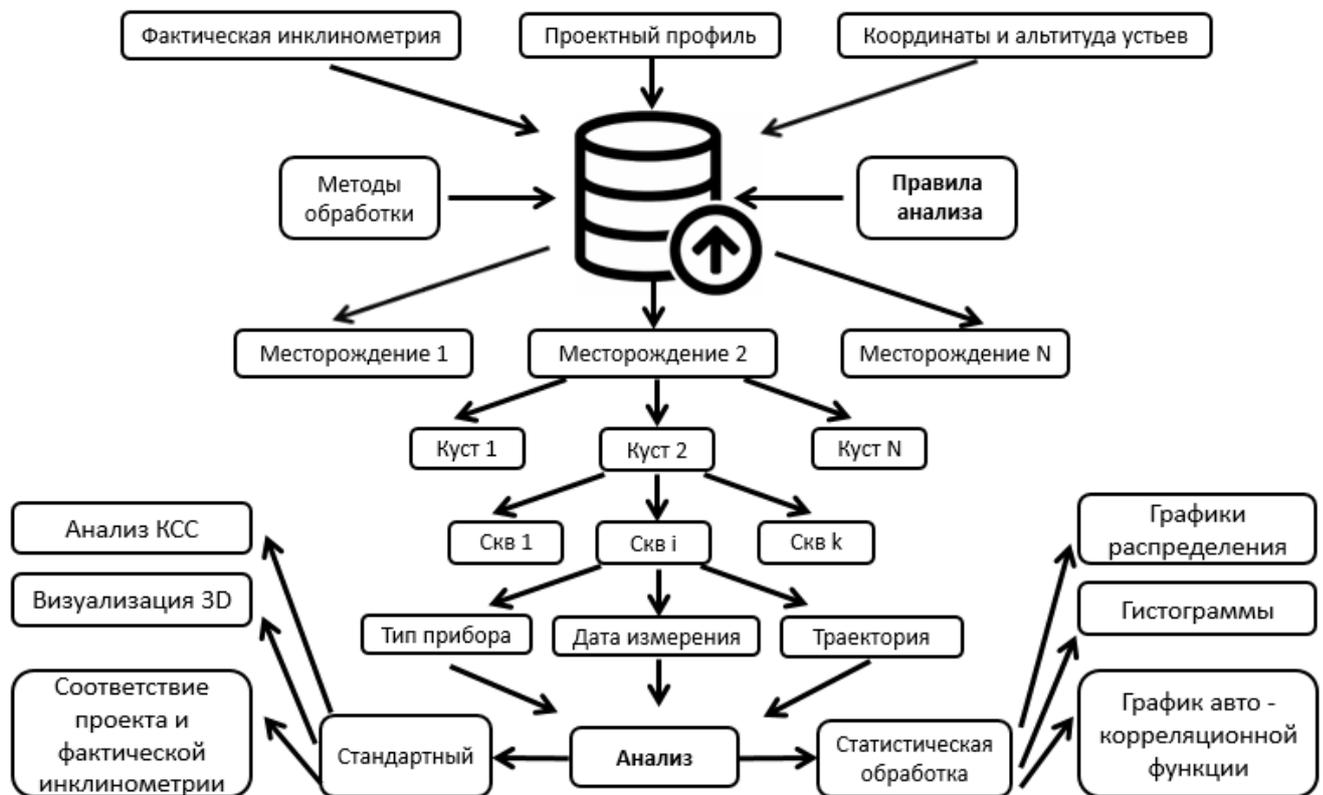


Рисунок 34 – Схема базы данных

В БД загружаются проектные профили скважин, данные о версиях фактической измеренной инклинометрии по всем выполненным замерам. Для определения географического местоположения скважин вносятся прямоугольные координаты устья скважин в соответствии с принятой системой координат месторождения. Значение магнитного склонения, определяется на дату проведения измерения или по информации бурового (геофизического) подрядчика, рассчитывается величина

сближения меридианов. Для расчета абсолютной глубины измерений вносятся отметки уровня земли и альтитуда скважины от стола ротора. Замеры инклинометрии хранятся в БД в соответствии с принадлежностью к месторождению, кустовой площадке и скважине. В системе записаны алгоритмы обработки инклинометрии (метод расчета) и правила анализа повторных измерений.

Предусмотрены стандартные для маркшейдерской и буровой служб аналитические мероприятия, такие как трехмерная визуализация профиля скважины или всех скважин кустовой площадки; выгрузка отчета о соответствии проектной и фактической инклинометрии; анализ коэффициента сближения скважин. Кроме того, в программный модуль «Анализ инклинометрии» включен анализ на основе статистической обработки массива измеренной инклинометрии: построение графика корреляционной функции, графиков и гистограмм распределения случайных величин, реализованных в виде координат скважин.

Информация, хранящаяся в БД «Анализ инклинометрии», является основой для стандартного и статистического анализа измерений инклинометрической съемки при принятии решений о возможности безопасного и качественного бурения скважин. Правила для анализа информации и методах обработки инклинометрии целесообразно хранить в отдельном разделе БД.

4.4 Интерфейс программы

Интерфейс маркшейдерско-геодезической информационной системы «Анализ инклинометрии» состоит из главного меню и страниц-закладок (рисунок 35), на которых расположены группы информационных и управляющих элементов.

На странице «База данных» сосредоточены инструменты создания баз данных и загрузки в них инклинометрических замеров по месторождениям, а также инструменты импорта данных по измерениям и работой непосредственно с замерами.

Для любых операций со скважинами, записанными в БД, необходимо активизировать скважину галочкой выбора.

Для выбранного месторождения показано поле для выбора номера куста (кустовой площадки) этого месторождения, для текущей кустовой площадки показана таблица скважин по номерам и версиям инклинометрических замеров.

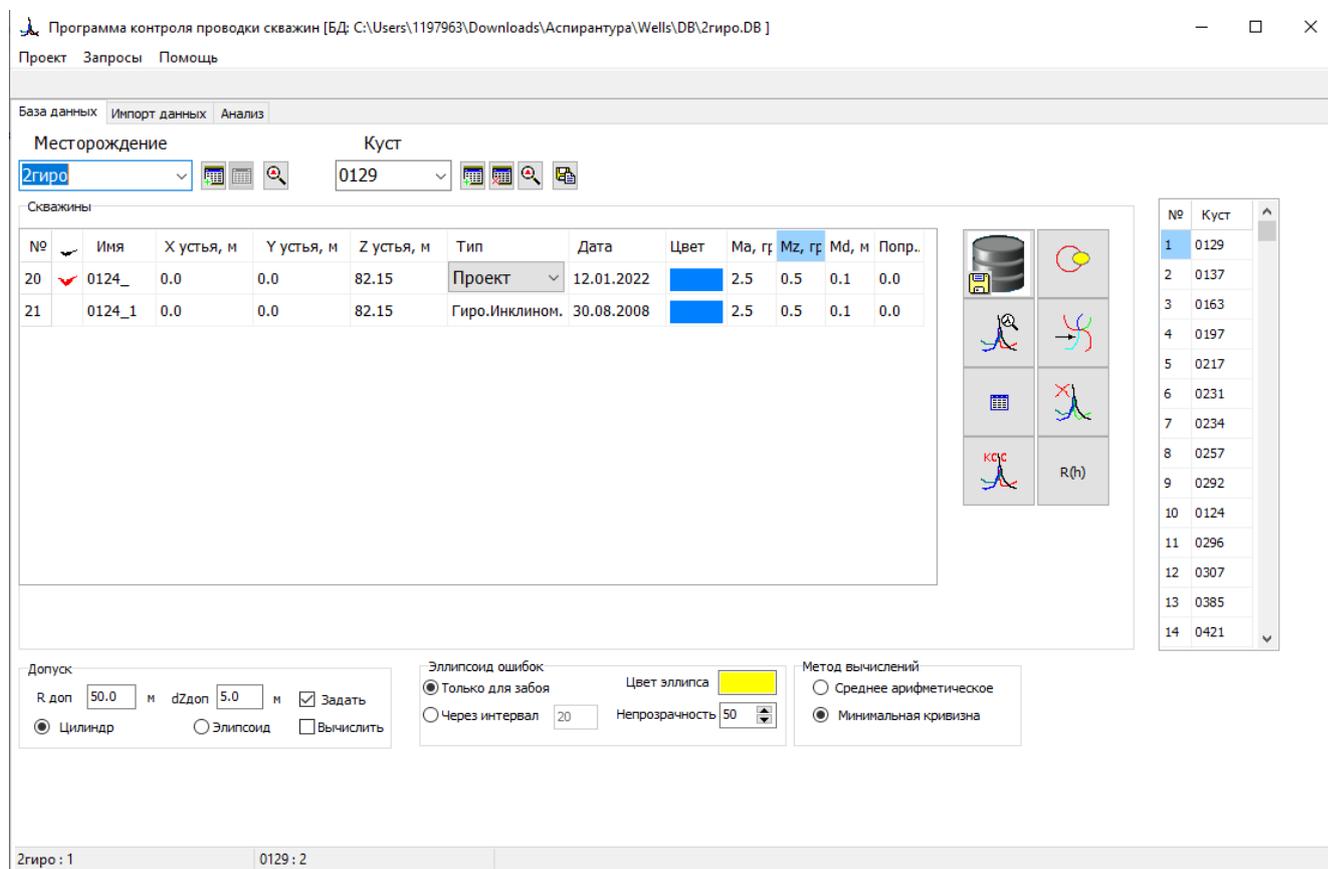


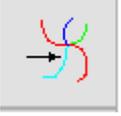
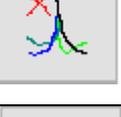
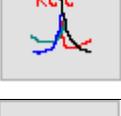
Рисунок 35 – Интерфейс программы «Анализ инклинометрии»

Идентификатором инклинометрических съемок является дата съемки. Кроме того, на этой странице вводится информация о прямоугольных координатах устья, значениях альтитуды, типах применяемых инклинометров и других параметрах, необходимых для расчета осей скважин и их анализа.

Основными операциями для полей «Месторождение» и «Куст» являются «Добавить запись» (номер), «Удалить запись» (номер) и «Выбрать». Для поля «Куст» также доступна кнопка «Импорт данных по скважине». Крупные кнопки справа от таблицы агрегируют основные операции с данными с загруженными БД измерениями (таблица 4).

Поля «Допуск», «Эллипсоид ошибок» и «Метод вычислений» предназначены для задания параметров графического отображения. После изменения параметров необходимо перевычислить траекторию и параметры эллипсоида ошибок командой «Сохранить изменения в БД».

Таблица 4 – Основные операции с измерениями инклинометрии

Изображение иконок	Операции
	Сохранить изменения в БД. Для выбранных скважин будет выполнен пересчет траектории и всех параметров скважины и модифицированные данные будут записаны в БД
	Анализ скважин. Выполнение анализа соответствия проектного профиля и фактической инклинометрии Открывается вкладка «Отчет» (Приложение Г)
	Показать в 3D. Все скважины (или только выбранные) могут быть показаны в трехмерной проекции (рисунок 36, Приложение Д)
	Экспорт. Для обмена графической информацией между приложениями САПР экспорт данных осуществляется с помощью формата обмена графической информацией *.dxf
	Показать параметры скважин. При необходимости посмотреть параметры скважины, который откроет новую вкладку «Параметры скважины» (рисунок 36)
	Удалить скважину
	Анализ КСС. Для двух выбранных скважин определяется коэффициент сближения скважин (КСС)
	Построить график автокорреляционной функции

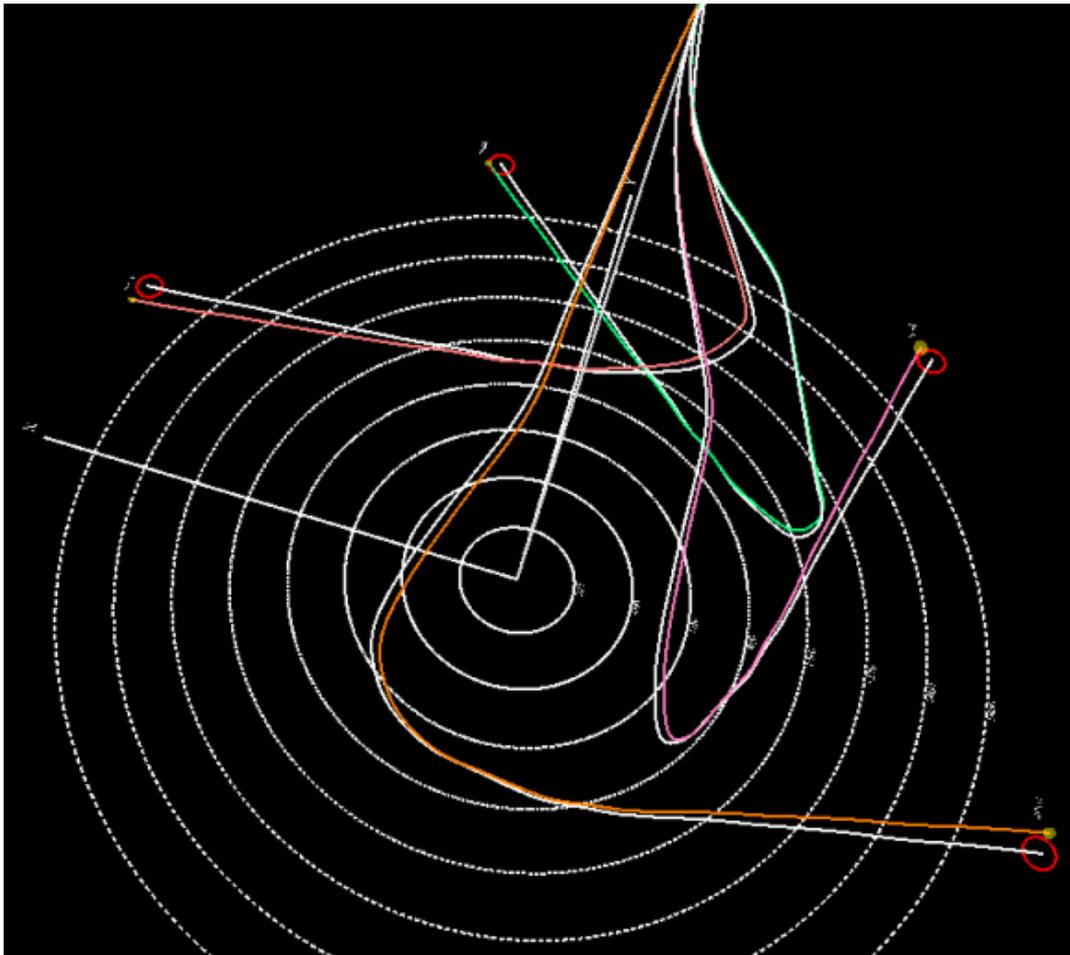


Рисунок 36 – Результат выполнения команды «Показать в 3D» для куста скважин

Программа контроля проводки скважин [БД: C:\Users\1197963\Downloads\Аспирантура\Wells\DB\2гиро.DB]

Проект Запросы Помощь

База данных Импорт данных Параметры скважины Отчет Анализ

Куст: 0129 Скважина: 0124_

№	Глубина, м	З.Угол, гр	Азимут, гр	Zn	dX, м	dY, м	Д.Угол, гр	Ист.глуб., м	Удлинение, м	Лин.Смещ., м	Инт.Искр.	Инт.ЗД	Xг, м	Yг, м	Zг, м
Куст		0129	Скважина		0124_										
Дата		12.01.2022	Тип												
Xн		Yн	Zн												
0.000		0.000	82.150												
Сум.Погр.		Ма град.	Mz град.	Md м	Метод										
0.00		2.50	0.50	0.10	Ср.арифме										
№	Глубина, м	З.Угол, гр	Азимут, гр	Zн	dX, м	dY, м	Д.Угол, гр	Ист.глуб., м	Удлинение, м	Лин.Смещ., м	Инт.Искр.	Инт.ЗД	Xг, м	Yг, м	Zг, м
0	0.0	0.000	0.000	82.15	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00	82.15
1	10.0	0.200	96.280	72.15	0.00	0.03	96.2800	10.00	0.00	0.03	0.0000	0.0000	0.00	0.03	72.15
2	20.0	0.460	89.230	62.15	-0.01	0.09	93.2212	20.00	0.00	0.09	0.2600	0.2627	-0.01	0.09	62.15
3	30.0	0.510	94.070	52.15	-0.01	0.18	92.5297	30.00	0.00	0.18	0.0500	0.0646	-0.01	0.18	52.15
4	40.0	0.500	97.680	42.15	-0.02	0.26	93.6358	40.00	0.00	0.26	0.0100	0.0333	-0.02	0.26	42.15
5	50.0	0.500	114.180	32.15	-0.04	0.35	96.6497	50.00	0.00	0.35	0.0000	0.1435	-0.04	0.35	32.15
6	60.0	0.430	124.100	22.15	-0.08	0.42	100.7498	60.00	0.00	0.43	0.0700	0.1064	-0.08	0.42	22.15
7	70.0	0.320	109.510	12.15	-0.11	0.48	102.9951	70.00	0.00	0.49	0.1100	0.1448	-0.11	0.48	12.15
8	80.0	0.380	76.340	2.15	-0.11	0.53	101.7657	80.00	0.00	0.55	0.0600	0.2079	-0.11	0.53	2.15
9	90.0	0.620	86.220	-7.85	-0.10	0.62	99.1446	90.00	0.00	0.63	0.2400	0.2541	-0.10	0.62	-7.85
10	100.0	1.540	114.500	-17.85	-0.15	0.80	100.8037	100.00	0.00	0.81	0.9200	1.0364	-0.15	0.80	-17.85

Рисунок 37 – Вкладка параметров скважин

Вкладка «Анализ» (рисунок 38) предназначена для вычисления параметров автокорреляции повторных измерений инклинометрии. Для этого необходимо выбрать тип инклинометра в поле «Подготовка», задать ID куста из БД в полях «№нач» и «№кон» и выполнить команду «Подготовить файлы для анализа».

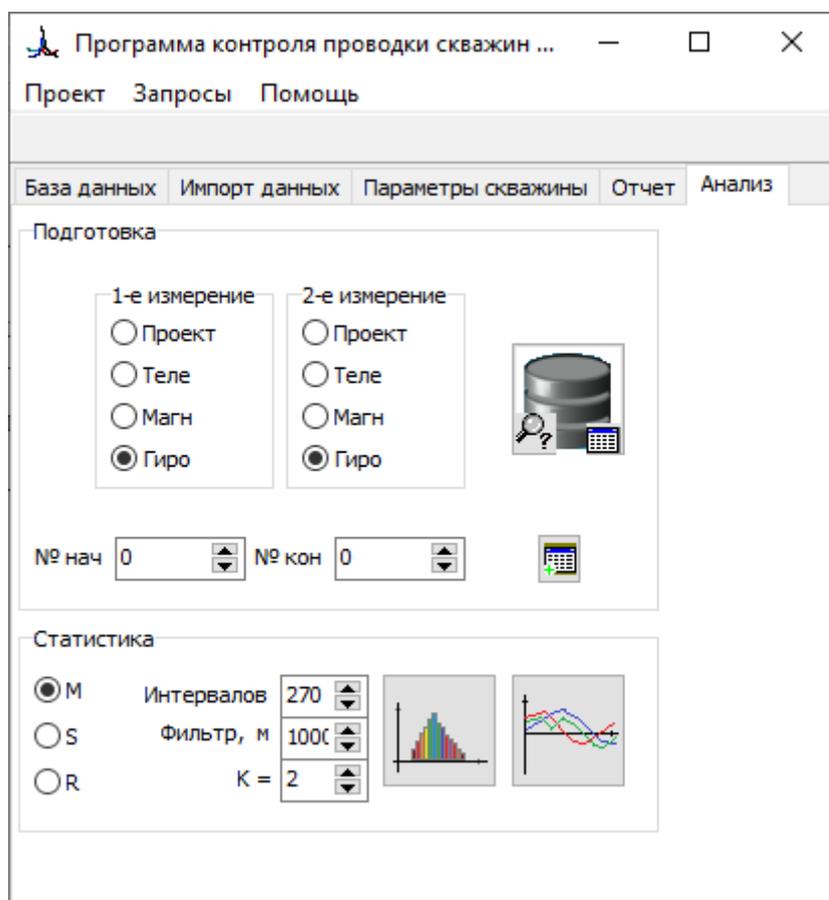


Рисунок 38 – Вкладка «Анализ»

Файлы формируются в папке TEMP программы Wells. В папке TEMP будет создано три файла. Например, файл «0234_» – первое измерение скважины, файл «0234_1» – второе измерение, файл «0234_-0234_1» – разность координат двух измерений, приведенные к плоскости скважины.

В поле «Статистика» выбираются для расчёта статистические параметры, возможно построение гистограмм и графиков распределения выборки скважин с помощью команд «Построение гистограмм» и «Построение графиков».

4.5 Выводы по разделу 4

В последнем разделе диссертационной работы описана практическая реализация предложенного метода и алгоритмов обработки и статистического анализа данных повторной инклинометрии скважин, предложенных в разделах 2 и 3 [49–51]. Приведена схема базы данных инклинометрических замеров, описана интерфейсная часть программы.

Предложенная схема базы данных программы «Анализ инклинометрии» позволяет аккумулировать информацию о пространственных данных скважин на месторождениях. Ввод и обработка информации в БД производятся в автоматизированной форме. А методы обработки данных инклинометрии, предложенные в диссертационном исследовании и программно реализованные в модуле «Анализ инклинометрии», позволяют автоматизированно решить задачи, связанные с поиском и вычислением закономерностей накопления ошибок при инклинометрии.

Стоит отметить, что для задач, решаемых маркшейдерской службой предприятия, программа «Анализ инклинометрии» имеет преимущества перед другими немногочисленными программными продуктами для моделирования и анализа данных инклинометрии [64, 108], поскольку основана на использовании статистических подходов к анализу повторных измерений инклинометрии и позволяет проводить исследования, направленные на углубленное понимание процессов, происходящих во время измерений, а также способствует развитию теории накопления ошибок измерений инклинометрии. Также в модуле «Анализ инклинометрии» в перспективе может быть дополнительно реализован ряд функций, связанных с автоматизированным поиском грубых ошибок в данных о пространственном положении скважин: измеренных угловых величинах, глубинах по стволу и координатами траектории скважины.

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 % в 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 съёмки 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1 Аппаратно-программный комплекс каротажа в процессе бурения и интерпретация его результатов. / М. Я. Аглиуллин, А. Г. Гайван, С. В. Горшенина, М. Л. Михеев, А. И. Саттаров – Текст : электронный// Опыт ООО «ТНГ-Групп» Бурение и нефть. – 2019. – № 1(январь). – URL: <https://burneft.ru/archive/issues/>.

2 Арсланов, И. Г. Особенности применения непрерывных гироскопических инклинометров / И. Г. Арсланов, Х. Н. Ягафарова – Текст : непосредственный // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2018. – № 5. – С. 16–19.

3 Астапович, А. В. О корреляции ошибок приращений координат, измеренных комплектом спутниковых геодезических приемников / А. В. Астапович, М. Я. Брынть – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2007. – Т. 3. – С. 3–9.

4 Бембель, Р. М. Определение погрешности инклинометрии с использованием геологической 3D-модели и статистическая оценка ее вероятности. / Р. М. Бембель, И. А. Щетинин – Текст : непосредственный // Нефть и газ. – 2016. – № 6. – С. 6–11. – DOI 10.31660/0445-0108-2016-2-6-11.

5 Близнюков, В. Ю. Расчёт и корректирование траектории скважины при бурении / В. Ю. Близнюков. – Ухта : УГТУ, 2014. – 36 с. – Текст : непосредственный.

6 Бурение наклонных, горизонтальных и многозабойных скважин / С. Н. Бастриков, А. Г. Калинин, А. С. Повалихин, К. М. Солодкий. – Москва : ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. – 647 с. – ISBN 978-5-902665-50-2. – Текст : непосредственный.

7 Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – Советское радио, 1972. – 208 с. – Текст : непосредственный.

8 Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – Москва : Наука, 1969. – 576 с.

9 Воробьев, А. В. Исследование и анализ естественных факторов, воздействующих на магнитометрические характеристики магнитометрических инклинометров / А. В. Воробьев, Г. Р. Шакирова, Г. А. Иванова – Текст : непосредственный // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, №1 (67). – С. 107–115.

10 Гвишиани, А. Д. Геомагнетизм: от ядра земли до солнца. / А. Д. Гвишиани, Р. Ю. Лукьянова, А. А. Соловьёв – Москва : РАН, 2019. – 186 с. – Текст : непосредственный.

11 Гвишиани, А. Д. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в арктическом реионе. / А. Д. Гвишиани, Р. Ю. Лукьянова – Текст : непосредственный // Физика Земли. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 19–30. – DOI 10.1134/S0002333718040051.

12 Генералов, Д. О. Применение сервиса «Управление замерами» с целью уменьшения погрешностей инклинометрических измерений и повышения точности определения пространственного положения ствола скважины при строительстве скважин на месторождении Западной Сибири / Д. О. Генералов, Т. С. Нечаева – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2025 г. – С. 20–32. – DOI 10.62994/2072-4799.2024.75.99.002

13 Геофизический центр РАН // ГЦ РАН. – URL <https://www.gcras.ru/eng/>. – Текст : электронный.

14 Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей. : Издание 3-е переработанное / Б. В. Гнеденко. – Москва : Гос. Физмат издат, 1961 – 448 с. – Текст : непосредственный.

15 Голованов, В. А. Гироскопическое ориентирование: учеб. пособие / В. А. Голованов. – Санкт-Петербургский государственный горный институт. СПб., 2004. – 92 с. – Текст : непосредственный.

16 Гордеев, В. Основы теории ошибок измерений: монография / В. Гордеев. – Краснодар : ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2023. – 197 с. – ISBN 978-5-8333-1199-8. – Текст : непосредственный.

17 Гринев, И. В. Классификация погрешностей магнитометрических инклинометров / И. В. Гринев, А. Б. Королев, В. Н. Ситников – Текст : непосредственный // НТВ «Каротажник». – 2019. – Вып. 2 (296). – С. 67–70.

18 Гусева, А. Е. Проектирование устройства для системы автоматического геодезического мониторинга за деформациями сооружений / А. Е. Гусева, Я. С. Малмыгин, С. О. Гриднев. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. – 2023. – Т. 8. – С. 359–364. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-8-359-360.

19 Гусейнзаде, М. А. Методы математической статистики в нефтяной и газовой промышленности / М. А. Гусейнзаде, Э. В. Калинина, М. Б. Добкина. – Москва : Недра, 1979. – 344 с. – Текст : непосредственный.

20 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., Новосибирск : 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.

21 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.

22 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.

23 Дементьев, Л. Ф. Применение математической статистики в нефтегазопромысловой геологии / Л. Ф. Дементьев, М. А. Жданов, А. Н. Кирсанов. – Москва : Недра, 1977. – 255 с. – Текст : непосредственный.

24 Доровских, И. В. Построение проектного и фактического профилей скважины: методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов специальности 130504 / И. В. Доровских, В. В. Живаева, С. В. Воробьев. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 50 с. – Текст : непосредственный.

25 Замеры высокого разрешения / М. Горичко, А. Кузнецов, З. Абзалов, В. Бевченко – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2018. – С. 24–30.

26 Иванова, Г. А. Интегрированная измерительная инклинометрическая система / Г. А. Иванова – Текст : непосредственный // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, №1. – С. 158–162.

27 Инженерная геодезия и геинформатика: Учебник для вузов / Г. С. Бронштейн, М. Я. Брынь, Ю. В. Визиров, В. Д. Власов, В. А. Коугия, Б. А. Левин, У. Д. Ниязгулов. – Москва : Фонд «Мир», 2012. – 484 с. – ISBN: 978-5-8291-1356-8; 978-5-919840-08-4. – Текст : непосредственный.

28 Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах (дополнение к «Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах»). / В. О. Галета, Д. П. Зорин, Н. Г. Козыряцкий, А. С. Мазницкий, И. Е. Мардер, Ю. Т. Морозов., Е. А. Салов. – Калинин: НПО «СоюзПром-Геофизика», 1989, – 14 с. – Текст : непосредственный.

29 Исаченко, В. Х. Инклинометрия скважин / В. Х. Исаченко – Москва : Недра, 1987. – 216 с. – Текст : непосредственный.

30 Исследование отклонений геомагнитной оси гиротнклиномера при построении нефтегазовых скважин / Г. А. Цветков, И. Р. Юшков, О. И. Вяткин, Н. Ю. Балужева – Текст : непосредственный // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 10. – С. 31–41. – DOI 10.15593/2224-9923/2014.10.3.

31 К вопросу о повышении точности инклинометрии в процессе бурения нефтегазовых скважин / В. К. Теплухин, В. В. Зенков, А. Н. Ратушняк, С. В. Байдинов – Текст : непосредственный // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – № 6. – С. 32–41. – DOI 10.21440/0536-1028-2021-6-32-41.

32 Коваленко, К. В. Неопределенность пространственного положения скважины и способы ее оценки / К. В. Коваленко. – Текст : непосредственный // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2011. – № 4. – С. 10–13. – EDN OZBXR.

33 Ковшов, Г. Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловертнов. – Уфа: УГНТУ, 2001.–228 с. – Текст : непосредственный.

34 Козыряцкий, Н. Г. Источники погрешностей инклинометрических исследований скважин / Н. Г. Козыряцкий – Текст : непосредственный. // НТВ «Каротажник». – 2013. – Вып. 3 (225). – С. 215–234. – Текст : непосредственный.

35 Кондров, Н. С. Обзор методов расчёта профиля ствола наклонно-направленной скважины / Н. С. Кондров, А. А. Щевелёв – Текст : непосредственный // Проблемы современной науки и образования. – 2017. – № 22 (104) – С. 24–29.

36 Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн – Москва : Наука, 1974. – 822 с. – Текст : непосредственный.

37 Костин, В. Н. Статистические методы и модели : Учебное пособие. / В. Н. Костин, Н. А. Тишина – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 138 с. – Текст : непосредственный.

38 Котов, В. С. Обработка данных инклинометрии при картопостроении / В. С. Котов, Вл. С. Котов – Текст : непосредственный // Нефть и газ. – 2010. – № 1. – С. 12–19.

39 Лесных, Н. Б. О корреляции случайных ошибок измерений / Н. Б. Лесных, В. Е. Мизин. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2013. – Вып. 3 (23). – С. 21–27.

40 Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа / К. В. Беляев, Е. С. Богданец, Ю. А. Кашников, А. А. Согорин – Москва : Недра, 2018. – 454 с. – Текст : непосредственный.

41 Международное геомагнитное опорное поле (IGRF) // BGS Геомагнетизм. – URL: https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html. – Текст : электронный.

42 Меркулов, В. П. Геофизические исследования скважин / В. П. Меркулов. – Томск : ТПУ, 2008. – 139 с. – Текст : непосредственный.

43 Метод повышения точности инклинометрии скважин гироскопическим непрерывным инклинометром ИГН73-100/80 / И. В. Цыбряева, А. А. Гуськов, С. В. Кривошеев, А. Ю. Стрелков. – Текст : непосредственный // Результаты исследований и работ ученых и конструкторов. – С. 81–89.

44 Методика контроля допустимых деформаций при строительстве подземных коммуникаций / М. Г. Мустафин, А. С. Наумов – Текст : электронный // НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ. – 2012. – Т. 12.

45 Методические указания компании Роснефть. Наклонно-направленное бурение. № П2-10 М-0038 – Москва, 2018. – 86 с. – Текст : непосредственный.

46 Методы формирования траектории ствола скважины из разновременных замеров / О. Н. Бантюков, И. Е. Марьин, А. А. Ключников, Е. В. Смирнова – Текст : непосредственный // Дискуссионный клуб. – 2010. – С. 87–101.

47 Мировая магнитная модель (WMM) | Национальные центры экологической информации (НЦЕИ) // WMM. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model>. – Текст : электронный.

48 Мировой центр данных // МЦД. – URL: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_variations.ru.html. – Текст : электронный.

49 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.

50 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.

51 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.

52 Модуль обработки данных инклинометрии // ГеоТЭК НПЦ. – <https://www.primegeo.ru/produkty/inklinometriya.html>. – Текст : электронный.

53 Морозова, Е. С. Алгоритмическая коррекция информационных сигналов инклинометрических систем на основе верификации значений калибровочных параметров : специальность 05.11.16 «Информационно-измерительные и управляющие системы (в промышленности и медицине) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Морозова Елена Сергеевна; Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2018. – 153 с. – Текст : непосредственный.

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

55 Нескромных, В. В. Направленное бурение и основы кавернометрии / В. В. Нескромных. – Красноярск : Сибирский Федеральный университет, 2012. – 329 с. – Текст : электронный.

56 Новые подходы к оптимизации схем кустования на поздней стадии разработки месторождений / Д. Л. Бакиров, Э. В. Бабушкин, А. В. Щербаков, Я. И. Баранников, Е. В. Русских, Е. В. Денисова – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2021. – № 4. – С. 9–12.

57 О создании российского акселерометра для скважинной инклинометрии / О. В. Жданеев, А. В. Зайцев, С. Ф. Коновалов, А. Е. Семенов. – Текст : непосредственный // Нефтяное хозяйство. – 2021. – № 8. – С. 30–35. – DOI 10.24887/0028-2448-2021-8-30-35.

58 Основные принципы инклинометрии. Учебный центр Sperry-Sun – Sperry-Sun Drilling Services, 1994 г. – 119 с. – Текст : непосредственный.

59 Особенности построения и калибровки инклинометрических систем с феррозондовыми датчиками / Г. В. Миловзоров, Д. Г. Миловзоров, Т. А. Редькина,

Р. Р. Садрутдинов – Текст : непосредственный // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2(24). – С. 115–119. – EDN TCUJLX.

60 ПАО «Когалымнефтегеофизика» // ПАО «Когалымнефтегеофизика» . – URL: <https://kngf.org>. – Текст : электронный.

61 Петров, Ю. В. Моделирование случайных величин: учебное пособие / Ю. В. Петров, С. Н. Аникин, С. А. Юхно; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 90 с. – Текст : непосредственный.

62 Платонов, А. К. Методы навигации в условиях неопределенности / А. К. Платонов, Д. С. Иванов. – Москва : МФТИ, 2013. – 84 с. – Текст : непосредственный.

63 Практика оценки инклинометрии скважин в моделировании нефтегазовых месторождений / Е. А. Щергина, А. Б. Сметанин, В. Г. Щергин, А. С. Мартынов – Текст : непосредственный // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 12 (372). – С. 31–41. – DOI 10.33285/2413-5011-2022-12(372)-31-41.

64 Программный модуль «МОНИТОРИНГ БУРЕНИЯ скважин» для ГИС Редактора «НАША ГИС» (ММБ) // НАША ГИС. – URL <https://nashagis.ru/dmm/?ysclid=mam5vx9kr5688291400>. – Текст : электронный.

65 Проектирование наклонно-направленного и горизонтального бурения скважин в Самарской области / М. А. Рвалов, М. В. Петров, В. А. Капитонов, Г. Г. Гиляев – Текст : непосредственный // Бурение и Нефть. – 2022. – №11.

66 Расчет бурильной колонны для скважин пространственного профиля с горизонтальным окончанием / А. Х. Аглиуллин, Р. А. Исмаков, Р. А. Мулюков, А. И. Сафрайдер – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – 77 с. – Текст : непосредственный.

67 Ребров, Д. Г. Применение спутниковых навигационных систем в глубоких карьерах, подземных горных выработках / Д. Г. Ребров, С. О. Гриднев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 3. – С. 160–163.

68 Результаты применения сервиса «Управление замерами» при геонавигации горизонтальных скважин / В. П. Филимонов, Д. Р. Мендыбаева, И. А. Носань, Т. Р. Рахимов, В. А. Атабекян, Д. Д. Клычев – Текст : непосредственный // Бурение и нефть. – 2021. – №12.

69 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.

70 Современное маркшейдерско-геодезическое обеспечение эксплуатации горных предприятий / М. Г. Мустафин, Е. Н. Грищенкова, Ж. А. Юнее, Г. И. Худяков. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2017. – № 4. – С. 190–203.

71 Сребродольская, М. А. Обоснование необходимости учета режимов бурения при расчете фактической траектории горизонтальной скважины / М. А. Сребродольская, А. И. Блоцкая // Neftegaz.RU. – 2021. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/nefteservis/697720-obosnovanie-neobkhodimosti-ucheta-rezhimov-bureniya-pri-raschete-fakticheskoy-traektorii-gorizontaln/> – Текст : электронный.

72 Теория математической обработки геодезических измерений. Часть I. Теория ошибок измерений. – Москва : МИИГАиК, 2015. – с. 52. – Текст : непосредственный.

73 Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. – Москва : Недра, 1985. – 215 с. – Текст : непосредственный.

74 Технологический регламент по проектированию и контролю траекторий скважин на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь». – Тюмень, 2015. – Текст : непосредственный.

75 Шоломицкий, А. А. Программный комплекс «Wells» контроля проводки скважин / А. А. Шоломицкий – URL : <https://sholomitskij.wixsite.com/sholomitskij/скважины>. – Текст : электронный.

76 Шоломицкий, А. А. Руководство пользователя «Контроль проводки скважин» ('Wells') / А. А. Шоломицкий, С. Г. Могильный. – Новосибирск, 2021. – 45 с. – Текст : непосредственный.

77 153-39.0-072-01 РД. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах – 2001. – Текст : непосредственный.

78 657-2022 ПНСТ Предварительный национальный стандарт Российской Федерации Нефтяная и газовая промышленность. Маркшейдерское обеспечение поиска, разведки, обустройства и разработки месторождений углеводородного сырья : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 июня 2022 г. N 38-пнст – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

79 Adams, N. J. Drilling engineering: a complete well planning approach / N. J. Adams. – Pennwell Books, 1985 г., – 848 p. – ISBN: 0-87814-265-7. – Текст : непосредственный.

80 ALL-Pribors Измерительное оборудование // ALL-Pribors. – URL: <https://all-pribors.ru/>. – Текст : электронный.

81 Application of Interpolation In-Field Referencing to Remote Offshore Locations / Williamson H. S. и др. – Текст : непосредственный // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, September 1999. – 51 (02). – P. 30–34. – DOI 10.2118/0299-0030-JPT.

82 Enhanced Magnetic Model (EMM) // National Centers for Environmental Information – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/enhanced-magnetic-model>. – Текст : электронный.

83 Error Properties of Magnetic Directional Surveying Data / E. Nyrges, T. Torkildsen, I. Haarstad, H. Nahavandchi. – Текст : непосредственный // Paper presented at the SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, 27–29 June 2005.

84 Gooneratne, C. P. Downhole Applications of Magnetic Sensors / C. P. Gooneratne, Li Bodong, E. M. Timothy – Текст : непосредственный. // Sensors. – 2017. – 17 (10). – p. 2384. – DOI 10.3390/s17102384.

85 High Definition Geomagnetic Model (HDGM) // National Centers for Environmental Information. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/high-definition-geomagnetic-model>. – Текст : электронный.

86 High Integrity wellbore Surveying / R. Ekseth, T. Torkildsen, A. Brooks, J. Weston, E. Nyrenes, H. Wilson, K. Kovalenko. – Текст : непосредственный // SPE Drilling & Completion. – 2010. – 25 (4). – P. 438–447. – DOI 10.2118/133417-PA.

87 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 Placemen / R. Ekseth, J. Weston, A. Ledroz, B. Smart, A. Ekseth. – Текст : непосредственный // Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, March 2011. – Paper Number: SPE-140192-MS. – DOI 10.2118/140192-MS.

88 Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy (ISCWSA) // ISCWSA. – URL: <https://www.iscwsa.net> – Текст : электронный.

89 In-Field Referencing // Geomagnetism. – URL: https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/directionaldrilling/ifr.html. – Текст : электронный.

90 Introduction to Wellbore Positioning This version is V09.10.2017. – URL: <http://www.uhi.ac.uk/en/research-enterprise/energy/wellbore-positioning-download>. – 2019. – 247 p. – Текст : электронный.

91 ISCWSA: WELL INTERCEPT SUB-COMMITTEE EBOOK. – URL: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.uhi.ac.uk/en/t4-media/one-web/university/research/mese/energy-docs/iscwsa-well-intercept-subcommittee-ebook.-pdf> – 2019. – 107 p. – Текст : электронный.

92 Kühnast, Robin Godot Richard. Comparison of Separation Factor Estimations / Kühnast Robin Godot Richard. – Leoben : [б. н.], 2015. – 66 p. – Текст : непосредственный.

93 Macmillan, S. Confidence Limits Associated with Values of the Earth's Magnetic Field used for Directional Drilling / S. Macmillan, S. Grindrod. – Текст : непосредственный // SPE Drilling & Completion. – 2010. – 25 (2). – P. 230–238. – DOI 10.2118/119851-PA.

94 Nyrnes, E. Analysis of the Accuracy and Reliability of Magnetic Directional Surveys. / E. Nyrnes, T. Torkildsen. – Текст : непосредственный // 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.

95 Optimizing the separation factor along a directional well trajectory to minimize collision risk / V. Mansouri, R. Khosravanian, D. A. Wood, B. S. Aadnøy – Текст : непосредственный // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2020. – 10 (4). – P. 2113–2125. – DOI 10.1007/s13202-020-00876-7.

96 Patent USA US8280638B2 Multi-station analysis of magnetic surveys / Andrew G. Brooks патентообладатель и заявитель Andrew G. Brooks ; United States Patent Application. – USA, 2009. – URL: <http://appft1.uspto.gov>. – Текст : электронный.

97 Positioning and Position Error of Petroleum Wells / T. Gjerde, Jo Eidsvik, E. Nyrnes, Bjørn Bruun – Текст : непосредственный // Journal of Geodetic Science. – 2011. – 1 (52). – P. 158–169. – DOI 10.2478/v10156-010-0019-y.

98 Prediction of Wellbore Position Accuracy When Surveyed With Gyroscopic Tools / T. Torkildsen, S. T. Harvardstein, J. Weston, R. Ekseth. – Текст : непосредственный // SPE Drill & Compl 23. – 2008. – P. 5–12. – DOI 10.2118/90408-PA

99 Sawaryn, S. J. A Compendium of Directional Calculations Based on the Minimum Curvature Method / S. J. Sawaryn, J. L. Thorogood. – Текст : непосредственный // SPE Drilling and Completion. – 2005. – 20 (1). – P. 24–36. – DOI 10.2118/84246-PA.

100 Sidman, R. D., Quadratic calculation improves interpretation of directional surveys / R. D. Sidman, J. Le Blanc, B. Youngblood – Текст : непосредственный // Oil and Gas Journal. – 1978 – Vol. 76, No. 4. – P. 69–72.

101 SlimPulse // ООО «Технологическая компания Шлюмберже». – URL: https://www.slb.ru/services/drilling/drilling_measurements/measurements_while_drilling/slimpulse/. – Текст : электронный.

102 Society of Petroleum Engineers (SPE). // SPE. – URL www.spe.org. – Текст : электронный.

103 Stefan Maus. Enhanced Wellbore Placement Accuracy Using Geomagnetic In-Field Referencing and Multi-Station Correction / Stefan Maus, Magnetic Herzl, Shawn DeVerse. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 3rd Unconventional Resources Technology Conference. – 2015. – DOI 10.15530/urtec-2015-2173526.

104 Stockhausen, E. J. Continuous Direction and Inclination Measurements Lead to an Improvement in Wellbore Positioning / E. J. Stockhausen, W.G. Lesso/ – Текст : непосредственный. // SPE-79917-MS, SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, February 19 – 21, 2003. – DOI 10.2118/79917-MS.

105 The CHAOS-X Model and Uncertainty Values for Magnetic Directional Surveying / E. V. Herland, C. C. Finlay, N. Olsen, I. Edvardsen, E. Nordgård-Hansen, K. M. Laundal, T. I. Waag. – Текст : непосредственный // SPE-185895-MS. – 16 p.

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

107 Well Trajectory Measurement Error Based on Gyro Survey / Binbin Diao, Yan Zhang, Deli Gao, Zhe Liu. – Текст : непосредственный // 5th International Conference on Green Energy and Sustainable Development (GESD 2022). – 2022. – V. 358. – 5 p. – DOI 10.1051/e3sconf/202235801008.

108 WellTracking. – URL <https://welltracking.dataeast.com/ru/>. – Текст : электронный.

109 Weston, J. Combined Gyroscopic and Magnetic Surveys Provide Improved Magnetic Survey Data and Enhanced Survey Quality Control. / J. Weston, Adrián Ledroz. – Текст : непосредственный // Paper presented at the SPE/IADC International Drilling

Conference and Exhibition, The Hague, The Netherlands, March 2019. – DOI 10.2118/194130-MS.

110 Williamson, H. S. Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling / H. S. Williamson. – Текст : непосредственный // SPE Drill & Compl. – 2000. – 15 (04). – P. 221–233. – DOI 10.2118/67616-PA.

111 Zadavec, D. Continuous Direction and Inclination Measurements Lead to an Improvement in well bore Positioning – Overview of difference in Depth between the TVD logs Acquired and the GYRO run in Offshore Adriatic / D. Zadavec. – Текст : непосредственный // Petroleum Engineering – 2015. – 7 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

ТАБЛИЦА ВЕЛИЧИН ВЕРОЯТНОСТЕЙ $P(S_k)$

k	Область эллипс			Область прямоугольник	
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 3$
1	2	3	3	5	6
1.0000	0.6827	0.3935	0.1987	0.4661	0.3182
1.1000	0.7287	0.4539	0.2494	0.5310	0.3869
1.2000	0.7699	0.5132	0.3038	0.5927	0.4563
1.3000	0.8064	0.5704	0.3608	0.6503	0.5244
1.4000	0.8385	0.6247	0.4193	0.7031	0.5895
1.5000	0.8664	0.6753	0.4778	0.7506	0.6503
1.6000	0.8904	0.7220	0.5355	0.7928	0.7059
1.7000	0.9109	0.7643	0.5911	0.8297	0.7557
1.8000	0.9281	0.8021	0.6439	0.8614	0.7995
1.9000	0.9426	0.8355	0.6932	0.8884	0.8374
2.0000	0.9545	0.8647	0.7385	0.9111	0.8696
2.1000	0.9643	0.8897	0.7795	0.9298	0.8966
2.2000	0.9722	0.9111	0.8161	0.9452	0.9189
2.3000	0.9786	0.9290	0.8482	0.9576	0.9370
2.4000	0.9836	0.9439	0.8761	0.9675	0.9516
2.5000	0.9876	0.9561	0.8999	0.9753	0.9632
2.6000	0.9907	0.9660	0.9200	0.9814	0.9723
2.7000	0.9931	0.9739	0.9368	0.9862	0.9793
2.8000	0.9949	0.9802	0.9506	0.9898	0.9847
2.9000	0.9963	0.9851	0.9617	0.9926	0.9888
3.0000	0.9973	0.9889	0.9707	0.9946	0.9919
3.1000	0.9981	0.9918	0.9778	0.9961	0.9942
3.2000	0.9986	0.9940	0.9834	0.9973	0.9959
3.3000	0.9990	0.9957	0.9877	0.9981	0.9971
3.4000	0.9993	0.9969	0.9909	0.9987	0.9980
3.5000	0.9995	0.9978	0.9934	0.9991	0.9986
3.6000	0.9997	0.9985	0.9953	0.9994	0.9990
3.7000	0.9998	0.9989	0.9966	0.9996	0.9994
3.8000	0.9999	0.9993	0.9976	0.9997	0.9996
3.9000	0.9999	0.9995	0.9984	0.9998	0.9997

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА АВТОКОРЕЛЛЯЦИОННОГО
АНАЛИЗА СКВАЖИНЫ В ПРОГРАММЕ «АНАЛИЗ ИНКЛИНОМЕТРИИ»

D0 -  0:\Проекты\0163\0163_1st
D2 -  2:\Проекты\0163\0163_0163_1st
D1 -  0:\Проекты\0163\0163_1st

mDepth mAngle nAZIM

	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	1	10	0.23	132.48
2	2	20	0.4	170.37
3	3	30	0.45	207.05
4	4	40	0.48	197.21
5	5	50	0.43	229.13
6	6	60	1.33	301.02
7	7	70	3.13	334.07
8	8	80	4.73	341.93
9	9	90	0.22	340.40
10	10	100	7.75	349.16
11	11	110	9.25	350.12
12	12	120	10.65	350.99
13	13	130	11.98	352.18
14	14	140	13.23	353.97
15	15	150	14.48	...

	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	1	10	0.69	116.4
2	2	20	0.33	150.16
3	3	30	0.27	166.67
4	4	40	0.17	178.88
5	5	50	0.28	237.37
6	6	60	1.26	310.06
7	7	70	3.17	330.18
8	8	80	4.54	338.93
9	9	90	0.11	340.28
10	10	100	7.67	349.09
11	11	110	9.29	350.31
12	12	120	10.66	351.07
13	13	130	11.99	352.68
14	14	140	13.19	354.12
15	15	150	14.66	...

D2 -

	0	1	2	3	4	5
0	1	10	0.01	0	-0.07	0.07
1	2	20	0.09	0	0.07	0.1
2	3	30	0.13	0	0.04	0.13
3	4	40	0.09	0	-0.15	0.18
4	5	50	0.07	0	-0.19	0.21
5	6	60	-0.03	0	-0.23	0.24
6	7	70	-0.09	0	-0.22	0.24
7	8	80	-0.07	-0	-0.18	0.19
8	9	90	-0.04	0	-0.17	0.17
9	10	100	-0.02	0	-0.17	0.17
10	11	110	-0.01	0	-0.17	0.17
11	12	120	-0.03	0	-0.17	0.17
12	13	130	-0.05	-0	-0.18	0.18
13	14	140	-0.06	-0	-0.18	0.18
14	15	150	-0.08	-0	-0.18	0.2
15	16	160	-0.07	-0	-0.19	...

Вычисление разности векторов измерений

```

Razn(T1, T2) :=
  n1 ← rows(T1)
  n2 ← rows(T2)
  n ← n1 if n1 ≤ n2
  n ← n2 otherwise
  for i ∈ 0..n-1
    Ri,0 ← T1i,1
    Ri,1 ← T2i,2 - T1i,2
    a ← T2i,3 - T1i,3
    r ← a
    r ← a - 360 if (a > 0) ∧ (a > 180)
    r ← a + 360 if (a < 0) ∧ (|a| > 180)
    Ri,2 ← r
  R
  
```

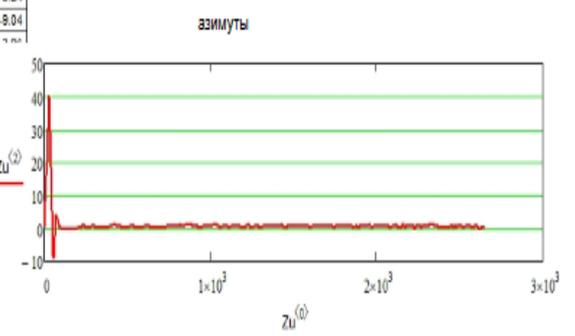
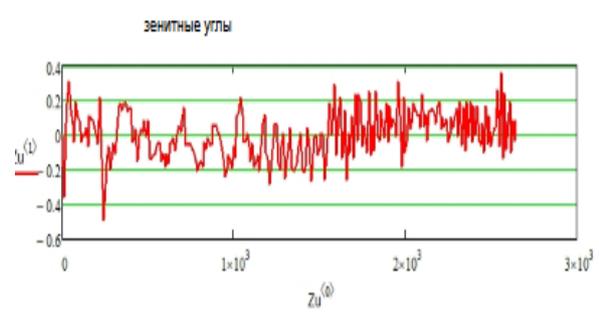
Zu ← Razn(D1, D0)

Преобразование вектора с интервалами 10м в вектор 20м

```

F10to20(D) :=
  n ← rows(D)
  for i ∈ 0..1
    for j ∈ 0..3
      Ri,j ← Di,j
  k ← 1
  for i ∈ 3..n-1
    if mc
      k
      fi
  R
  
```

	0	1	2
0	0	0	0
1	10	-0.26	16.08
2	20	0.07	20.21
3	30	0.18	40.48
4	40	0.31	18.88
5	50	0.15	-8.24
6	60	0.07	-8.04
7	70	-0.04	...
8	80	0.19	...
9	90	0.11	...
10	100	0.08	...
11	110	-0.04	...
12	120	0	...
13	130	-0.01	...
14	140	0.04	...
15	150	-0.07	...



Вычисление автокорреляционной функции

```

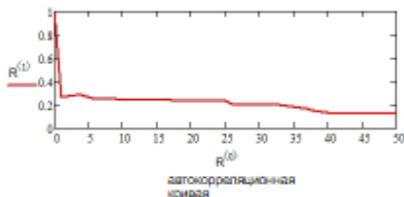
AutoKorel(D, in) =
  n ← rows(D)
  T ← Ltrend(D, in)
  V ← T_0
  p ← T_1
  σ ← p_2
  R_0,0 ← 0
  R_0,1 ← 1
  for m ∈ 1..20
    W ← Fm(V, σ, m)
    R_m,0 ← m
    R_m,1 ← W_3
  W_0 ← R
  W_1 ← V
  W_2 ← p
  W
  
```

$$Vz = Z_0^{(1)}$$

$$W_0 = \text{AutoKorel}(Vz, 0)$$

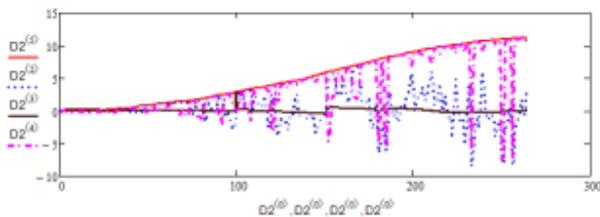
$$R = \begin{matrix} & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix}$$

зенитные углы



$p = W_2 = \begin{pmatrix} -0.05837 \\ 0.00013 \\ 0.13189 \end{pmatrix}$ начало прямой тренда
 величина тренда на один интервал
 с.к.о. в градусах

	0	1	2	3	4	5
0	1	10	0.008	0	0.065	0.065
1	2	20	0.075	0	0.072	0.104
2	3	30	0.129	0	0.037	0.134
3	4	40	0.093	0.001	0.148	0.175
4	5	50	0.068	0.002	0.194	0.206
5	6	60	0.026	0.002	0.234	0.236
6	7	70	0.086	0	0.219	0.235
7	8	80	0.071	0.001	0.18	0.194
8	9	90	0.044	0	0.165	0.17
9	10	100	0.02	0.001	0.167	0.168
10	11	110	0.012	0.001	0.17	0.17
11	12	120	0.026	0	0.172	0.174
12	13	130	0.05	0.001	0.176	0.183
13	14	140	0.064	0.002	0.182	...



Вычисление корреляции на интервале

```

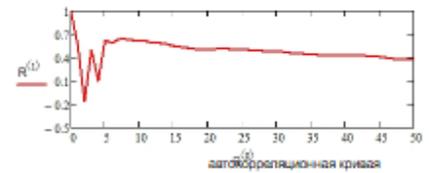
Fm(V, in, m) =
  n ← rows(V)
  t ← 0
  for i ∈ 0..2
    Sm_0 ← 0
  for k ∈ 0..m-1
    p ← 1
    while in+k+p-m < n
      t ← t+1
      i ← in+k+p-m
      sp ← V_{i-1} - V_i
      Sm_0 ← Sm_0 + sp
      Sm_1 ← Sm_1 + (V_{i-1})^2
      Sm_2 ← Sm_2 + (V_i)^2
      p ← p+1
      St_1 ← sp
  R_0 ← Sm_0
  R_1 ← t
  R_2 ← sqrt(Sm_1/t) * sqrt(Sm_2/t)
  R_3 ← Sm_0
  R_4 ← t - R_2
  R_4 ← sqrt(R_2)
  R
  
```

$$Vz1 = Z_0^{(3)}$$

$$W1 = \text{AutoKorel}(Vz1, 3)$$

	0	1
0	0	1
1	1	0.579
2	2	-0.157
3	3	0.501
4	4	0.096
5	5	0.62
6	6	0.587
7	7	0.642
8	8	0.636
9	9	0.628
10	10	0.618
11	11	0.607
12	12	0.593
13	13	...

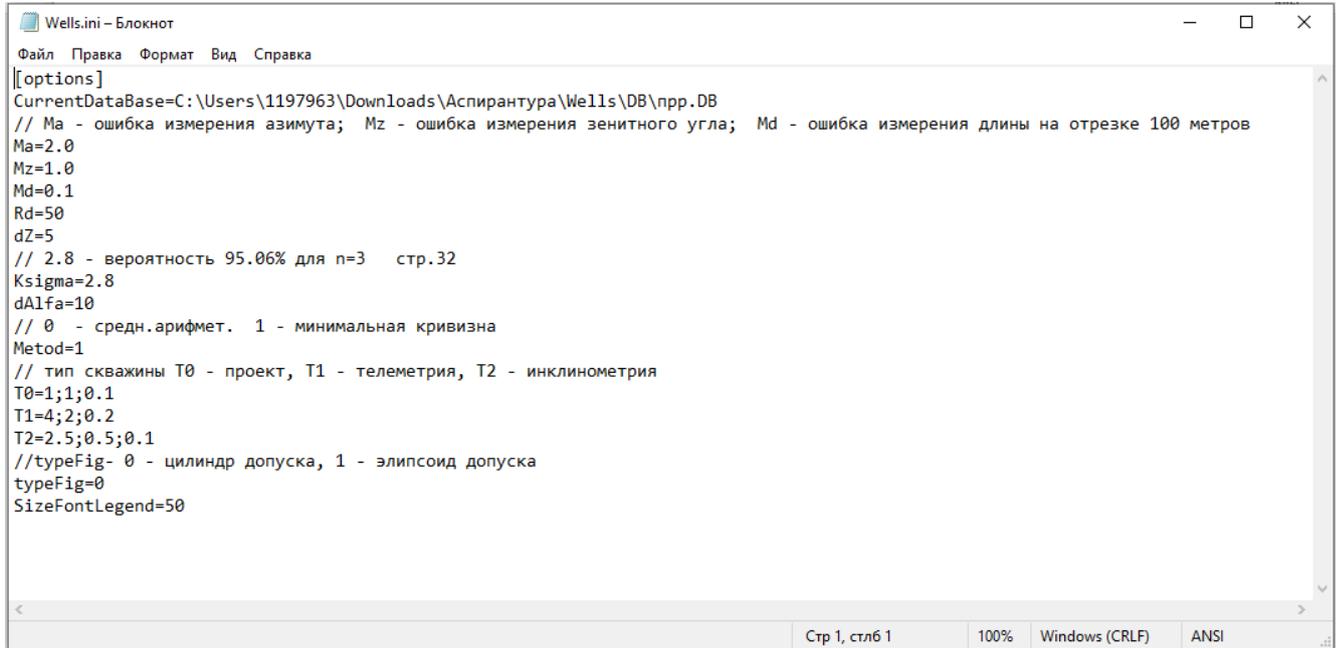
азимуты



$p = W1_2 = \begin{pmatrix} 1.86626 \\ -0.00077 \\ 2.84371 \end{pmatrix}$ начало прямой тренда
 величина тренда на один интервал
 с.к.о. в градусах

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

ФАЙЛ НАСТРОЕК ПРОГРАММЫ «АНАЛИЗ ИНКЛИНОМЕТРИИ»



```

Wells.ini - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
[options]
CurrentDataBase=C:\Users\1197963\Downloads\Аспирантура\Wells\DB\ppr.DB
// Ma - ошибка измерения азимута; Mz - ошибка измерения зенитного угла; Md - ошибка измерения длины на отрезке 100 метров
Ma=2.0
Mz=1.0
Md=0.1
Rd=50
dZ=5
// 2.8 - вероятность 95.06% для n=3   стр.32
Ksigma=2.8
dAlfa=10
// 0 - средн.арифмет.  1 - минимальная кривизна
Metod=1
// тип скважины T0 - проект, T1 - телеметрия, T2 - инклинометрия
T0=1;1;0.1
T1=4;2;0.2
T2=2.5;0.5;0.1
//typeFig- 0 - цилиндр допуска, 1 - эллипсоид допуска
typeFig=0
SizeFontLegend=50
  
```

Комментарии:

CurrentDataBase – полный путь к текущей базе данных

Rd=50 – допуск на отклонение в плане

dZ=5 – допуск на отклонение по высоте

Ksigma=2.8 – коэффициент вероятности для эллипса

dAlfa=10 – допуск на угол отклонения скважины

prZast=1

Metod=1 0 – среднее арифметическое, 1 – минимальная кривизна

тип скважины T0 – проект, T1 – телеметрия, T2 – инклинометрия

Через разделитель «;» задаются для разных типов данных

T0=;1;0.1

T1=4;2;0.2

T2=2.5;0.5;0.1

Ma – ошибка измерения азимута

Mz – ошибка измерения зенитного угла

Md – ошибка измерения длины на отрезке 100 метров

Ksigma=2.8 – коэффициент, при котором вероятность попадания забоя скважины в эллипс погрешности составит 0.95 из табл. в Приложении А

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)
ВКЛАДКА «ОТЧЕТ»

Программа контроля проводки скважин [БД: C:\Users\1197963\Down

Проект Запросы Помощь

База данных | Импорт данных | Параметры скважины | Отчет | Анализ

Анализ положения скважины 0124_1

№	Параметр	Проект	факт	Отклонение от проекта
1	Имя скважины		0124_1	
2	X забоя м	0.0	-425.6	425.6
3	Y забоя м	0.00	117.84	-117.84
4	Z забоя м	0.0	-2357.4	2357.4
5	Отклонение в плане м			441.6
6	Пересечение в 3D %	Цилиндр		0.0
7	Пересечение в плане %			0.0
8	Попадание в допуск в плане (Rдоп) м	50.0	441.6	Не попадает
9	Попадание в допуск по высоте (dZдоп) м	5.0	2357.4	Не попадает
10	Эллипсоид Ax м		4.113	
11	Эллипсоид By м		3.908	
12	Эллипсоид Cz м.		8.679	
13	Эллипсоид Tetta град.		179.094	
14	Кэфф. сигма		2.800	с вероятностью 95%

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ)

ТРЕХМЕРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СКВАЖИН КУСТОВОЙ ПЛОЩАДКИ

