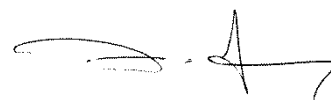


Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Ким Эдуард Лидиянович



Методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики
на месторождениях нефти и газа

25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Каленицкий Анатолий Иванович

Новосибирск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ГЕНЕЗИСА.....	11
1.1 Состояние изученности вопроса	11
1.2 Анализ методов изучения техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа.....	17
2 МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА.....	27
2.1 Предпосылки включения высокоточной гравиметрии в процесс мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа.....	27
2.2 Методика автономного мониторинга вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности, изменения силы тяжести на пунктах геодинамических полигонов.....	35
3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА	42
3.1 Подготовительный этап.....	42
3.2 Циклы наблюдений.....	44
4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТО- РИНГА ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА МЕСТОРОЖДЕ- НИЯХ НЕФТИ И ГАЗА НА ПРИМЕРЕ СПОРЫШЕВСКОГО И ВЫНГАПУРОВСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНОВ.....	49
4.1 Результаты мониторинга техногенной геодинамики на Спорышевском геодинамическом полигоне.....	49
4.2 Практические результаты мониторинга техногенной геодинамики на	

Вынгапуровском месторождении	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109

.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования продиктована необходимостью оперативного и качественного выявления опасных деформаций земной поверхности и недр на месторождениях нефти и газа, обусловленных возросшей интенсивностью их разработки, сопровождающихся нередко природными и техногенными чрезвычайными ситуациями, наносящими существенный ущерб как окружающей среде, так и объектам жизнедеятельности людей.

Эти деформационные процессы проявляются в виде аномальных смещений земной поверхности, сопровождающиеся нередко сильными землетрясениями. Такие землетрясения зарегистрированы во всех нефтедобывающих районах Земли, в том числе, в Соединённых Штатах Америки, Канаде, Франции, России, Туркменистане, Узбекистане и других регионах.

На разрабатываемых месторождениях инструментальными измерениями выявлены обширные просадки земной поверхности, достигающие существенных величин. На нефтяных месторождениях Willmington (США), Lagunillas (Венесуэла), Ekofisk (Норвегия), Сураханы (Азербайджан) зафиксированы максимальные просадки земной поверхности от 2,6 до 8,8 м, на Северо-Ставропольском газовом месторождении на 0,92 м [7, 42].

Исследования показали на связь подготовки сейсмических событий, проявляющихся в виде землетрясений, с техногенными воздействиями на недра в результате разработки месторождений углеводородов (УВ) [43, 48].

На месторождениях УВ Российской Федерации расположено значительное количество крупных населённых пунктов и городов, в том числе и на севере Западной Сибири (город Сургут, город Нижневартовск, город Нефтеюганск, город Пыть-Ях, город Ноябрьск и др.). Большинство из них разрабатываются более 20 лет, а некоторые 30–40 лет [37] и вплотную подошли к рубежу, когда на этих территориях могут проявиться опасные деформационные процессы земной поверхности и недр. Этим обусловлена актуальность своевременного выявления на этих территориях опасных деформаций земной поверхности, связанных как с

природными процессами, так и техногенными воздействиями на недра. При этом значительно возросли требования к оперативности и достоверности выявления деформаций земной поверхности и оценке степени риска ведения хозяйственной деятельности на этих территориях [34].

Степень разработанности темы исследования. Результаты анализа значительного объема материалов выполненных геодинамических исследований на различных геодинамических полигонах (ГДП) показали связь параметров месторождения (площади, мощности продуктивных пластов, их глубины, физических свойств горных пород, слагающих месторождение, изменения пластового давления в продуктивных пластах в процессе разработки) с процессом образования мульды проседания земной поверхности [41, 43]. Вместе с тем на большинстве месторождений УВ была выявлена приуроченность деформационных процессов к зонам разломов, которые представляют большую опасность при среднегодовой скорости относительных деформаций на них порядка $(5-7)10^{-5}$. Они могут привести к таким негативным последствиям как выход из строя скважин (Ромашкинское месторождение), аварии и порывы на трубопроводах (Усть-Балыкское месторождение), увеличению числа аварий на скважинах, расположенных в зонах разломов (Самотлорское месторождение) [39, 41, 48]. Оценка степени опасности деформационных процессов определяется по результатам сопоставления данных многократных повторных измерений по координированию и нивелированию по пунктам ГДП в различных циклах.

Деформационные процессы на месторождениях УВ в настоящее время выявляются в основном высокоточными геодезическими методами (координирование и нивелирование) [10, 12, 15, 49, 50, 51, 52, 72] в рамках ГДП, созданных для этих целей. При этом геодинамическая сеть создается таким образом, чтобы профильные линии начинались и заканчивались на «стабильных» пунктах, в качестве которых принимаются пункты, вынесенные за пределы границы прогнозируемых смещений земной поверхности.

В ряде случаев на отдельных ГДП выполнялись гравиметрические измерения. Основной задачей гравиметрии (до конца XX в.) являлось определение укло-

нения отвесной линии для введения поправок в результаты высокоточного нивелирования, а также выявление изменений приращений силы тяжести между пунктами геодинимического полигона в период между циклами наблюдений.

Вместе с тем необходимо отметить, что практика выполнения полевых работ на разрабатываемых месторождениях УВ, расположенных на севере Западной и Восточной Сибири показала [31–37], что устойчивость пунктов (реперов) во многих случаях не обеспечивается [32–34, 37].

Внедрение в практику работ на ГДП современных геодезических инструментов и приборов, со значительно лучшими характеристиками по точности, производительности, и принципов производства измерений, на основные подходы к решению задач геодинимики не повлияло. Традиционно на ГДП создаётся одноярусная плановая сеть, выполняется нивелирование I и II классов по взаимно пересекающимся профильным линиям между «стабильными». Имеются случаи, когда нивелирование в цикле выполнялись с перерывами в течение нескольких лет. Эти факторы в целом отрицательно сказывались на оперативности и, в определённой мере, достоверности результатов геодинимических исследований.

Таким образом, обозначились следующие *проблемы современного подхода изучения геодинимики природного и техногенного генезиса на месторождениях нефти и газа*:

– оперативность оценки геодинимической и промышленной опасности на ГДП по результатам мониторинга техногенной геодинимики традиционными методами (координирование и нивелирование) не отвечает современным требованиям в связи с необходимостью выполнения многократных циклов измерений в течение ряда лет;

– не обеспечивается достоверность оценки геодинимического состояния месторождения по данным сопоставления результатов повторных измерений в различных циклах, так как при выполнении нивелирования разомкнутыми ходами, опирающимися на вынесенные за пределы месторождений «стабильные» пункты (реперы), определение пунктов, подверженных вертикальным движениям, вызывает затруднение;

– применение гравиметрии на геодинимических полигонах ограничивается определением уклонения отвесной линии с целью введения поправок в результаты высокоточного нивелирования, а в отдельных случаях выявлением вариаций значений приращений силы тяжести в период между циклами измерений.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы являлась разработка методики геодезического мониторинга техногенной геодинимики на месторождениях УВ Западной Сибири, позволяющая оперативно и с высокой степенью достоверности выявить на них проявления природной и техногенной геодинимики.

Исходя из цели, задачами исследований являлись:

- выполнение аналитического обзора современных способов изучения техногенной геодинимики на месторождениях УВ;
- методическое обоснование комплексного применения геодезического метода и гравиметрии при изучении геодинимических процессов, особенно техногенного характера;
- разработка методики уточнения особенностей геолого-тектонического строения месторождения для выявления участков с признаками возможного проявления интенсивных деформационных процессов по данным геодезических и гравиметрических измерений;
- обоснование необходимости применения методики построения «жёсткой» геодинимической сети, основанное на создании системы замкнутых нивелирных ходов и гравиметрических рейсов с одним исходным пунктом и последовательности выполнения измерений и обработки результатов;
- разработка технологического решения реализации методики геодезического мониторинга техногенной геодинимики на ГДП, созданных на месторождениях УВ;
- практическая апробация и внедрение в практику методики геодезического мониторинга техногенной геодинимики на месторождениях УВ.

Научная новизна работы:

– получено новое, более достоверное представление о геодинамическом состоянии месторождения УВ, позволяющее оценить возможность проявления деформационных процессов на ее отдельных участках и локализовать геодинамический мониторинг в пределах этих участков, которое будет способствовать минимизации объемов полевых работ и значительному сокращению затрат;

– сформулированы новые представления о порядке выполнения геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях углеводородов Западной Сибири, способствующие повышению качества и сокращению сроков выявления деформаций земной поверхности на основе единой системы замкнутых нивелирных ходов и гравиметрических рейсов с одним исходным пунктом.

Теоретическая и практическая значимость работы. В диссертации рассмотрены возможности геодезических и гравиметрических методов как самостоятельных, так и комплексного использования их результатов при обработке и интерпретации. Научная и практическая значимость работы определяется следующим:

– решена задача комплексного применения геодезических и гравиметрических методов, обеспечивающих оперативное выявление и локализацию участков с возможными проявлениями техногенной геодинамики по результатам первого цикла наблюдений;

– возможностью получения количественных данных о движениях земной поверхности (ДЗП) на ГДП по результатам первых двух циклов наблюдений;

– возможностью проведения реальной оценки геодинамического состояния территории и разработки предварительных рекомендаций по безопасному ведению работ на месторождении по результатам первых двух циклов наблюдений.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использованы теоретические и методические принципы, изложенные в работах, включенных в библиографический список, в том числе метода наименьших квадратов, математической статистики, теории вероятности.

Практическая часть диссертационной работы выполнена с использованием приборных, программных, трудовых, материальных и финансовых ресурсов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Положения, выносимые на защиту:

– методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа обладает существенными преимуществами по сравнению с традиционными методами геодинамических исследований, по своей оперативности, надёжности и достоверности получаемых результатов о геодинамическом состоянии изучаемой территории, за счёт комплексной обработки и интерпретации данных высокоточных геодезических и гравиметрических измерений, а также рационального принципа построения геодинамической сети;

– технологическое решение практической реализации методики геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа обеспечивает оперативность выполнения натурных измерений и необходимое качество получения конечных результатов.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Основные теоретические положения исследований апробировались при практическом выполнении работ на геодинамических полигонах и разработке Проектов создания геодинамических полигонов. Результаты исследований рассматривались на технических советах, конференциях и конгрессах: на технических советах ОАО «Газпромнефть-Ноябрьскнефтегаз», ОАО «Роснефть», IV Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2008», VI Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2010», VII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2011», VIII Международном научном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2012», Всероссийской конференции «Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса», Москва–2013 г; X Международном научном конгрессе Итерэкспо ГЕО-Сибирь-2014, XI Международном научном конгрессе Итерэкспо ГЕО-Сибирь-2015.

Основные результаты исследования используются в рабочем процессе Спорышевского, Западно-Суторминского, Выгапуровского, Ново-Портовского, Верх-Тарского месторождений нефти и газа и внедрены в учебный процесс кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела федерального государственного бюджетного учреждения «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ГЕНЕЗИСА

1.1 Состояние изученности вопроса

В настоящее время геодинамика рассматривается как отрасль геологии, изучающая силы и процессы в коре, мантии и ядре Земли, обуславливающие глубинные и поверхностные движения и трансформации масс во времени и пространстве [62].

Геодинамика по направлениям исследований подразделяется на: палеогеодинамику, современную геодинамику, инженерную геодинамику, вычислительную геодинамику, экологическую, гелиогеодинамику, сейсмогеодинамику, микрогеодинамику [62].

В зависимости от решаемых задач геодинамика подразделяется на глобальную, региональную, и локальную. Особое место при этом занимает техногенная геодинамика, одним из основных факторов возникновения которой являются последствия воздействия человека как на поверхность Земли (возведение крупных инженерных сооружений- атомные электростанции, гидроэлектростанции, компрессорные станции и т.д.), так и на ее недра (интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых, строительство и эксплуатация подземных хранилищ газа и т. д.).

Техногенная геодинамика изучается в рамках техногенных геодинамических полигонов (ТГДП) на небольших по площади локальных территориях, реже на региональном и еще реже - на глобальном уровнях.

Изучение геодинамики, вызванных природными факторами, проводится на специально создаваемых геодинамических полигонах.

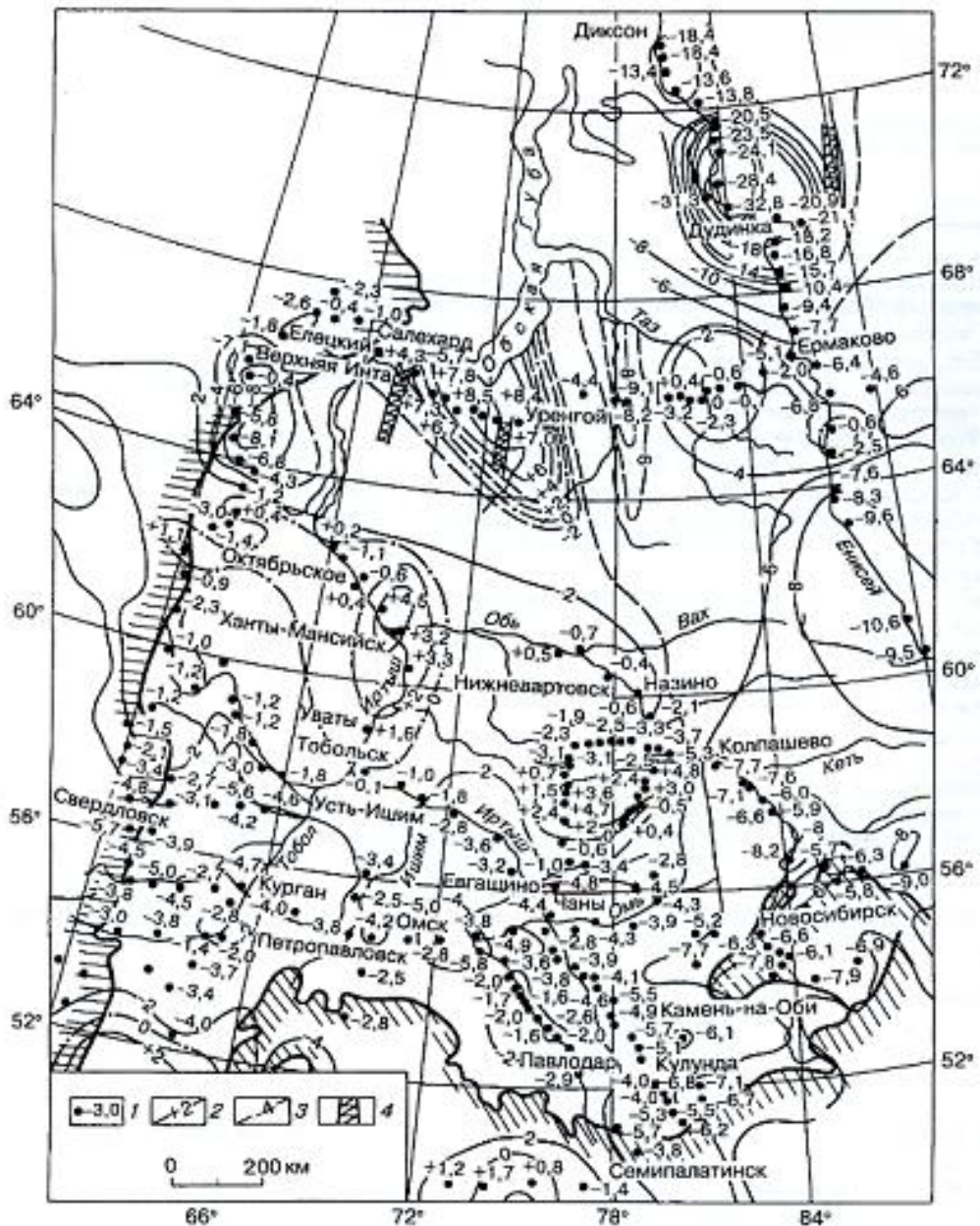
Первые наблюдения за движениями земной поверхности на ТГДП начали проводиться на угольных месторождениях. На территориях крупных угольных бассейнов (Донбасс, Кузбасс) были созданы специальные полигоны по наблюдению за деформациями земной поверхности. На них велись наблюдения за дина-

микой смещения горных пород и обусловленными ими горными ударами. Основными методами измерений были геодезические (полигонометрия, триангуляция, высокоточное нивелирование). Количественные характеристики происходящих деформационных процессов определялись по результатам повторных измерений.

В СССР современные вертикальные движения земной коры (СВДЗК) природно-тектонического и техногенного характера выявлялись по результатам повторного нивелирования I и II классов одновременно с решением задач по установлению единой системы высот на территорию страны. Повторные высокоточные геодезические измерения позволили выявить постоянные деформационные процессы в земной коре, а также изучить СВДЗК. Было выполнено уравнивание единой высокоточной нивелирной сети, позволившее составить общую карту СВДЗК на территорию Восточной Европы, изданную в 1986 г. [70]. Появление дополнительных сведений способствовало составлению карты скоростей СВДЗК на территорию Западно-Сибирской плиты (рисунок 1) [38].

Существенный вклад в развитие наук о Земле, в том числе, тектоники, сейсмологии, геодинамики внесла карта СВДЗК масштаба 1:5000000, охватывающая всю территорию СССР, изданная 1989 г. ГУГК при СМ СССР.

Начиная с 1975 г. в СССР активизировалась работа по созданию ГДП в сейсмоактивных регионах страны, в том числе, Средней Азии, Сахалине, Камчатке, Байкальской рифтовой зоне, Кавказе, Крыму, Карпатах, а также в районах строительства крупных гидроэлектростанций, расположенных в сейсмически опасных зонах (Токтогульская, Нурекская, Рогунская, Зейская, Бурейская, Ингури, Миатлинская, Чиркейская, Богучанская и др.). Всего было организовано более шестидесяти ГДП. Из них, на тридцати четырех решались задачи выявления землетрясений, на шестнадцать техногенных полигонах - выявление деформационных процессов в районах месторождений УВ и других полезных ископаемых, еще на двадцати пяти - геодинамику на площадках выбора и строительства атомных электростанций.



1 – нивелирные реперы и скорости СВДЗК, мм/год; 2 – изобазы и значения скоростей, мм/год; 3 – гипотетические изобазы, мм/год; 4 – зоны повышенных значений горизонтальных градиентов скорости СВДЗК, год⁻¹.

Рисунок 1 – Фрагмент карты скоростей современных вертикальных движений Западносибирской плиты

Большой вклад в теорию и практику геодинамических исследований внесли ученые Кузьмин Ю. О., Каленицкий А. И., Кашников Ю. А., Васильев Ю. В., Колмогоров В. Г., Гуляев Ю. П. и др.

Обработка большого объема информации, полученных на ГДП позволила установить, что годовая скорость современных «суперинтенсивных» деформации земной поверхности, приуроченных в основном к зонам тектонических наруше-

ний, может достигать 50 – 70 мм, а годовая скорость вертикальных смещений может достигать величин свыше 50 мм. Они проявляются в виде событий, обладающих короткопериодным, локализованным в пространстве характером, а также пульсационной и знакопеременной направленностью [41].

Было выявлено, что условием формирования мульды проседания земной поверхности на длительно разрабатываемых месторождениях УВ является: первоначальное аномально высокое давление в разрабатываемых пластах и ее значительное снижение в результате добычи; продуктивные пласты состоят из рыхлых, слабосцементированных песков и песчаников, переслаивающихся с глинами и характеризуются высокими значениями пористости (до 20-30 %). Особенно это характерно для месторождений с площадями порядка 25 км² и более, мощностью продуктивных отложений более 100 м, с относительно небольшой глубиной разрабатываемых интервалов геологического разреза (до 200 м); отсутствием системы поддержания пластового давления [41].

Опыт эксплуатации месторождений УВ показал, что интенсивная эксплуатация месторождений приводит к уменьшению пластового давления. При этом происходит значительное нарушение природного физического и геодинамического равновесия в геологической среде месторождения, провоцирующее формирование опасных деформационных процессов в виде увеличения количества и интенсивности сейсмических событий. Такие события зафиксированы на месторождениях УВ, в том числе: в Газли (1976 г. и 1984 г.) с интенсивностью семь баллов), на ряде месторождений США (месторождения нефти Rangely, Mukawa), Канады (месторождения Strachan, Eagle&Eagle Wes) и других регионах [48].

Так, например, в районах нефтегазодобычи Татарстана ежегодно фиксируется до двух землетрясений, интенсивность которых иногда превышает три балла, а в Южном Предуралье в месяц фиксируется до трех сейсмических событий, магнитуда которых М 1, 2 и более. Значения зафиксированных магнитуд за пределами месторождений УВ на порядок ниже, чем на самих месторождениях [11]. На юго-востоке Татарстана на территории Ромашкинского и Ново-Елховского месторождений нефти с 1996 г. по 2013 г. зарегистрировано более 268 местных земле-

трясений различной интенсивности (рисунок 2) [11]. Было установлено, что эти землетрясения редко происходят за пределами месторождений. При этом очаги землетрясений находились на глубинах 1–4 км, на глубинах расположения продуктивных горизонтов (1,4 – 1,7 км). Эти факты указывали на техногенную природу землетрясений.

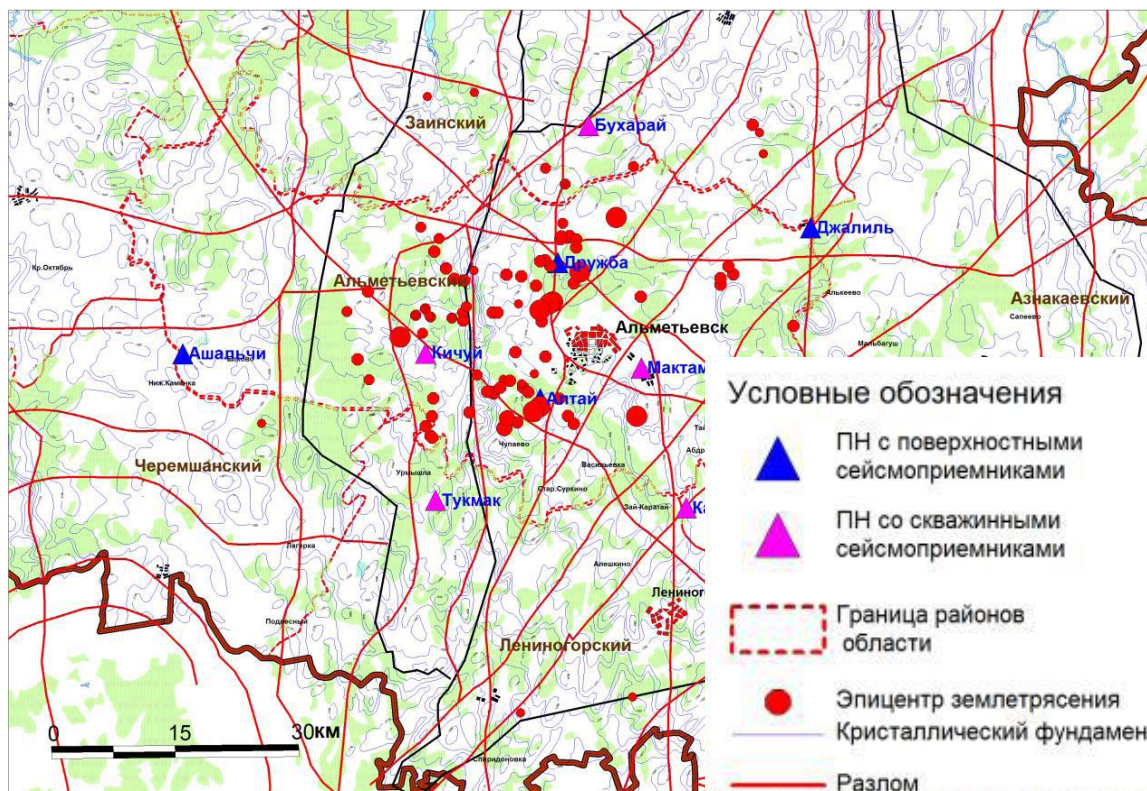


Рисунок 2– Расположение эпицентров местных землетрясений на юго-востоке Татарстана на глубине 0 – 3 км

Были выявлены общие закономерности проявлений техногенной сейсмичности от времени начала разработки нефтегазовых месторождений (таблица 1) [7].

Было установлено [50], что на них, землетрясения происходят как в сейсмоактивных районах, так и в платформенных областях. При этом землетрясения на платформах приводят к большим по площади повреждениям, могут иметь катастрофический характер и привести к более значительным негативным последствиям, чем в сейсмоактивных осадочных районах. Это объясняется, как правило, небольшой глубиной эпицентров землетрясений и тем, что объекты обустройства

и эксплуатационные скважины промыслов возводились без должного учета сейсмостойкости.

Таблица 1

Название месторождения, страна	Момент начала техногенной сейсмичности (в годах)
<i>Нефтяные месторождения</i>	
Snipe Lake (Канада)	7
Старогрозненское (Россия)	8
Love Country (США)	12
Бурунное (Туркменистан)	13
Sleepy Hollow (США)	19
Rangely (США)	19
Gobles (Канада)	19
Willmington (США)	21
Cocdell *(США)	25
Долина (Украина)	26
Imogene (США)	29
Кум-Даг (Туркменистан)	34
Ромашкинское (Россия)	39
Coalinga (США)	87
<i>Газовые месторождения</i>	
Strachan (Канада)	2
Rocky Mountain (США)	4
Лак (Франция)	12
Газли (Узбекистан)	12

Данные таблицы 1 показывают, что среднее значение времени между началом разработки месторождений нефти и газа и моментом возникновения техногенной сейсмичности для нефтяных месторождений составляет около двадцати пяти лет, а для газовых месторождений - около восьми лет.

Выявленная на месторождениях УВ [48, 52] приуроченность интенсивных деформационных процессов, имеющих природный и техногенный характер, к зонам активных разломов, указывает на необходимость их первоочередного выявления на ГДП.

1.2 Анализ методов изучения техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа

В настоящее время на ГДП применяются различные подходы оценки геодинамической опасности по фактору деформационных процессов. Основными из них являются выявление мульды проседания на территориях месторождений или выявление геодинамического режима вдоль линий разломных зон [41].

Первые изучают техногенную геодинамику с точки зрения возможности формирования мульды проседания земной поверхности на месторождении, на основе прогнозных расчетов возможных просадок земной поверхности с учетом геометрических параметров месторождения и физических свойств пород продуктивных горизонтов. Другие считают основным фактором возникновения геодинамики активизацию деформационных процессов в разломных зонах, предварительное положение которых в плане определяются по данным дистанционных методов и геофизическим материалам [34]. Те и другие изучение и оценку геодинамики выполняют по результатам инструментальных измерений.

Выполнение измерений, в зависимости от характера исследований и конечных целей, производится различными методами с применением высокоточных инструментов и приборов.

На ГДП, созданных на подземных выработках, на бортах карьеров при открытых способах добычи полезных ископаемых, а также на специальных ГДП, предназначенных для прогнозирования землетрясений, широко используются наклонометры и деформографы. Однако их использование для изучения техногенной геодинамики на месторождениях УВ вызывают затруднения из-за высокой чувствительности ($10^{-9} - 10^{-10}$) приборов. Оказалось [45], что из измерений выделить сигналы, непосредственно связанных с геодинамическими процессами, практически невозможно, так как они отражают все сигналы, создаваемые как деформационными процессами и короткопериодными, вызванными суточными вариациями лунно-солнечного притяжения, так и техногенными (движение транспорта, работа механизмов).

При этом при выявлении оседаний земной поверхности на обширных территориях, определений зон активных разломов в пределах площади геодинамического полигона, возможность применения вышеуказанной аппаратуры чрезвычайно затруднено по причине невозможности определения точного места установки приборов, вследствие ограниченной длины их базы.

Основным методом изучения техногенной геодинамики на ТГДП в настоящее время является геодезический, позволяющий выполнять определение смещений земной поверхности миллиметрового порядка с минимальными погрешностями.

Однако, традиционные геодезические методы (триангуляция, светодальномерные измерения, высокоточное нивелирование), обеспечивая высокую точность измерений, обладают рядом существенных недостатков, таких как: зависимость от природно-климатических условий, трудоемкость выполнения полевых и камеральных работ, низкую производительность. Это приводило к относительно длительному времени получения конечных результатов, связанных с особенностью выполнения наблюдений и обработки результатов. Появление спутниковых методов в геодезии позволили более оперативно и в кратчайшие сроки реализовать различные геодезические построения.

Спутниковые методы, обладая неоспоримыми преимуществами перед традиционными видами геодезических измерений в производительности и автоматизации процесса наблюдений, прочно занимают свою нишу как средство измерений в геодинамических исследованиях глобального, регионального и локального масштабов.

Опыт изучения геодинамических процессов на месторождениях твердых полезных ископаемых и на месторождениях УВ с применением спутниковых технологий широко освещён в различных источниках и в специальной литературе [9, 10, 12, 22, 39, 42, 49, 50, 51, 52].

Вместе с тем, применение спутниковых технологий значительного прорыва в выявлении техногенной геодинамики не привело [12, 32, 36, 37]. В большинстве

публикаций, посвященных проблемам техногенной геодинамики, сведения о выявленных по результатам спутниковых определений движений земной поверхности на геодинамических полигонах, практически отсутствуют.

В последнее время предпринимаются попытки выявления геодинамики на всей площади месторождения (или группы месторождений) с применением технологии космической радиолокационной дифференциальной интерферометрии, позволяющее выполнять прямое измерение смещений земной поверхности, основанное на специализированной обработке данных спутниковой радиолокационной съемки. Выполнение такой съемки требует предварительного создания системы ограниченного количества корректурных (контрольных) пунктов GPS с плотностью один пункт на 100 км^2 [15], равномерно размещенных по территории, подлежащей съемке. Их необходимо интегрировать в систему постоянно действующих международных пунктов глобальной геодинамической сети GPS (IGS). Такая предварительная подготовка территории позволяет определять в реальном режиме времени смещения земной поверхности в наблюдаемых точках с точностью порядка 5 мм всех трех координат [28].

Высота центров корректурных пунктов над земной поверхностью определялась с миллиметровой точностью. Необходимость выполнения такого объема подготовительных процедур в условиях севера Западной Сибири пока лишает преимущество этого метода перед другими. Эта технология была апробирована группой специалистов Московского государственного горного университета, ОАО «Газпромнефть», ООО «Компания «Совзонд», ООО «Газпром-ВНИИГАЗ» и ООО «Газпромдобыча Уренгой» в 2008 году в городе Новый Уренгой [28], специалистами Пермского государственного технического университета на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении и ряде других месторождений Западной Сибири [68].

Однако, при сопоставлении вертикальных смещений земной поверхности, полученных по данным радарной интерферометрии с данными, полученными высокоточным нивелированием, были выявлены случаи, когда на одних и тех же наблюдательных пунктах один метод показывал поднятие, а второй – опускание

[44]. Такие случаи наблюдались на Астраханском газоконденсатном месторождении (за период с октября 2003 г. по декабрь 2008 г.) [29] и на Гронингенском газовом месторождении (Голландия) в период 2003–2007 гг. [71] и ряде других. Выявленные несоответствия результатов съемки ограничивают широкое внедрение метода на геодинамических полигонах.

В настоящий период высокоточное геометрическое нивелирование является одним из основных методов выявления величины и скорости вертикальных движений земной поверхности. Оно до последнего времени широко применяется в практике геодинамических исследований [9, 10, 12, 15, 34, 37, 42].

При этом повсеместно применяется методика, когда нивелирование выполняется по взаимно пересекающимся профильным линиям между фундаментальными реперами, вынесенными за контуры ожидаемой мульды проседания. На эти реперы абсолютные высоты передаются от реперов Государственной нивелирной сети. На профилях через равные промежутки закладываются грунтовые реперы. Такая схема нивелирования реализована практически на всех геодинамических полигонах. [34]. При больших размерах лицензионных участков (горных отводов), характерных для большинства месторождений УВ, расположенных на территории Российской Федерации, и особенно, в Западной Сибири, измерения выполнялись в течение длительного времени. Иногда продолжительность их только в одном цикле составляла два-три года. Оценка выявленных вертикальных движений земной поверхности по результатам таких измерений вызывает сомнение в их достоверности и требует проведения дополнительных измерений.

Рассмотрим это на примере Уренгойского и Ашальчинского ГДП.

На территории Ашальчинского месторождения создан геодинамический полигон (рисунок 3) [12, 34]. На нем в период с 2008–2013 гг. выполнено девять циклов измерений по трем профильным линиям, по которым ставилась задача выявить развитие мульды проседания с момента начала ее возникновения [12].

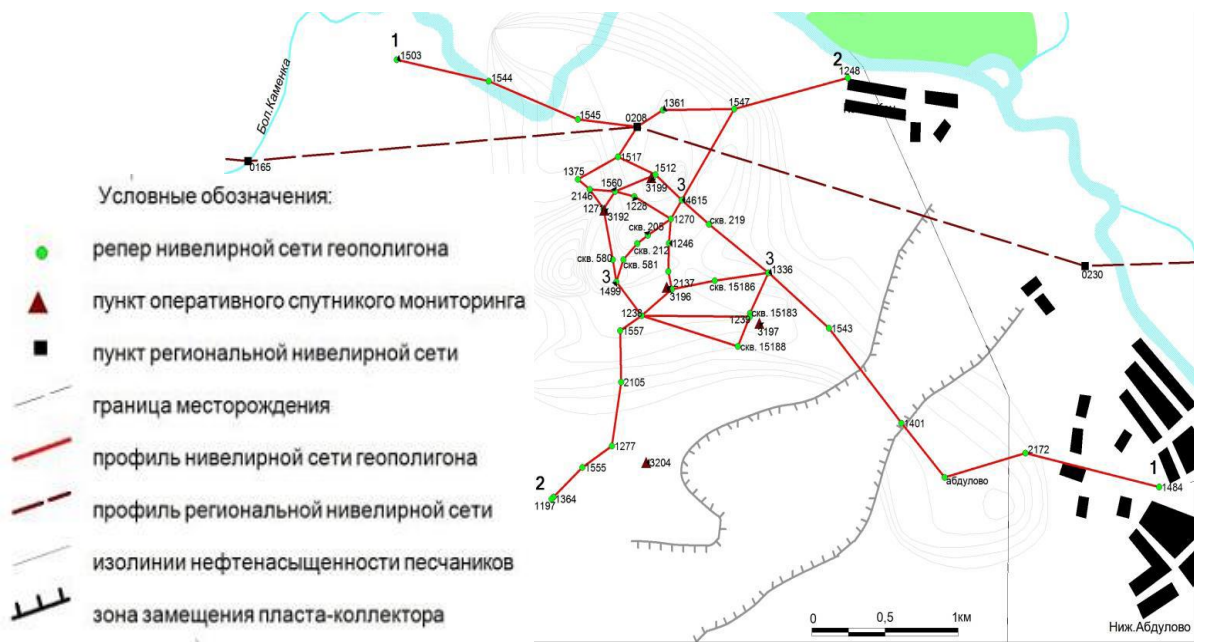


Рисунок 3 – Схема геодезического полигона на Ашальчинском месторождении

Результаты измерений, выполненных за девять циклов в течение пяти лет показали стабильность пунктов ГДП. Только у одного из них были выявлены вертикальные перемещения на величину 11,2 мм. По этим результатам можно дать заключение о возможности завершения мониторинга деформационных процессов, в связи с их отсутствием.

Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение является одним из крупнейших в мире и находится на севере Западной Сибири в Ямало – Ненецкой автономной области.

Интенсивная добыча газа привела к образованию депрессионных воронок в пределах Уренгойской, Ен-Яхинско-Песцовой и Северо-Уренгойской газовых залежей.

В 1974 – 1976 гг. на месторождении была создана наблюдательная станция, представляющий собой нивелирную сеть II класса общей протяженностью около 900 км (рисунок 4) [68].

но через 1,7 – 9,1 км. К началу наблюдений было заложено 568 реперов. С 1975 г. в течение двадцати лет было выполнено четыре серии наблюдений, из которых наиболее полными являются первые три (1975 г., 1985 г. и 1995 г.). При этом наблюдения в одной серии растягивались на два, иногда на три полевых сезона.

В 2002 г. Пермским государственным техническим университетом (ПермГТУ) была выполнена комплексная работа по анализу результатов наблюдений, прогнозу напряженно-деформированного состояния горного массива и разработке рекомендаций по мониторингу деформационных процессов при дальнейшей отработке месторождения [69].

Результаты выполненного анализа на Уренгойском нефтегазоконденсатном месторождении показали следующее [69]:

– выполненные в течение двадцатилетнего периода серии наблюдений (1975 г., 1985 г. и 1995 г.), в общем, удовлетворяли по точности требованиям нивелирования II класса. На 1995 г. были зафиксированы оседания поверхности от 300 до 350 мм. Однако отдельные хода и профильные линии по точности не удовлетворяют требованиям нивелирования II класса, что связано с некачественным выполнением полевых работ. Значительная часть реперов подвержена процессам вымерзания в результате некачественной закладки реперов вследствие чего графики оседаний имеют характерный ломаный вид (рисунок 5);

– по данным нивелирования 1995 г. оседания реперов составляли от 120 мм (профиль № 5) [69] до 340 мм (профиль № 10), то есть было зафиксировано полномасштабное развитие процессов сдвижения вследствие добычи газа. Край мульды сдвижения распространилась за границы газо-водяного контакта на 8 – 10 км, а граничный угол сдвижения находился в пределах 10° – 15° . Это обстоятельство расходилось с традиционными представлениями о развитии процессов сдвижения горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых, согласно которым границы мульды сдвижения удалены от границ разработки на расстояние, определяемое граничным углом сдвижения 45° – 55° . Возможной причиной этих явлений могло быть падение пластового давления в удален-

ных от газо-водяного контакта областях. Это потребовало проведения контрольных измерений на отдельных пунктах геодинимической сети.

– в целом по результатам измерений, выполненных за двадцатилетний период были выявлены основные закономерности развития деформационных процессов при добыче газа в условиях крайнего Севера и зафиксировать оседания земной поверхности.

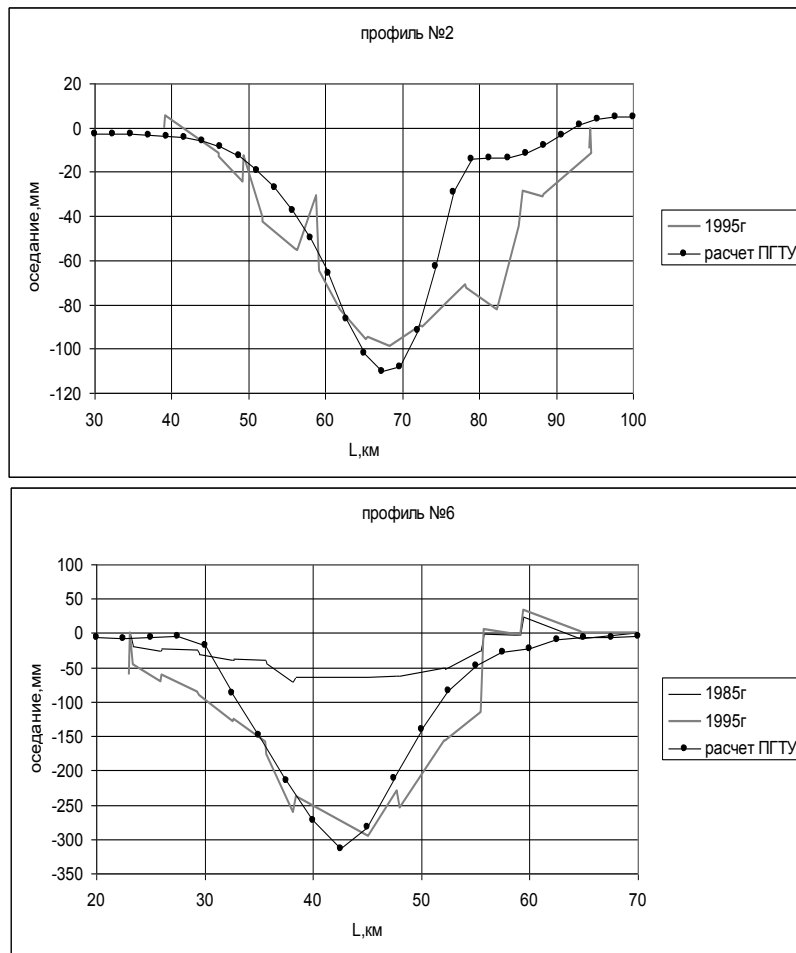


Рисунок 5 – Динамика развития деформационных процессов на Уренгойском месторождении

Результаты проведенных геодинимических исследований на Ашальчинском и Уренгойском геодинимических полигонах показывают, что при создании высотной основы необходимо учитывать особенности местных условий и то, что, на севере Западной и Восточной Сибири обновление государственной геодезической и высотной сети не выполнялось более 40 лет. В условиях интенсивной разработки недр в сложной физико-географической обстановке не обеспечивается ста-

бильность положения пунктов в плане и по высоте [37]. Это наглядно подтверждается результатами обследования пунктов государственной геодезической сети и государственной высотной основы на Песцовом и ряде других месторождений (рисунок 6) [37].



Рисунок 6 – Результаты обследования пунктов ГГС на Песцовом месторождении

При этом, полученные данные высокоточного нивелирования (когда нивелирные ходы прокладываются между двумя вынесенными за границы месторождения и считающихся «стабильными» реперами), могут вызвать затруднения в процессе сопоставления результатов повторных измерений по значениям абсолютных отметок реперов, а также когда измерения в одном цикле выполняются с перерывами в течение нескольких лет. Вынесенный пункт за пределы изучаемого месторождения в качестве «стабильного» может «попасть» на разрабатываемый участок смежного и, при этом, не обеспечивается абсолютная стабильность его положения.

Выполненный анализ показал следующее:

– традиционно применяемые методы изучения геодинамики, были призваны, прежде всего, выявлять обширные просадки земной поверхности. Обладая определенными достоинствами, они не удовлетворяют возросшим требованиям по оперативности, своевременности, и полноте представляемых сведений, из-за необходимости выполнения большого количества повторных измерений для до-

стижения поставленных целей. Это отрицательно сказывается на сроках и качестве выявления техногенной геодинамики;

– высокоточное нивелирование на большинстве месторождений выполняется разомкнутыми ходами без учета специфики местных условий. При этом нарушается соблюдение условия однозначности отсчета высот (превышений) для целей геодинамики, так как не обеспечивается единая локальная система высот на ГДП;

– применение современного метода радарной интерферометрии не обеспечивает надёжность результатов измерений, отражающееся на достоверности оценки геодинамического состояния изучаемой территории, а в некоторых случаях может дать диаметрально противоположные результаты.

Стало очевидным, что применяемые до последнего времени методы изучения геодинамических процессов перестали соответствовать возросшим требованиям времени как по срокам, так и по достоверности измерительной информации. Актуальной стала проблема поиска нового подхода к изучению геодинамических процессов, свободного от недостатков предшествующих подходов как по выбору методов измерений, принципу создания геодинамических сетей, так и по последующей обработке и интерпретации получаемых результатов.

2 МЕТОДИКА ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА

2.1 Предпосылки включения высокоточной гравиметрии в процесс мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа

Выполненный к настоящему времени на объектах с интенсивным техногенным воздействием на недра и окружающую среду большой объем высокоточных геодезических измерений показал, что в ряде случаев результаты измерений позволяют обеспечить большее разрешение. Это достигается выполнением комплексных высокоточных геодезических измерений и высокоточной гравиметрии в виде полноправных самостоятельных методов и совместной комплексной интерпретацией полученных данных [17, 23, 26, 27, 31, 34, 37, 65, 67].

При этом появляется возможность решить дополнительные задачи, в том числе:

- корректировку залежей УВ (рисунок 7) [67];
- уточнить особенности геолого-тектонического строения месторождений (рисунок 8) [67];
- выбрать плановые положения профилей, пересекающие тектонические нарушения на ГДП для выявления степени активности этих нарушений, определяющие геодинамическое состояние месторождения [67];
- уточнить частоту и количество необходимых циклов мониторинга техногенной геодинамики;
- уточнить объем перемещаемых масс в разрабатываемых недрах с оценкой геодинамического состояния на месторождении по данным высокоточного нивелирования и гравиметрии [27].
- подготовка технических решений выполнения геодинамического мониторинга, а также предложений по снижению негативных последствий ДЗП на устойчивость объектов жизнедеятельности месторождения;

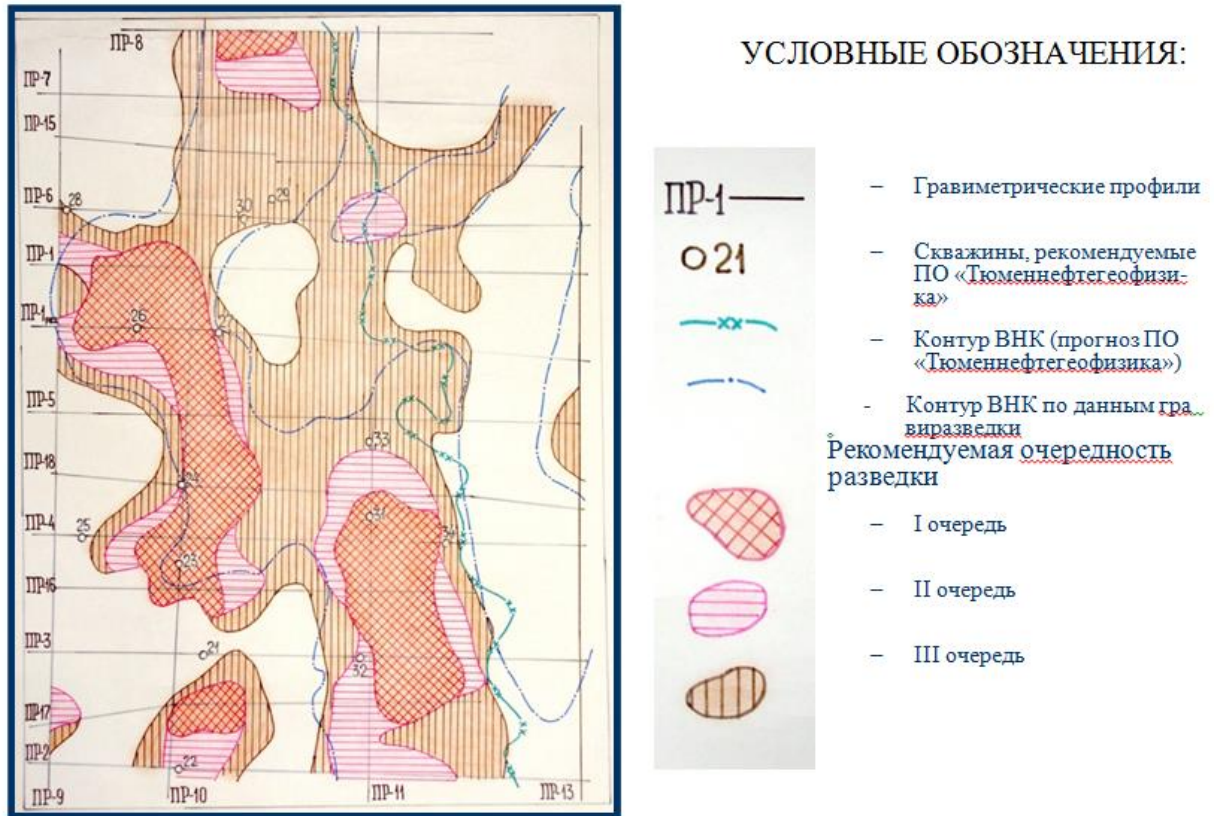


Рисунок 7 – Прогноз нефтегазоности на Южно-Иусском месторождении по данным гравиметрии

Выполненный анализ показал, что на ГДП перечисленные возможности гравиметрии не используются. Применение гравиметрии ограничивается использованием в качестве вспомогательного метода повышения точности высокоточного нивелирования, и в редких случаях для выявления изменений в приращениях ускорений силы тяжести на пунктах геодинимического полигона в различных циклах измерений.



Рисунок 8 – Уточненная схема тектонических элементов на Южно-Иусском месторождении по данным гравиметрии

Вместе с тем широкие возможности гравиметрии прошли, начиная с середины семидесятых годов прошлого столетия, научно-производственную апробацию:

- в Сибирском научно исследовательском институте геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГиМС) – в рамках тематики прямых поисков и разведки геофизическими методами месторождений УВ в Западной Сибири; поисков бокситов в районах Восточной Сибири; поисков железорудных месторождений в Кузбассе; полиметаллов в северо-западной части Рудного Алтая;

- во всесоюзном производственном объединении «Инженерная геодезия» - при выполнении исследований по выявлению особенностей проявления техногенной геодинамики при строительстве и эксплуатации крупных инженерных сооружений (гидроэлектростанций, атомных электростанций, горно-обогатительных комплексов);

– в Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ) при изучении природной и техногенной геодинамики в процессе разработки и эксплуатации месторождений УВ в Западной Сибири.

Методика детальной высокоточной гравиметрии, как высокоразрешающего *геодезическо-геофизического* метода, в комплексе с нивелированием и координированием, непосредственно направленного для решения целого ряда задач, возникающих при мониторинге локальной техногенной геодинамики для особо важных объектов, научно обоснована в работах [18, 23, 30, 65, 66].

Высокую степень разрешения гравиметрии и нивелирования показали опытно-производственные исследования в рамках хоздоговорных работ, проводимых СНИИГГиМС в 70 – 90-е гг. с целью разработки методик поисков и разведки месторождений железных и полиметаллических руд, алюминиевого сырья [26, 67].

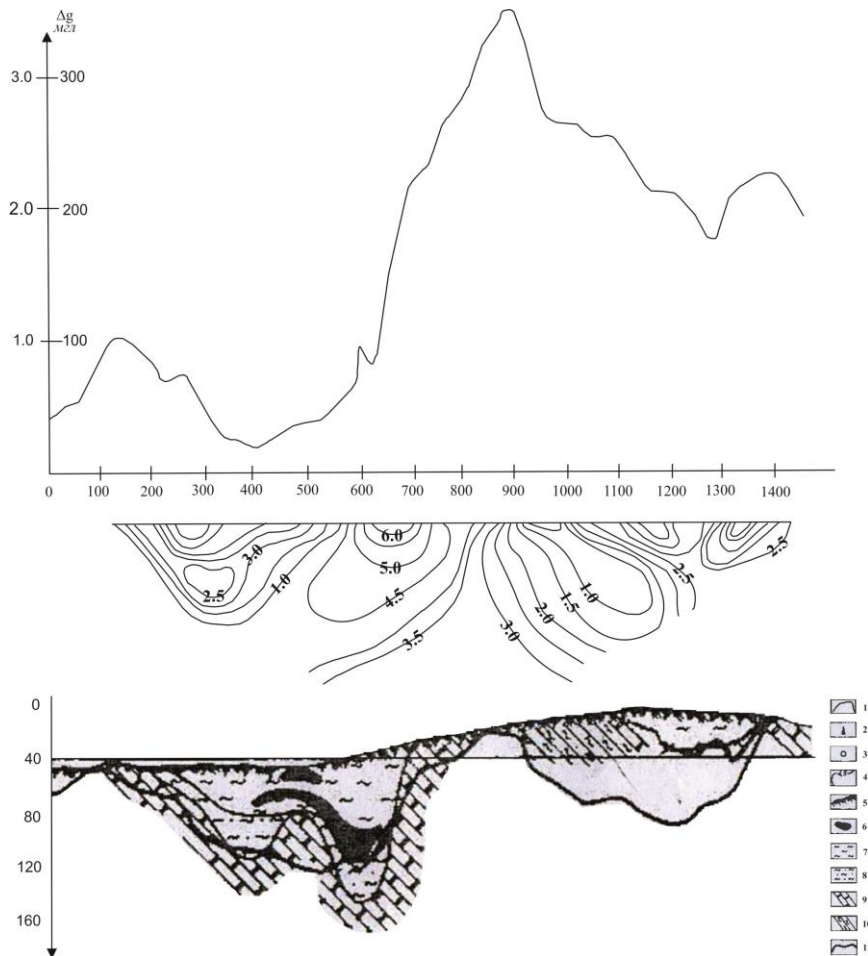
Показательным примером рационального комплексирования гравиметрии с нивелированием представляют результаты исследований по разработке методики разбраковки геофизических аномалий при поисках и разведке бокситов (алюминиевого сырья) в Восточной Сибири на территории Иркинеевского выступа Енисейского Кряжа (рисунок 9).

Эта таёжная территория была малообжитой, бездорожной, труднопроходимой. Предполагалось, что здесь на интенсивно дислоцированных образованиях протерозоя залегают в эрозионно-карстовых депрессиях и карстовых воронках бокситоносные отложения мел-палеогенового возраста. Эрозионно-карстовые депрессии в основном приурочены к зонам контакта сланцев с карбонатными породами. Контакт, как правило, имеет крутое падение. Карстовые воронки приурочены к карбонатным породам. Мощность рыхлых отложений в депрессиях и воронках может достигать 150 м.

Перед гравиметрией, как одним из геофизических методов, ставились следующие задачи: *а* – прослеживание контакта сланцев с карбонатными породами, *б* – картирование депрессионных зон и карстовых воронок, *в* – определение мощности рыхлых отложений, выполняющих депрессии и воронки. Физическими

предпосылками для решения указанных задач являлись различия в плотности рыхлых отложений и пород фундамента ($0,6 \text{ г/см}^3$), терригенных и карбонатных пород (от $0,3$ до $0,4 \text{ г/см}^3$).

Опытно-производственные поисково-картировочные геофизические работы выполнялись комплексно. Кроме гравиметрии (по площади и по расчетным профилям) проводились: электроразведка в различных модификациях и магниторазведка.



1 – кривая Δg ; 2 – забуренные скважины; 3 – шурфы; 4 – изолинии кажущихся плотностей; 5 – рельеф дневной поверхности; 6 – рудное тело; 7 – каолиновые глины; 8 – песчанистые глины; 9 – доломиты; 10 – бокситы; 11 - кривая формальной границы раздела двух сред, отличающихся по плотности

Рисунок 9 – Результаты интерпретации по профилю

В результате выполнения этих работ было выявлено большое количество локальных отрицательных аномальных зон. Бурение и закладка шурфов показали, что значительная часть из них не связана с депрессионными зонами. Чаще всего отрицательные аномалии соответствовали в плановом положении сланцевым образованиям. Остро обозначилась необходимость разбраковки отрицательных геофизических аномалий на основе высокоинформативного критерия. И он был найден. Суть его, образно говоря, лежала на поверхности: процесс карстообразования на границе сопряжения карбонатных пород и сланцев по мере поступления водных масс извне происходит постоянно, углубляя дно депрессионных зон и карстовых воронок. Он должен был сопровождаться незначительным, но постоянным проседанием земной поверхности. Динамика проседания не отражалась на топографических картах. Однако, нивелирование, сопровождающее гравиметрию, тенденцию проседания должно было отразить повышенной корреляцией с отрицательными аномалиями силы тяжести. Исходя из этого была разработана методика решения обратной задачи гравиметрии по количественной оценке изменения «кажущейся» плотности горных пород как в плане, так и по глубине (в условном по вертикали масштабе). Такое решение обратной задачи нашло затем самое широкое применение при поисках и разведке полиметаллов в Рудном Алтае и железных руд в Горной Шории и Кузнецком Алатау [24, 26].

Результаты мониторинга техногенной геодинамики при строительстве Богучанской ГЭС (БогЭС) показали высокую эффективность гравиметрии при выявлении источников геодинамических процессов.

Особенностью строительства БогЭС являлось возведение камнenaбросной плотины. Инфраструктура управления строительством располагалась на правом берегу реки Ангара. Там же, выше по склону в скальном грунте был пробит водотводной туннель, а выше (по течению) - начата разработка карьера с целью извлечения и транспортировки каменного материала для укладки в тело плотины.

С началом строительства на правобережном склоне, примыкающем к плотине, был создан геодинамический полигон, состоящий из сети цельноцементных центров глубокого заложения в скальном грунте. Все центры были оборудованы

устройствами принудительного центрирования. Все пункты геодинимической сети были надёжно «привязаны» к пунктам и реперам Государственной плановой и высотной основы.

Мониторинг горизонтальных смещений пунктов геодинимической сети (ГС) осуществлялся по результатам триангуляционных измерений, вертикальных – высокоточным нивелированием. Эти работы изначально проводились силами топографо-геодезической службы БоГЭС.

С определённого времени по результатам высокоточных геодезических измерений стали фиксироваться смещения пунктов (реперов) геодинимической сети в направлении к створу плотины. Значения годовых смещений в плане и по высоте имели сантиметровый диапазон. Через некоторое время начали сказываться последствия смещений: порывы в коммуникациях, образование трещин в фундаментах зданий и сооружений, водоотводном туннеле. Затем на местности обозначились две линии трещин отрыва масс, слагающих склон примыкания к плотине. Линии представляли дугообразную конфигурацию с направлением радиуса кривизны в сторону примыкания плотины к правобережью реки Ангара.

Требовалось выявить причину смещений и дать рекомендации по стабилизации ситуации.

Была выполнена площадная гравиметрическая съёмка на территории, охватывающий правобережный склон, примыкающий к плотине, с продолжением вверх по течению реки Ангара с захватом площади карьера, где добывался каменный материал для укладки в тело плотины.

Результаты обработки и комплексной интерпретации данных гравиметрии и нивелирования точек измерений показали, что в карьере добывается каменный материал долеритовой интрузии, имеющей субвертикальное по глубине и кулисообразное в плане строение, от которой на глубине порядка 600 м отходит «ветвь», плавно поднимающаяся в сторону створа плотины, не доходя до поверхности на глубине порядка 50 – 60 м (рисунок 10). Стало очевидным что, причиной смещения слоёв горных пород, слагающих склон примыкания к плотине, является «эф-

факт наковальни»: взрывы в карьере отдаются содроганием и смещением масс, слагающих его.

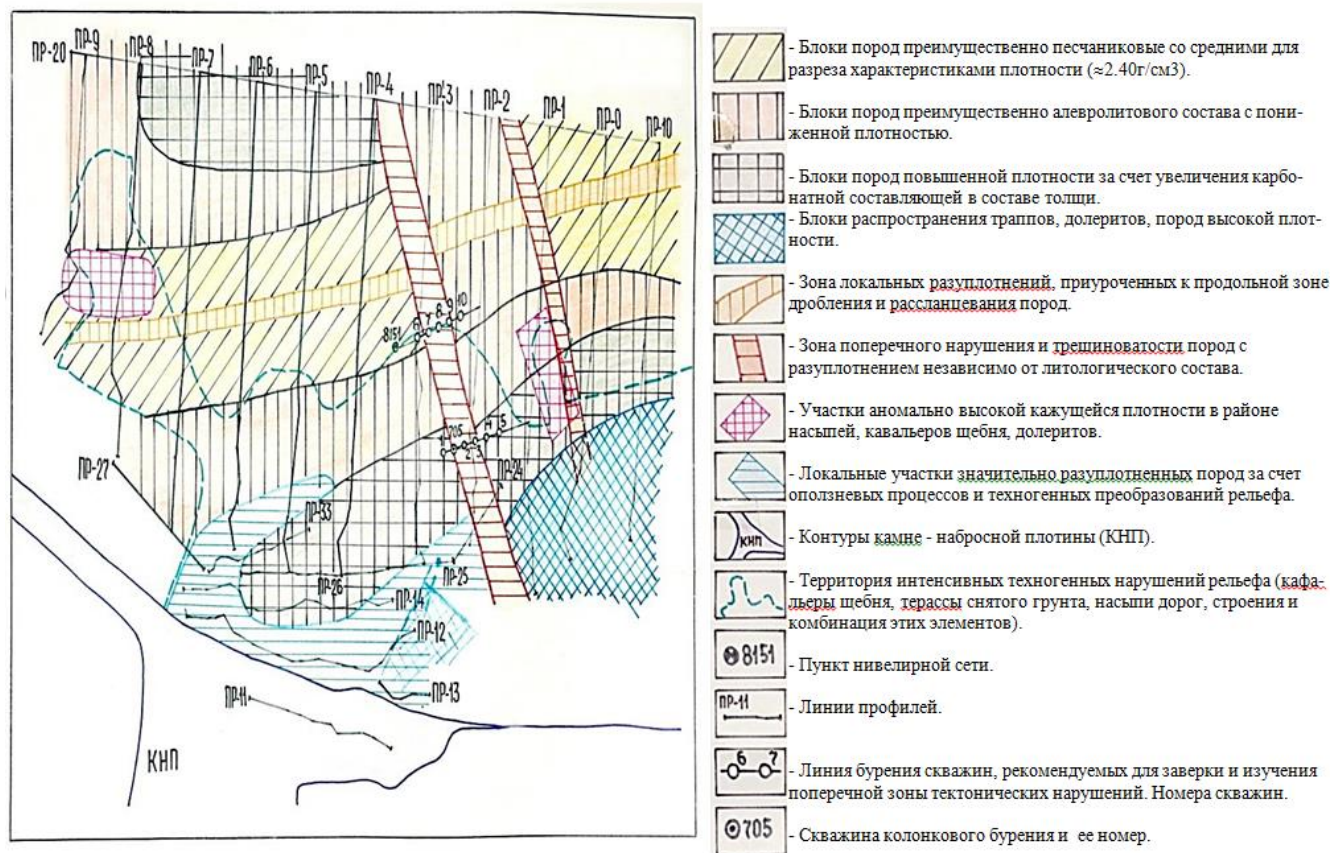


Рисунок 10 – Структурно-тектоническая строение площадки БоГЭС по гравиметрическим данным

В итоге были даны рекомендации: карьер закрыть, перенеся добычу каменного материала в массиве долеритовой интрузии, расположенной в нескольких километрах от левобережья БоГЭС в направлении к городу Кодинску. Рекомендации были приняты и реализованы. Ситуация стабилизировалась.

Приведённые примеры показали необходимость, проведения мониторинга природной, и техногенной геодинамики как единого комплекса независимых высокоточных геодезических (плановых и высотных) и гравиметрических измерений с последующей комплексной интерпретацией их результатов на основе решения не только и не столько прямых, но и обратных задач с целью выявления конкретных причин, обуславливающих проявление геодинамических процессов.

2.2 Методика автономного мониторинга вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности, изменения силы тяжести на пунктах геодинамических полигонов

Практикой выполнения полевых геодезических работ, выполненными в различных регионах нашей страны установлено, что значения высот пунктов, содержащиеся в каталогах, в ряде случаев не отражают их фактическое положение.

Они обусловлены такими явлениями как оседание или выпучивание земной поверхности, проявляющиеся в районах интенсивного техногенного воздействия.

В большинстве случаев подобная ситуация наблюдается в районах вечной или сезонной мерзлоты и на заболоченных территориях. К северу от широтного течения реки Обь в Западной Сибири эти явления наблюдаются повсеместно [31, 36].

С учетом этих факторов проектировать геодинамическую сеть необходимо как автономную систему сохранившихся и вновь закладываемых центров, пункты которой привязываются к одному, наиболее сохранившемуся, условно принимаемого за исходный, пункту (или реперу) Государственной сети. Такой подход позволяет оценивать вертикальные и горизонтальные смещения пунктов геодинамической сети, а также аномального гравитационного поля, всех циклах натуральных высокоточных измерений относительно начального, определенного в первом цикле значения на исходном пункте (репере).

Вместе с тем, необходимо уделить особое внимание на особенности оформления пунктов опорной гравиметрической сети ГДП. Практика выполнения измерений относительными гравиметрами с пружинной кварцевой системой на гравиметрических пунктах ГДП, представляющих собой бетонную плиту для установки гравиметров, подтвердила эффект воздействия звукового излучения Земли на отсчеты по гравиметру [17]. Они косвенно подтвердили выводы о недопустимости специального оформления опорных гравиметрических пунктов с закладкой бетонных плит, которые предусматривались для основных и запасных гравиметрических пунктов Государственной опорной гравиметрической сети первого

класса, совмещённых с пунктами фундаментальной астрономо-геодезической сети. На этих пунктах для выполнения измерений использовались абсолютные баллистические гравиметры, с чувствительной системой, не реагирующей не только на звуковые излучения Земли, но и на сейсмические события, вызванные природными и техногенными причинами [17]. Гравиметрические измерения на ГДП в районах с высокой сейсмичностью и техногенных вибраций, в том числе звукового диапазона, показали, что оформление гравиметрических опорных пунктов в виде плиты приводит к «разбросу» измеряемых приращений силы тяжести в пределах 0,5 – 1,5 мГал. По этой причине, на геодинимическом полигоне гравиметр необходимо устанавливать на грунт рядом с пунктом (репером), на переносную подставку, входящий в комплект гравиметра, Приведение отсчета по гравиметру к верху марки пункта (репера), на которой производится измерение, выполняется введением поправки за разницу высоты пяток (панели) гравиметра относительно верха марки.

При ведении мониторинга природной и техногенной геодинимики на ГДП необходимо обеспечить наибольшую точность измерений, которая достигается, в том числе, за счет высокой жесткости построения наблюдательной сети. Практикой установлено, что наибольшая жесткость геодезической сети локальных ГДП достигается при соблюдении принципов их построения, изложенных в работах [16, 22, 66].

Опорная плановая сеть ГДП создается в трёхступенчатой иерархии. Первая ступень – опорная каркасная, представляющая собой геодезический четырёхугольник (допускается-треугольника) с увязкой координат не менее чем на четыре-пять пунктов Международной геодинимической сети GPS (IGS); вторая ступень – тригональная сеть опорных пунктов сгущения, определенных с пунктов каркасной сети; третья ступень – «рядовая» система плановых координат пунктов-реперов нивелирования и гравиметрии, определённых от опорных пунктов [25].

Каркасная сеть представляет высокоточное построение для территории геодинимического полигона, один пункт которого «привязывается» к международ-

ной геодинимической сети с наиболее возможной высокой точностью спутниковым сетевым методом в режиме «классической статики».

Между пунктами опорной каркасной сети развивается опорная сеть сгущения. В качестве исходных пунктов при определении пунктов опорной сети сгущения используются пункты опорной каркасной сети.

Пункты опорной плановой сети совмещаются с опорными гравиметрическими пунктами и реперами высокоточного нивелирования. Система, состоящая из таких совмещенных пунктов, является опорной геодинимической сетью.

Планово-высотная «рядовая» система пунктов-реперов и гравиметрии развивается между пунктами опорной геодинимической сети. В качестве исходных пунктов принимаются пункты опорной каркасной сети и опорной сети сгущения.

Нивелирование и гравиметрия выполняется по петлевой системе замкнутых рейсов (ходов) с узловыми точками в местах пересечения ходов (рейсов) одним общим исходным пунктом [23, 30].

Суть этой методики измерений заключается в следующем (рисунок 11).

Все нивелирные ходы или гравиметрические рейсы должны начинаться и заканчиваться на одном исходном пункте (репере). Должно соблюдаться однообразие в последовательности перемещения в ходах или рейсах (или только по часовой стрелке, или только наоборот). Они должны иметь одну или две общие (узловые) точки с предыдущими рейсами (ходами) и последующим. Этим обеспечивается создание единой системы замкнутых петлевых ходов или рейсов, в котором узловой пункт для предыдущего хода (рейса) является конечным, а для последующего – начальным [23, 30].

Оригинальность методики заключается в том, что она позволяет производить контроль качества и уравновешенности по внешней сходимости между рейсами (ходами) а также исключении систематических погрешностей в рейсах (ходах), за счет предположения, что на точность измерений оказывают влияние только случайные ошибки (систематические исключаются предварительным линейным разбросом невязки).

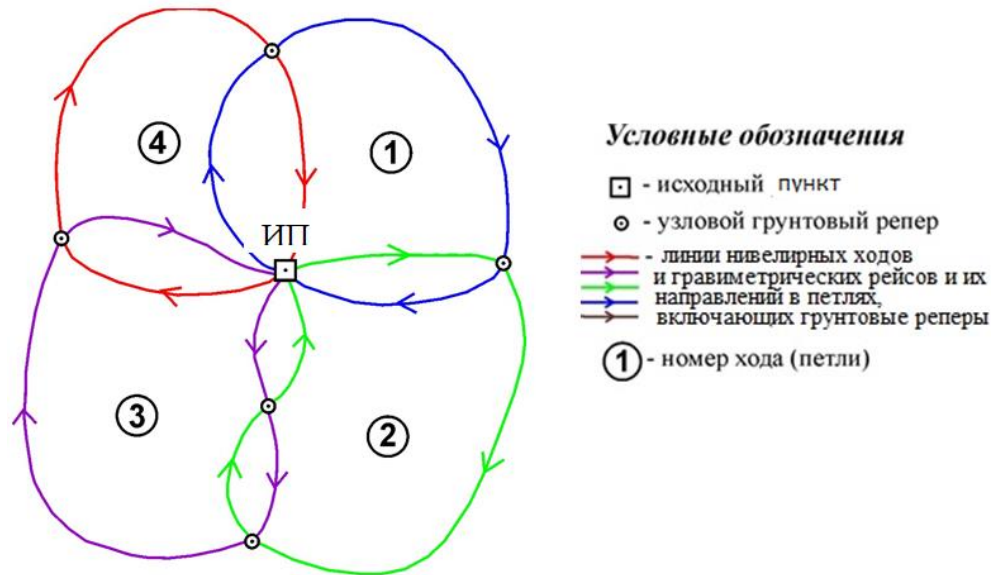


Рисунок 11 – Схема единой петлевой системы замкнутых ходов (рейсов)

При линейном изменении нуль-пунктов гравиметров невязки f на узловых пунктах в среднем должны быть равны величине [23, 30]

$$f = \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} = \sqrt{2} \cdot \varepsilon_0, \quad (1)$$

где ε_0 – средняя допустимая величина средней квадратической погрешности определения приращения силы тяжести или превышения в ходе (рейсе);

ε'^2 и ε''^2 – средние квадратические погрешности арифметической середины по внутренней сходимости на пункте (репере) в предыдущем и последующем ходе (рейсе) [23, 30].

Рассматриваемая методика измерений может дать более высокое качество результатов при дополнительном учете криволинейной составляющей изменения нуль-пункта гравиметров в рейсах [23, 30].

Если общая средняя криволинейная составляющая нуль-пункта по всем гравиметрам, участвующим в рейсе (петле), меняется по параболическому закону, а продолжительность рейса (хода) обозначить через T , то с учетом того, что криволинейная составляющая нуль-пункта гравиметра в начале и конце рейса (хода) равняется нулю, будем иметь

– увеличением числа узлов перекрытия отдельных петель до двух (рисунок 11 - петли 2 и 3);

– введением «жесткого» геометрического условия, представленного дополнительным уравнением погрешности в виде

$$\sum_{i=1}^n a_i \tau_i (T/2) = 0,25 \sum_{i=1}^n a_i T i = v_i \quad (5)$$

с целью исключения деформации центральной системы рейсов относительно ее варианта с предположением о линейном изменении нуль-пунктов гравиметров.

Следует отметить, что второе условие может быть исключено, если первое обеспечивается не менее, чем тремя избыточными узлами во всей замкнутой системе рейсов.

Выбор «весов» уравнений погрешностей производится, исходя из числа измерений на узловых точках, или обратной пропорциональности квадратам средних квадратических погрешностей измерений по внутренней сходимости. Не представляет затруднений и составление уравнений погрешностей (3) с учетом формулы (5) в зависимости от направления рейсов (ходов) по каждой петле [23, 30].

Контролем качества уравнивания нивелирования или гравиметрии является величина средней квадратической погрешности, рассчитанная по внешней сходимости парных измерений, то есть по невязкам f на узловых пунктах

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{[2f^2]}{2n}} = \sqrt{\frac{[f^2]}{n}}, \quad (6)$$

где n – число узлов в уравниваемой системе нивелирования или гравиметрии.

Особо следует отметить, что положение в плане и по высоте исходного (узлового) пункта в последующих циклах измерений считается (условно) неизменным. Это позволяет определять вертикальные и горизонтальные смещения зем-

ной поверхности, а также изменения аномального гравитационного поля относительно полученных для него первоначальных значений в первом цикле [23, 30].

Порядок выполнения натуральных измерений, обработки и уравнивания результатов измерений, анализа и интерпретации полученных данных представленной методики геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа подробно изложена на примере ее практической реализации при мониторинге техногенной геодинамики на Спорышевском и Вынгапуровском геодинамических полигонах в разделе 4.

Таким образом, широкие возможности гравиметрии продемонстрированные в ходе выполнении различных геолого - поисковых работ, выяснения причин проседаний дневной поверхности на крупных объектах строительства, стали определяющими факторами необходимости включения гравиметрии в геодезический метод мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях углеводородов.

Методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях углеводородов в комплексе с гравиметрией позволяет более оперативно, на более высоком качественном уровне выполнить геодезическо-гравиметрические измерения и интерпретацию результатов.

3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА

3.1 Подготовительный этап

Технологическое решение реализации методики геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа представлено на рисунке 12.

Результаты геодезическо-гравиметрического мониторинга напрямую зависят от полноты и качества выполненного анализа исходной информации по месторождению и полученного представления о геодинамическом режиме изучаемой территории по составленным цифровым моделям местности и геолого-физической модели месторождения. Поэтому, в технологическом решении особое место отведено сбору, изучению исходной (геологической, промысловой, статистической, топографо-геодезической, физико-географической и другой) информации. Эта информация, особенно на подготовительном этапе мониторинговых работ, требуется для составления общего представления об особенностях геолого-тектонического строения месторождения, возможного влияния на ее устойчивость техногенного воздействия, связанного с интенсивной разработкой и извлечением из продуктивных пластов УВ. При этом для проектирования наблюдательной сети важной становится учет статистической информации по авариям на трубопроводных сетях и на других объектах инфраструктуры месторождения.

Изучение существующей геологической информации дает общее представление о структуре месторождения, выявленных тектонических нарушениях, проекции их планового положения на земной поверхности. Промысловая информация позволяет оценить техногенную нагрузку, объемы извлеченных из продуктивных пластов углеводородов и замещаемых водных масс. Особое место занимает статистика отказов на объектах инфраструктуры месторождения, плановое положение которых и частота событий в определенном месте могут свидетельствовать об их связи с активными тектоническими нарушениями, не выявленными ра-

нее. По сведениям, полученным в результате анализа перечисленной информации, составляется предварительная физико-геологическая модель месторождения, которая в комплексе со всей имеющейся остальной информацией учитывается при проектировании наблюдательной сети ГДП.

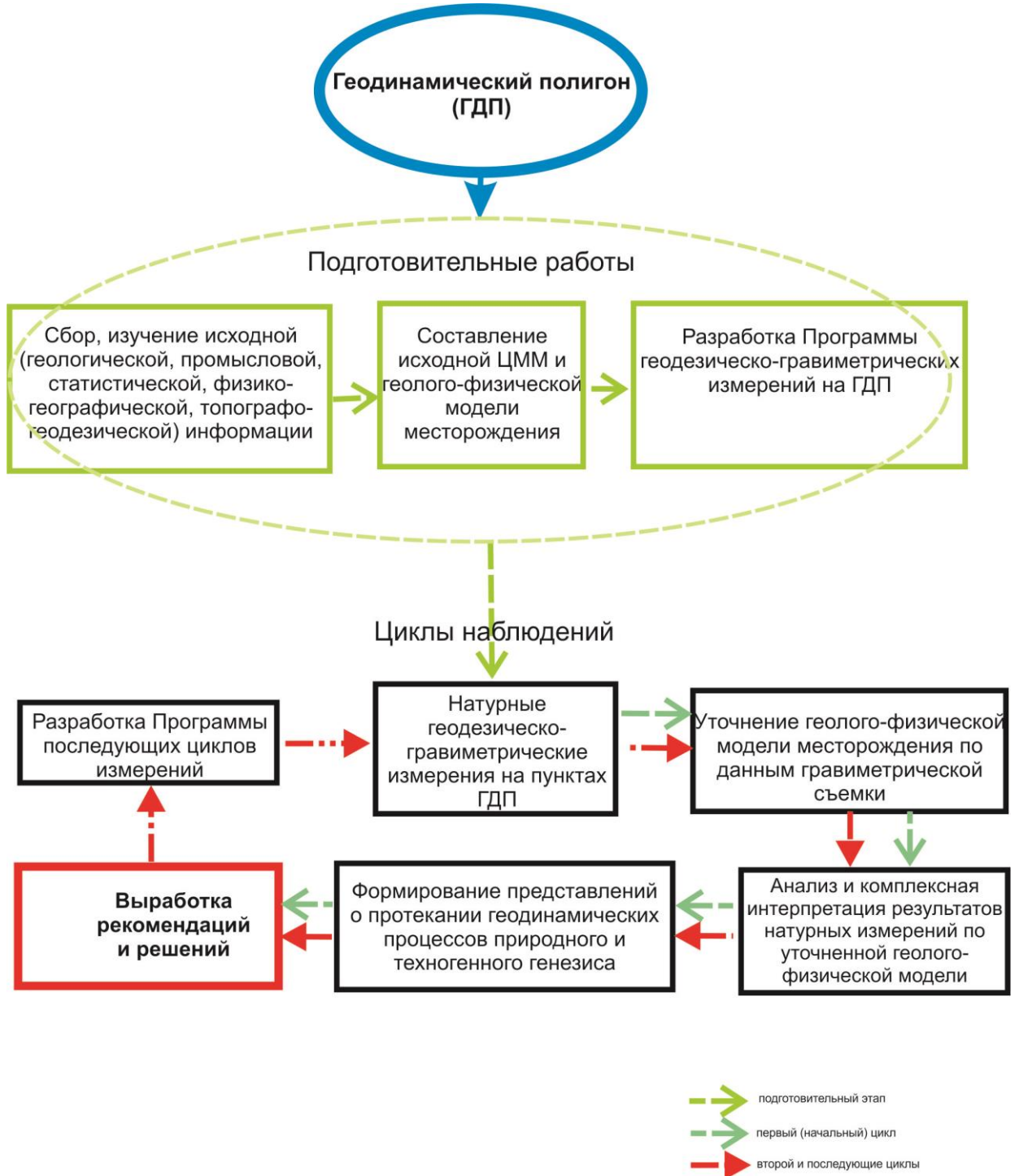


Рисунок 12 – Схема технологического решения методики геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа

Порядок выполнения полевых геодезическо-гравиметрических измерений на ГДП, регламентируется в программе работ, разрабатываемой перед выездом на полевые работы.

В программе отображается методика выполнения работ по развитию плановой, высотной и гравиметрических сетей, организации работ, техники безопасности, мероприятия по охране окружающей среды, требования к приборам, предназначенным для измерений, а также приводятся схемы сетей, чертежи центров, использующихся на пунктах ГДП.

На этом подготовительный этап завершается, и приступают к выполнению полевых работ по рекогносцировке, обследованию исходных пунктов ГГС и высотной сети. Производится закладка пунктов геодинамической сети для выполнения натуральных измерений на пунктах ГДП в первом цикле.

3.2 Циклы наблюдений

В первом цикле наблюдений на ГДП геодезические и гравиметрические измерения выполняются с целью формирования представлений о протекании геодинамических процессов природного и техногенного генезиса.

Для этого выполняются работы по уточнению геолого-тектонического состояния месторождения с целью выявления участков с опасными деформациями по данным комплексной интерпретации результатов высокоточных геодезических измерений и высокоточной гравиметрической съемки.

Геодезическое обеспечение высокоточной гравиметрической съемки заключается в создании разреженной опорной плановой и высотной сети, между пунктами которой развивается рядовая (мобильная сеть).

Жесткость создаваемой опорной геодезической плановой и высотной сети обеспечивается за счет избыточных измерений. При этом линии нивелирных ходов, проложенных по опорным пунктам, образуют замкнутые полигоны, в которых начальным и конечным является один исходный пункт (репер). Высоты пунктов рядовой сети определяются из высокоточного нивелирования, путем включения в измерения пунктов рядовой сети, расположенных вдоль линии высо-

коточного нивелирования проложенного между опорными пунктами. Высоты остальных пунктов рядовой гравиметрической сети, не включенных в высокоточное нивелирование, определяются нивелированием IV класса.

Ранжирование гравиметрической сети зависит от типа применяемых гравиметров. Гравиметрическая сеть может быть трехярусной, состоящей из опорной, опорной сгущения и рядовой или двухярусной, состоящей из опорной и рядовой сетей.

Геодезические и гравиметрические измерения выполняются в соответствии с Программой наблюдений.

Плановое положение пунктов опорной сети определяются по программе создания сетей СГС-1, высоты пунктов - из результатов нивелирования II класса повышенной точности. Высоты пунктов рядовой сети определяются нивелированием IV класса, а координаты - не грубее точности высотного обоснования пунктов рядовой гравиметрической сети.

Гравиметрические измерения начинаются с создания опорной гравиметрической сети, между пунктами которых выполняются рейсы по пунктам рядовой сети в соответствии с методикой, изложенной в 2.2.

Уточненная геолого-тектоническая модель ГДП является продуктом комплексной интерпретации данных геофизических методов разведки, данных линейного анализа форм рельефа, выполненного на космических снимках высокого разрешения и других сведений с использованием схемы (карты) локальных аномалий силы тяжести, полученной по результатам геодезических и гравиметрических измерений.

Для получения карты локальных аномалий силы тяжести производится определение исходного аномального поля силы тяжести и исключение из него регионального фона.

Определение исходного аномального поля силы тяжести на участке работ производится в следующей последовательности:

а) вычисление значений нормального поля Земли с принятым условным уровнем отсчета в редукции Буге в двух вариантах:

- с нормативным значением плотности горных пород $\sigma = 2,67 \text{ г/см}^3$;
- с принятой для территории работ плотностью $\sigma = 2,0 \text{ г/см}^3$ (для районов, расположенных севернее широтного течения реки Обь);

б) вычисление поправок за гравитационное влияние промежуточного слоя топографических масс определяются как суммы двух поправок:

- за притяжение параллельного слоя;
- за отклонение реальной поверхности от параллельного слоя.

Полученное поле аномалий силы тяжести отражает влияние всех геологических факторов в том числе неоднородностей, слагающих разрез месторождения.

Одним из методов выделения региональный фона из исходного аномально-го гравитационного поля является метод осреднения с использованием цифровой модели аномального поля силы тяжести. Для этого подбирается размер контура палетки осреднения таким образом, чтобы в локальных аномалиях наиболее наглядно отразились плотностные неоднородности продуктивных горизонтов и осадочного чехла изучаемой территории [3, 31, 47].

Комплексная качественная интерпретация поля локальных аномалий силы тяжести, результатов геодезических измерений, ранее проведенных сейсмических исследований позволяет выделить участки возможных активных деформаций на территории ГДП. При наличии материалов ранее выполненных подобных работ формируется представление о протекании геодинамических процессов как природного, так и техногенного генезиса, позволяющее сделать выводы о геодинамическом состоянии на ГДП и дать рекомендации о проведении режимных наблюдений по их мониторингу в последующих циклах.

Второй цикл наблюдений выполняется с целью изучения геодинамического режима локализованных участков с повышенными рисками возникновения на них опасных деформаций земной поверхности, выявленных по результатам первого цикла. Для этого в программе второго цикла измерений отражаются особенности выполнения натурных измерений по профилям, пересекающим участки с возможными деформационными процессами. В натурные измерения второго цикла в обязательном порядке включаются все пункты опорной геодинамической сети, зало-

женные в первом цикле измерений, пункты государственной геодезической и маркшейдерской сети, расположенные в непосредственной близости от профильных линий, а также пункты геодинамического полигона, на которых были выполнены измерения в первом цикле. В соответствии с требованиями Инструкции [56] пункты профильных линий, по возможности, должны располагаться через 500 м, а в местах пересечения границ участков с тектоническими нарушениями - через 100 м. Практика выполнения работ на геодинамических полигонах показала, что такая плотность пунктов позволяет выявить проявление ДЗП. По возможности, второй цикл натурных наблюдений необходимо разделить на два этапа, в которых все измерения выполняются в полном объеме.

Подобный подход дает возможность выполнить сопоставление получаемых параметров (плановые координаты, высоты, значения локальных аномалий силы тяжести) с целью выявления не только трендовых, но и их короткопериодных проявлений в ДЗП.

Сравнение аномальных полей силы тяжести позволяет судить о возможном перемещении масс в недрах разрабатываемого месторождения. При этом возможно выявление вновь появившихся участков с повышенной степенью геодинамического и промышленного риска. При необходимости проводится количественная интерпретация выявленных аномалий. Комплексная интерпретация данных сопоставления результатов геодезических и гравиметрических измерений двух циклов даст возможность предварительно сформировать представление о происходящих геодинамических процессах на месторождении и выработать рекомендации как о порядке проведения геодинамического мониторинга в последующих циклах, так и мероприятий по безопасному ведению работ на этих участках.

Представленная во втором разделе методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа и в третьем разделе - технологическое решение были реализованы в СГУГиТ для проведения геодинамических исследований на геодинамических полигонах ОАО «Газпромнефть» - Спорышевском, Вынгапуровском, Западно-Суторминском; ООО «Газпром нефть Новый Порт» - Новопортовское, ООО «Новосибирскнефтегаз» - Верх-Тарское. С

учетом того, что лицензионный участок Западно-Суторминского месторождения является незначительной частью общего (одного из крупнейших) Суторминского месторождения, на котором не проводились геодинамические исследования, а исследования на Новопортовском и Верх-Тарском ГДП проведены только по программе первого цикла наблюдений, в качестве примеров их рассматривать не целесообразно. Результаты практического применения методики геодезического мониторинга техногенной геодинамики, и ее технологического решения приведены в следующем разделе на примере двух геодинамических полигонов: Спорышевского и Вынгапуровского.

4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ НЕФТИ И ГАЗА НА ПРИМЕРЕ СПОРЫШЕВСКОГО И ВЫНГАПУРОВСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНОВ

4.1 Результаты мониторинга техногенной геодинамики на Спорышевском геодинамическом полигоне

Месторождение расположено в Ямало-Ненецком автономном округе Тюменской области в непосредственной близости (к северо-востоку) от города Ноябрьск на площади 600 км^2 вдоль водораздела северного направления. На ГДП этого месторождения было выполнено три цикла натуральных измерений. Первый цикл мониторинга природной и техногенной геодинамики на месторождении проведен в период с декабря 2005 г. по ноябрь 2007 г. Второй цикл выполнялся в период с сентября по декабрь 2009 г. и третий - в период с апреля по сентябрь 2010 г.

Именно на Спорышевском месторождении при проведении мониторинга природной и техногенной геодинамики гравиметрический метод был впервые применен как самостоятельный в комплексе с традиционными высокоточными геодезическими методами (координированием и нивелированием) [31].

Для наблюдения за геодинамическим состоянием территории месторождения в первом цикле была создана опорная геодинамическая сеть пунктов-реперов [25]. Она предназначалась для выявления горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности, а также изменения плотностных характеристик разреза месторождения и уточнения геолого-тектонического строения. Построение опорной геодинамической сети пунктов-реперов выполнялось по методике изложенной в 2.2 .

Опорная сеть ГДП состояла из каркасных пунктов-реперов и пунктов-реперов сгущения на которых были выполнены высокоточные определения плановых координат, высот пунктов и аномального гравитационного поля.

Небольшая часть пунктов геодинамической сети (как правило, опорных каркасных) располагалась за границами лицензионного участка в местах, не подверженных техногенным воздействиям, связанных с разработкой месторождения.

Опорная плановая сеть полигона представляла собой совокупность 14 пунктов и их пунктов-спутников, состоящая из треугольников и геодезических четырехугольников, стороны которых представляют собой независимые базовые линии. Связь с государственной геодезической основой была осуществлена путем включения в геодинамическую сеть трех пунктов ГГС. Развитие опорной плановой основы осуществлялось в два этапа. На первом этапе была создана опорная каркасная сеть, состоящая из четырех пунктов, один пункт которого, принятый условно исходным, был определен от трех пунктов Международной геодинамической сети пяти суточными непрерывными наблюдениями. Наблюдения на пунктах опорной каркасной сети, выполнялись в режиме «классической статики» с использованием двухчастотной спутниковой аппаратуры сетевым методом

Схема опорной планово-высотной основы Спорышевского ГДП приведена на рисунке 13.

При развитии опорной сети сгущения также применялся сетевой метод. Наблюдения велись в режиме «классической статики» по зонам, имеющие общие связующие пункты. Базовые линии опорной сети сгущения определялись из двух непрерывных, сеансов наблюдений с продолжительностью каждого сеанса более двух часов. Каждая базовая линия определялась независимо.

Пункты каркасной сети и опорной сети сгущения являлись основой для определения пунктов заполняющей и рядовой сетей.

Спутниковые наблюдения на пунктах заполняющей сети выполнялись сетевым методом в режиме «быстрой статики». Продолжительность наблюдений на них составляла не менее 0,5 ч. В заполняющую сеть были включены все занивелированные по программе I и II классов пункты, не вошедшие в опорную сеть. В качестве исходных при определении координат пунктов заполняющей сети использовались пункты каркасной сети и опорной сети сгущения.

Спутниковые наблюдения на пунктах рядовой сети были выполнены лучевым методом в режиме «быстрой статики». Продолжительность наблюдений на них составляла 10 – 15 мин. В качестве исходных для них служили пункты каркасной, опорной сгущения и заполняющей сетей.

Нивелирование I и II классов выполнялось в течение осени 2006 г. и весны 2007 г. [25].

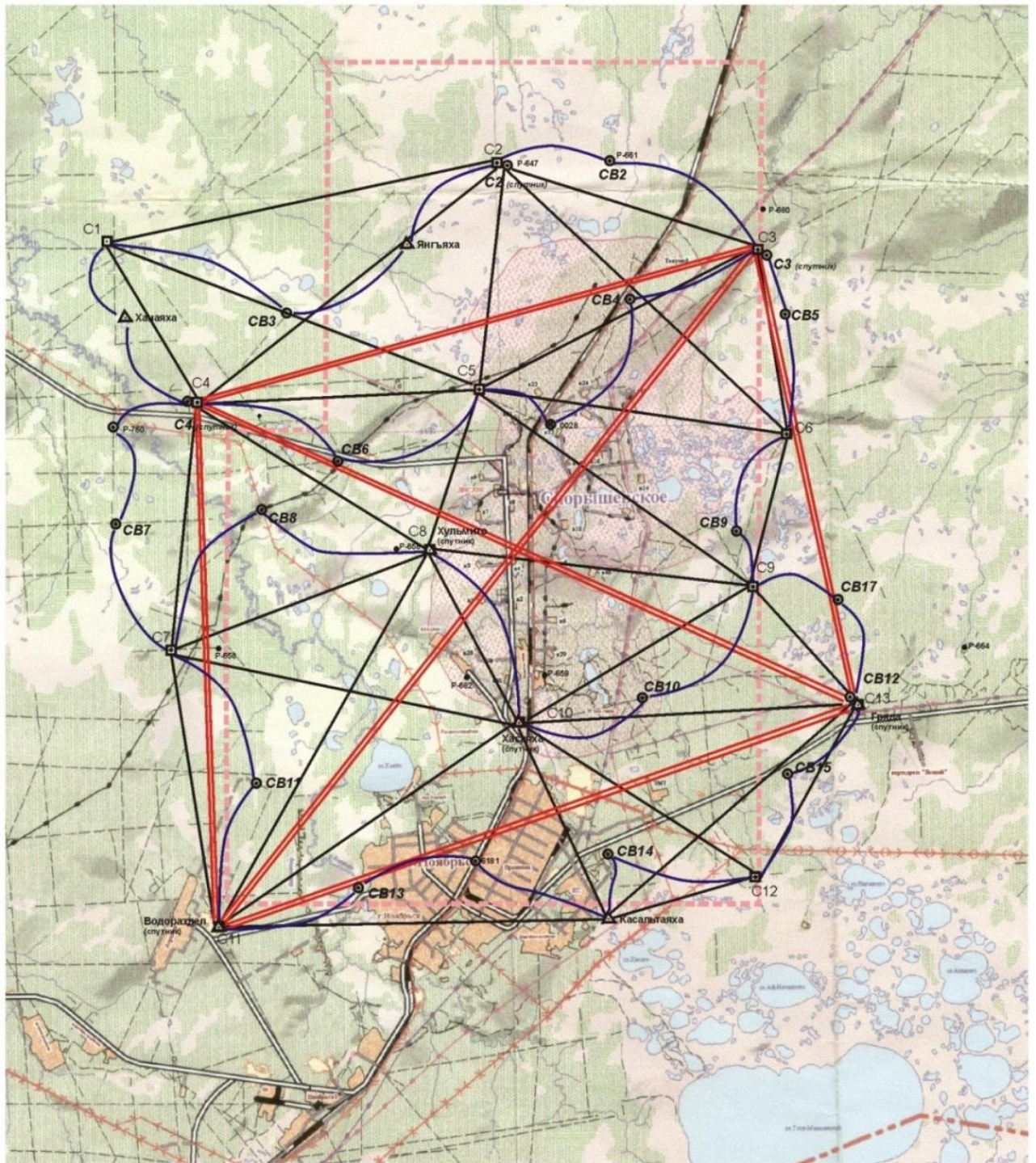
Из-за резко континентального климата и покрытия труднопроходимыми болотами в большей своей части район работ относится к труднодоступным. Поэтому выполнение работ производилось осенью 2006 г. по дорогам, а в апреле 2007 г. - по замёрзшим болотам.

В 2006 г. объем работ по нивелированию I класса составил 109,1 км, в 2007 г. 69,8 км (включая повторные наблюдения для контроля смежных секций 2006 г.). Общий периметр сети нивелирования I класса на геодинамическом полигоне составил 158,5 км. Внутри полигона нивелирования I класса в виде отдельных линий было выполнено нивелирование II класса повышенной точности. Объем работ по нивелированию II класса составил 74,2 км.

При создании высотной основы были выполнены требования «Инструкции» [19], согласно которой «твёрдые» реперы нивелирования I класса отстояли от границы месторождения на расстоянии не менее восьмикратной глубины залегания эксплуатируемых горизонтов.

В нивелирование I и II классов были включены все пункты опорной планово-высотной основы ГДП, пункты ГГС, реперы Государственной нивелирной сети (рисунок 13).

Высоты пунктов рядовой гравиметрической сети определялись методом технического нивелирования. Схема сети технического нивелирования приведена на рисунке 14.



Условные обозначения

- | | | | |
|----|--|--|---|
| □ | - пункты плановой, высотной и гравиметрической основы каркасной и заполняющей сети | | - линии нивелирования |
| □⊙ | - пункты плановой, высотной и гравиметрической основы с пунктом спутником | | - граница земель месторождения |
| ▲ | - пункты плановой, высотной и гравиметрической основы с пунктом ГГС в качестве пункта спутника | | - базовые направления плановой каркасной сети |
| ●▲ | - пункты ГГС и государственной нивелирной сети | | - направления плановой каркасной сети |

Рисунок 13 – Опорная планово-высотная основа Спорышевского ГДП

С учётом высокой точности и относительной стабильности изменения нуль-

пункта используемых гравиметров при измерении приращений силы тяжести на опорных пунктах была применена (рисунок 11) одноступенчатая петлевая центральная система рейсов. Петли гравиметрических рейсов начинались и заканчивались на одном исходном пункте и перекрывались в общих узловых пунктах. Последние служили в качестве контрольных точек измерений и обеспечивали возможность корректировки учёта изменения нуль-пунктов гравиметров (рисунок 15).

В качестве исходного пункта был принят пункт С-10, уровень силы тяжести в котором был принят условно исходным, в том числе и для последующих циклов измерений.

В рейсах использовалась группа, состоящая из пяти гравиметров, типа ГНУ КВ. Каждая петля с учётом результатов на узловых пунктах выполнялась независимо в двух и более рейсах. В результате на каждом опорном гравиметрическом пункте (ОГП) было произведено от восьми до двадцати двух измерений. Каждый рейс начинался и заканчивался серией измерений на исходном пункте с включением дополнительных точек с целью введения гравиметров в рабочий режим и обеспечения надёжности получения исходных и замыкающих отсчётов на нем.

Гравиметрические измерения в рядовой сети и выполнялось в два этапа. Измерения в первом этапе выполнялись зимой 2006 г., а летом 2007 г. были выполнены измерения второго этапа.

При работах в зимний период использовались пять гравиметров, в летний – четыре.

Площадная гравиметрическая съёмка на Спорышевском полигоне выполнялась в соответствии с требованиями инструкции по гравиразведке [19]. Перед началом работ приборы в течение часа приводились в рабочий режим. Наблюдения начинались и заканчивались на ОГП.

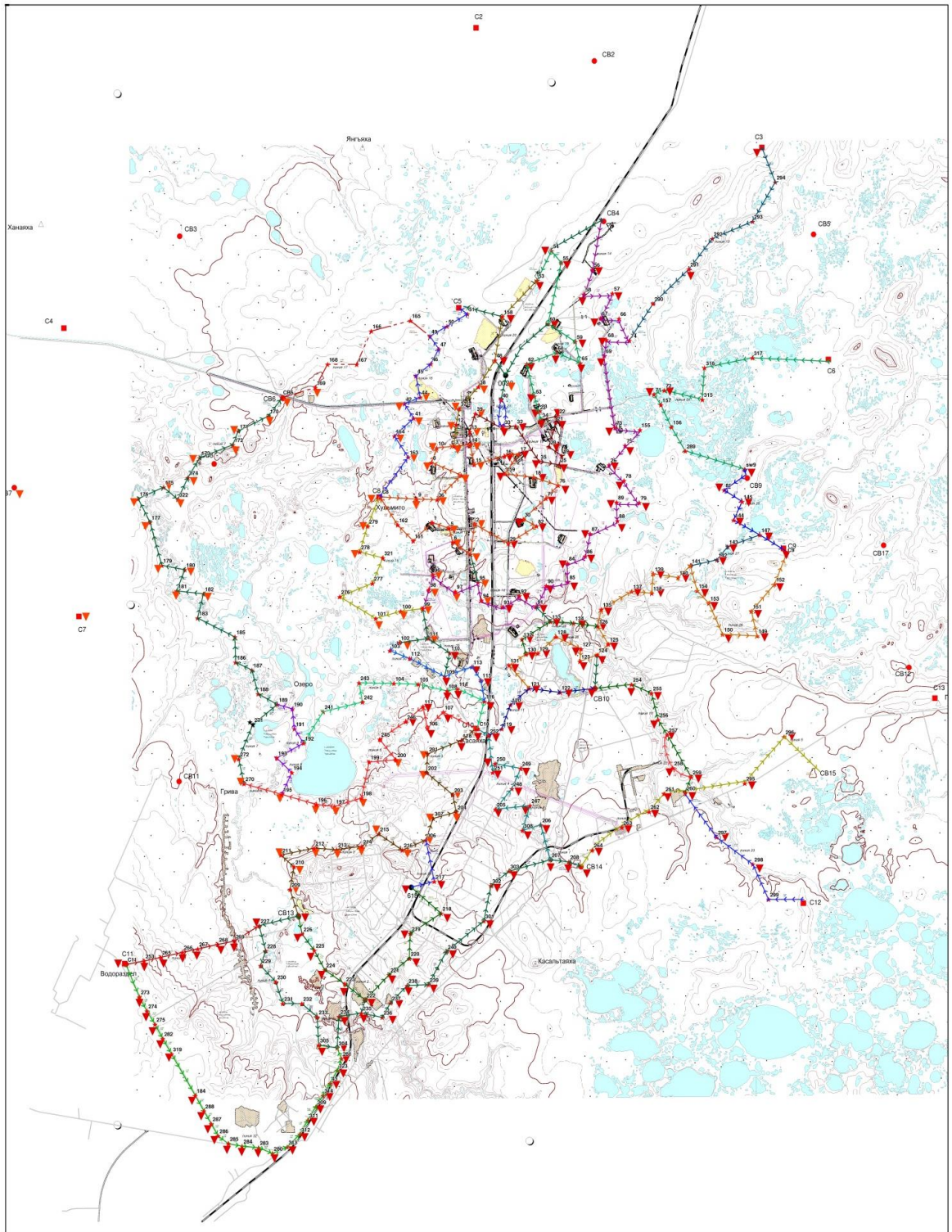
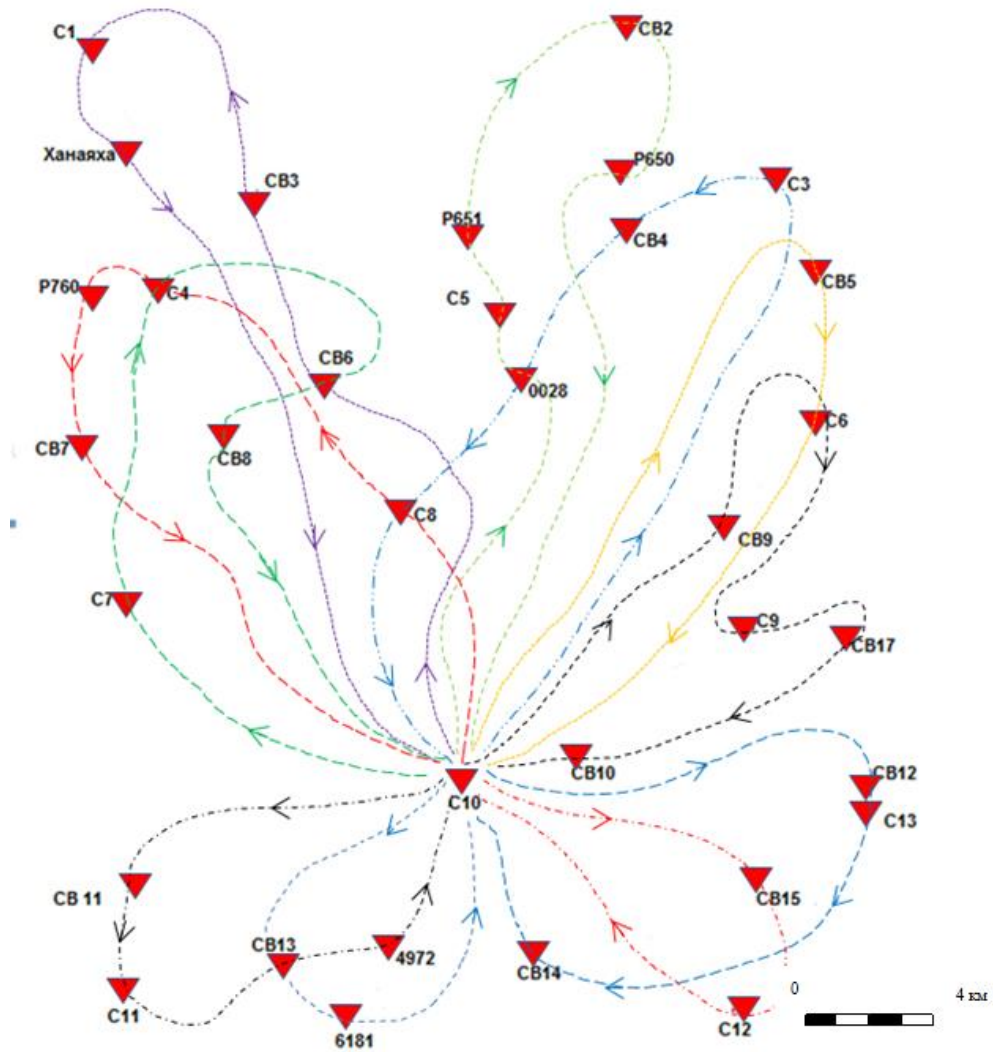


Рисунок 14 – Сеть технического нивелирования на Спорышевском ГДП



Примечание: На схеме показаны гравиметрические рейсы и их направления по опорным гравиметрическим пунктам Спорышевского ГДП

Рисунок 15 – Опорная гравиметрическая сеть Спорышевского ГДП

На начальных и конечных ОГП обязательно выполнялись наблюдения на так называемых «зайчиках» – повторные измерения на них и дополнительных точках. По ходу выполнения ряда рейсов проводились наблюдения на расположенных рядом других ОГП, что позволило разделить рейсы на более короткие звенья продолжительностью в среднем порядка двух часов, в течение которых изменение нуль-пунктов приборов близко к линейному. Кроме того, результаты измерений на промежуточных ОГП служили дополнительным контролем в рейсе.

Все рейсы были проконтролированы наблюдениями в независимых рейсах.

Всего контроль был выполнен на пятидесяти трех пунктах (20,5 % от общего числа наблюдений). Из них на двадцати трех пунктах, где измерения были выполнены зимой, контроль был проведён в летний период.

Расчёт относительных приращений силы тяжести проводился по звеньям с минимальным интервалом времени, то есть между ближайшими пунктами в рейсе ОГП.

Математическая обработка спутниковых измерений была выполнена с использованием файлов «сырых» измерений, упорядоченных по сессиям, в программе Trimble Geomatics Office version 1.67. Обработка спутниковых измерений выполнялась в три этапа.

На первом этапе производилась обработка пространственных векторов между пунктами опорной каркасной сети.

На втором этапе производилась обработка пространственных векторов между пунктами каркасной сети.

На третьем этапе производилась обработка пространственных векторов между пунктами сети сгущения.

В результате уравнивания получена максимальная плановая средняя квадратическая ошибка (СКО) положения пунктов сети, равная ± 4 мм, и ± 17 мм - по высоте. При этом среднее значение СКО составило ± 3 мм в плане и ± 13 мм по высоте.

Параметрическое уравнивание нивелирной сети I и II классов осуществлено с использованием программного обеспечения CREDO-DAT. Результаты совпали в пределах ± 2 мм. При этом нивелирная сеть уравнивалась как «свободная». В качестве исходного был принят репер линии нивелирования I класса Сургут-Уренгой № 6181.

Были получены допустимые значения средних квадратических ошибок уравниваемых прямых превышений в пределах $\pm 1,9$ мм до $\pm 11,4$ мм, не превышающих значений, вычисленных по формуле $\pm 2_{мм}\sqrt{L(км)}$.

Уравнивание сети технического нивелирования (рисунок 14), выполнялось также параметрическим способом.

В качестве исходного пункта уравнивания сети также использовался пункт нивелирования I класса с номером марки 6181. В качестве необходимых связей были приняты превышения от пункта 6181 до каждого пункта рядовой сети, включенного в техническое нивелирование. В результате уравнивания измеренных превышений технического нивелирования средние квадратические ошибки прямых превышений составили от ± 33 мм до ± 279 мм. Средняя квадратическая ошибка единицы веса составила ± 80 мм. В результате средняя квадратическая ошибка на 1 км хода составила ± 51 мм.

При обработке результатов гравиметрии средние значения приращения силы тяжести между ОГП определялись с учётом линейного изменения нуль-пунктов гравиметров с корректировкой его поведения по смежным измерениям на узловых точках петель центральной системы рейсов [23]. Уравнивание выполнялось, как и в нивелировании, параметрическим способом с определением в качестве необходимых неизвестных вероятнейших значений приращений силы тяжести в каждом ОГП относительно исходного пункта С10 (рисунок 15) с оценкой средней квадратической ошибки.

Средние значения приращений силы тяжести в рядовой сети определялись относительно начального ОГП в каждой секции между ближайшими по времени рейса опорными пунктами. Полученные таким образом приращения имели одну систему отсчёта относительно исходного опорного пункта С10. Уравнивание всех полученных приращений силы тяжести также было выполнено параметрическим способом с определением их вероятнейших значений относительно ОГП С10 с оценкой средних квадратических ошибок.

Аномалии силы тяжести на ГДП определялись путем вычисления и исключения значений нормального поля Земли с учётом ведения в них поправок за высоту, влияние промежуточного слоя топографических масс (редукция Буге). Вычисления выполнены в двух вариантах.

В первом варианте аномалии силы тяжести определялись с нормативным значением плотности $\sigma_0 = 2,67$ г/см³, а во втором - с принятой для территории работ плотностью $\sigma_0 = 2,0$ г/см³.

Влияние промежуточного слоя топографических масс учитывалась как поправка, равная сумме поправок за притяжение параллельного слоя и за отклонение реальной поверхности от параллельного слоя (поправки за рельеф).

Предварительно оценивался размер области учёта указанного отклонения по методике, изложенной в [21, 30].

Для оценки были построены цифровые карты рельефа местности с шагами: 250 м, 1250 м, 10 км. Модели, построенные с использованием топографических карт различного масштаба, включали область учёта рельефа на расстоянии 200 км от территории работ. Предварительная оценка показала возможность учёта поправок за рельеф в двух зонах:

- до радиуса 483 м центральной зоны с размером квадрата 750м x 750 м, по площади соответствующей размеру круга, вокруг пункта гравиметрических измерений;

- от радиуса 483 м до радиуса 2962 м внешней зоны с размером внешней квадратной границы 5250м x 5250 м.

При этом средняя величина средней квадратической ошибки определения суммарной поправки за рельеф в обеих зонах не превышала $\pm 0,02$ мГал.

В обеих зонах использовалась модель рельефа с шагом 250 м.

Поправки за рельеф центральной зоны с использованием указанной модели рельефа определялись автоматически на персональном компьютере на основе методики построения корреляционного графика (рисунок 16) [20]. Для его построения в шестидесяти характерных точках на территории участка работ определялись «точные» значения поправок за рельеф с возможно детальным учётом неровностей рельефа и приближенные – с учётом средних квадратических значений превышений \bar{h} цифровой модели рельефа в восьми ближайших узлах относительно результирующей точки. Это позволило достаточно уверенно найти коэффициент (a) увеличения приближенных значений за среднестатистический учёт реальной изрезанности рельефа по отношению к сглаженному в цифровой модели. Поправки за влияние рельефа внешней учитываемой зоны определялись как сумма по-

правок за изрезанность его поверхности (δ_{g_0}) и поправок (δ'_g) за превышение относительно точки гравиметрических измерений. Первые из них – интегральны по своей сути и могут быть представлены в виде плана изоаномал, вторые – дискретные, в плане линейно не интерполируются [21].

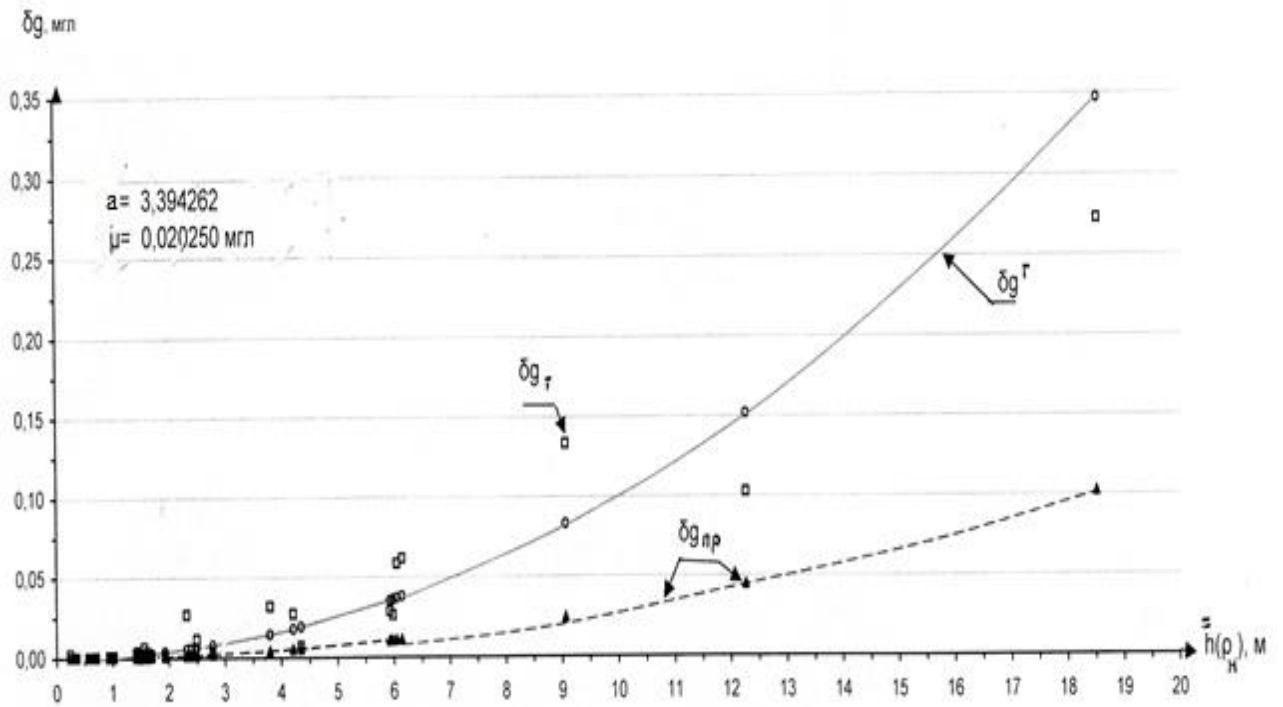


Рисунок 16 – Корреляционный график изменения поправок за рельеф местности в центральной зоне

В таблице 2 представлены величины значений $\delta g'$ ($d_{ц} = 375,0$, $\rho_{ц} = 423$ м, $\rho_h = 283$ м) в зависимости от превышения точки гравиметрических измерений относительно средней квадратической высоты модели рельефа в ней.

Суммарные значения поправок за рельеф центральной и внешней зон были использованы при вычислении аномалий в редукции Буге в обоих случаях определения аномалий силы тяжести ($\sigma_0 = 2,67 \text{ г/см}^3$ и $\sigma_0 = 2,0 \text{ г/см}^3$).

Таблица 2

Превышение точки гравиметрических измерений H относительно средней квадратической высоты модели рельефа H_0 ($H - H_0$), м	Поправки за превышение точки гравиметрических измерений $\delta g'$, мГал
0	0,000
1	0,000
2	0,000
3	0,001
4	0,002
5	0,003
6	0,004
7	0,006
8	0,007
9	0,009
10	0,012
11	0,014
12	0,017
13	0,019
14	0,023
15	0,026
16	0,029
17	0,033
18	0,037
19	0,042
20	0,046
21	0,051
22	0,056
23	0,061

Разделение аномалий силы тяжести с целью использования их региональных и локальных значений для предварительной интерпретации (в первом цикле измерений) сеймотектонической обстановки на территории геодинамического полигона предполагалось на основе построения объемной геолого-плотностной модели месторождения в гравитационном поле.

Однако из-за отсутствия данных о плотностных характеристиках горных пород по разрезу сводная объёмная цифровая модель разреза не была построена.

На следующем этапе была построена синтезированная цифровая модель границы раздела осадочных образований и вулканогенно–осадочной толщи (фундамента) с предположением о том, что она является наиболее значимой в аномальном гравитационном поле из-за разницы плотности горных пород, расположенных выше и ниже ее.

Разница плотности при этом полагалась равной $0,2 \text{ г/см}^3$, принятой для района работ. Предполагалось уточнить это значение, считая её изменение в плане, на основе выявления корреляционной связи с локальными особенностями гравитационных аномалий в редукции Буге при $\sigma_0 = 2,0 \text{ г/см}^3$. Оказалось, что корреляция на разных участках территории существенно отличается, в том числе по знаку. Это подтверждало, что геологический разрез месторождения имеет очень сложную структуру, отличается несогласованностью залегания по различным горизонтам, литологической и, возможно, петрологической неоднородностью.

Таким образом, на первом этапе (цикле) наблюдений пришлось отказаться от попытки количественной интерпретации аномалий силы тяжести и принять решение о качественном решении задачи. Для этого из исходного поля аномалий силы тяжести было выделено поле локальных аномалий.

Исходя из полученного значения средней квадратической погрешности определения аномалий силы тяжести $m_{\Delta g} = \pm 0,045 \text{ мГал}$ сечение изоаномал отчётных планов аномалий силы тяжести было выбрано равным $0,2 \text{ мГал}$, а для поля локальных аномалий $0,1 \text{ мГал}$ [31].

Были построены Схемы значений аномального (измеренного), регионально-го и локального полей силы тяжести, представленные на рисунках 17 и 18 .

Выполнению качественного анализа поля локальных аномалий силы тяжести способствовали зоны повышенных изменений значений горизонтального градиента, имеющие линейное простирание и возможно приуроченных к различного рода дизъюнктивным нарушениям [31]. Данные качественного анализа аномалий силы тяжести, линеаментов форм рельефа на территории Спорышевского ГДП (рисунок 19), материалов по результатам сейсморазведки позволили выполнить комплексную интерпретацию геодезическо-геофизических материалов, отображенные на рисунке 20. На ней отображены участки дизъюнктивных нарушений, представляющих из себя зоны геодинамического и промышленного риска, а также особенности геолого-тектонического строения месторождения.

Необходимо особо отметить, что «региональный фон», представленный на рисунке 18, *a*, полученный в первом цикле, во всех последующих циклах полагался неизменным для разделения аномального поля и выявления изменений поля локальных аномалий.

Результаты первого цикла показали эффективность применённого геодезическо-гравиметрического комплекса в получении сведений о реальном геодинамическом состоянии месторождения, которое позволило более целеустремлённо организовать натурные наблюдения в последующих циклах.

Основной задачей второго цикла измерений была проверка надёжности метода геодезического мониторинга техногенной геодинамики по результатам сопоставления данных измерений, выполненных в первом и втором циклах.

При планировании натурных геодезическо-гравиметрических измерений второго цикла учитывались результаты комплексной интерпретации первого цикла. Было проведено сгущение пунктов заполняющей и рядовой сети. При этом были сведены по возможности к минимуму расстояния между пунктами на локализованных участках, уточнена программа наблюдений на пунктах геодинамического полигона. Были выполнены повторные натурные измерения (координирование и нивелирование) на пунктах опорной сети геодинамического полигона.

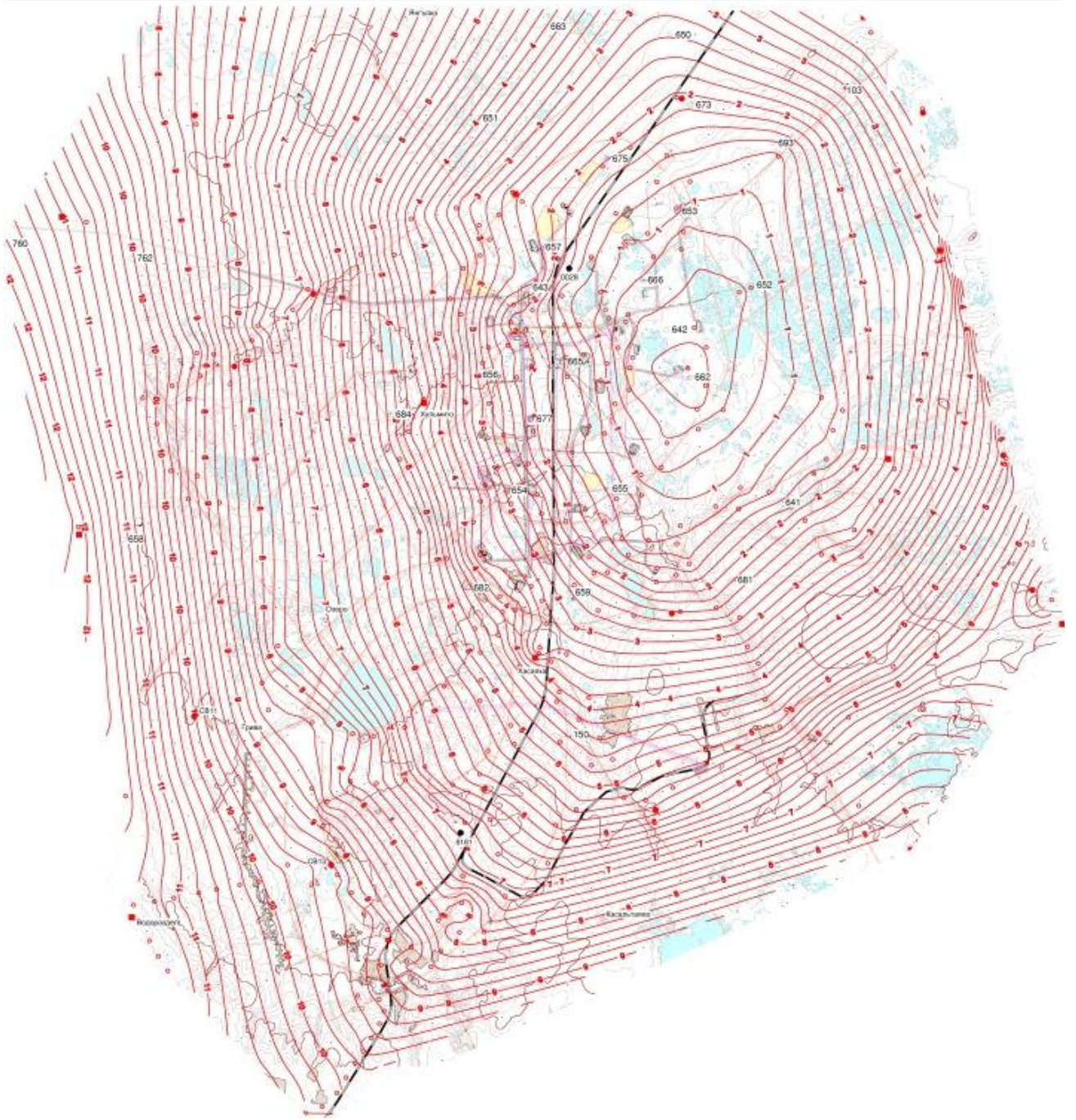


Рисунок 17 – Поле аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью $2,00 \text{ г/см}^3$ (уровень отсчёта - условный)

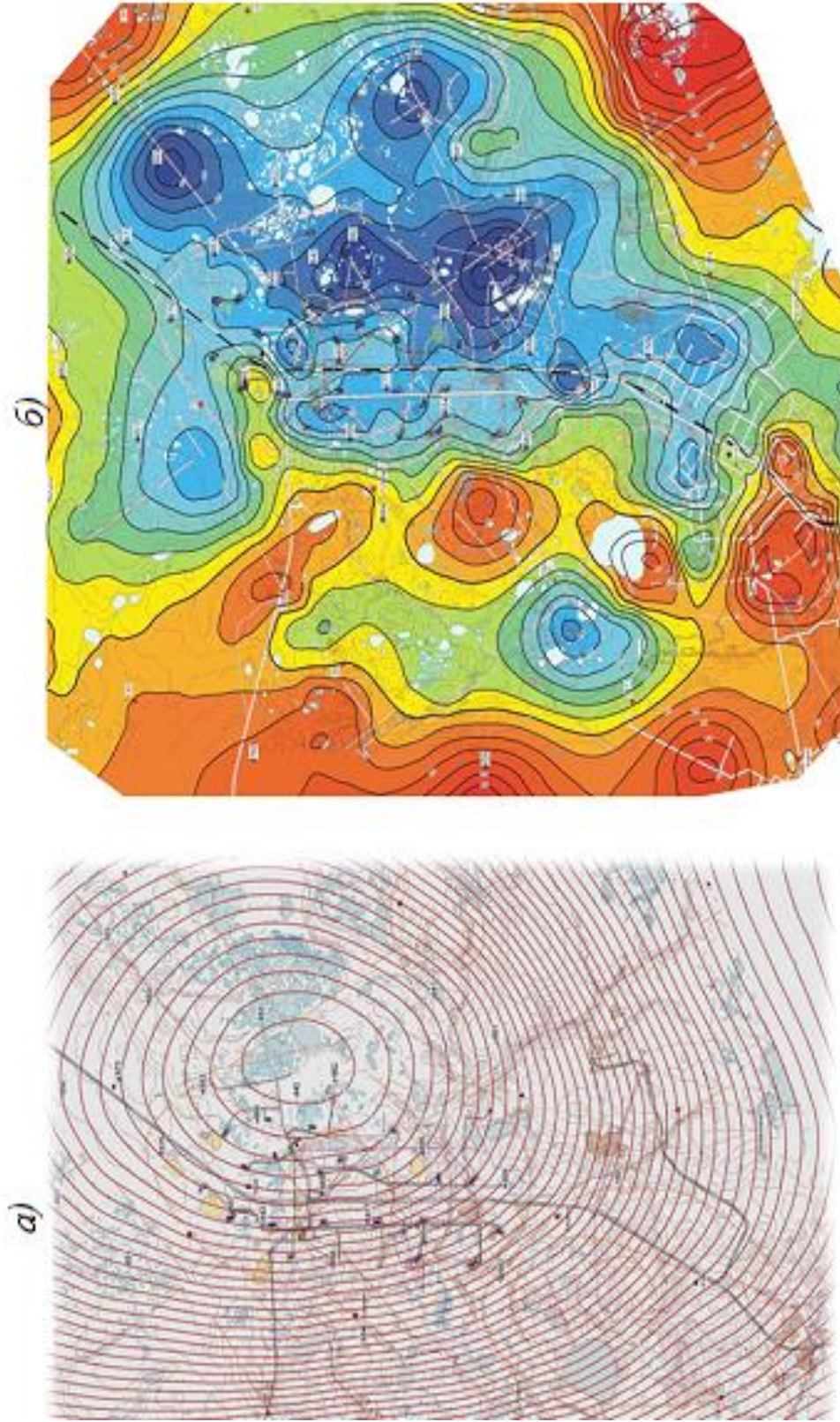


Рисунок 18 – Схемы: *a)* –изоаномал регионального фона в редукции Буге ($\sigma_0 = 2,00 \text{ г/см}^3$ уровень отсчета – условный); *б)* – локальных аномалий силы тяжести

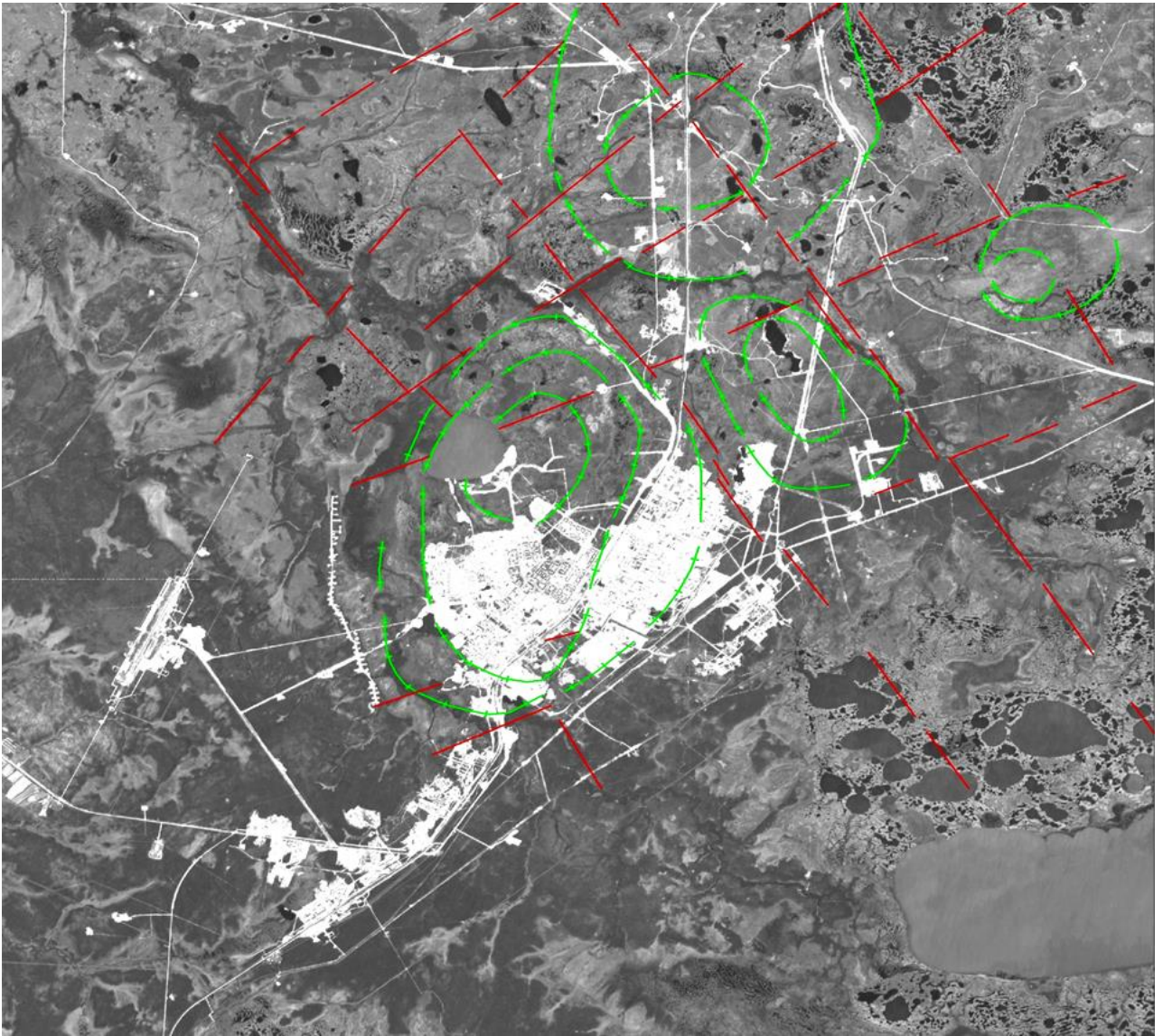
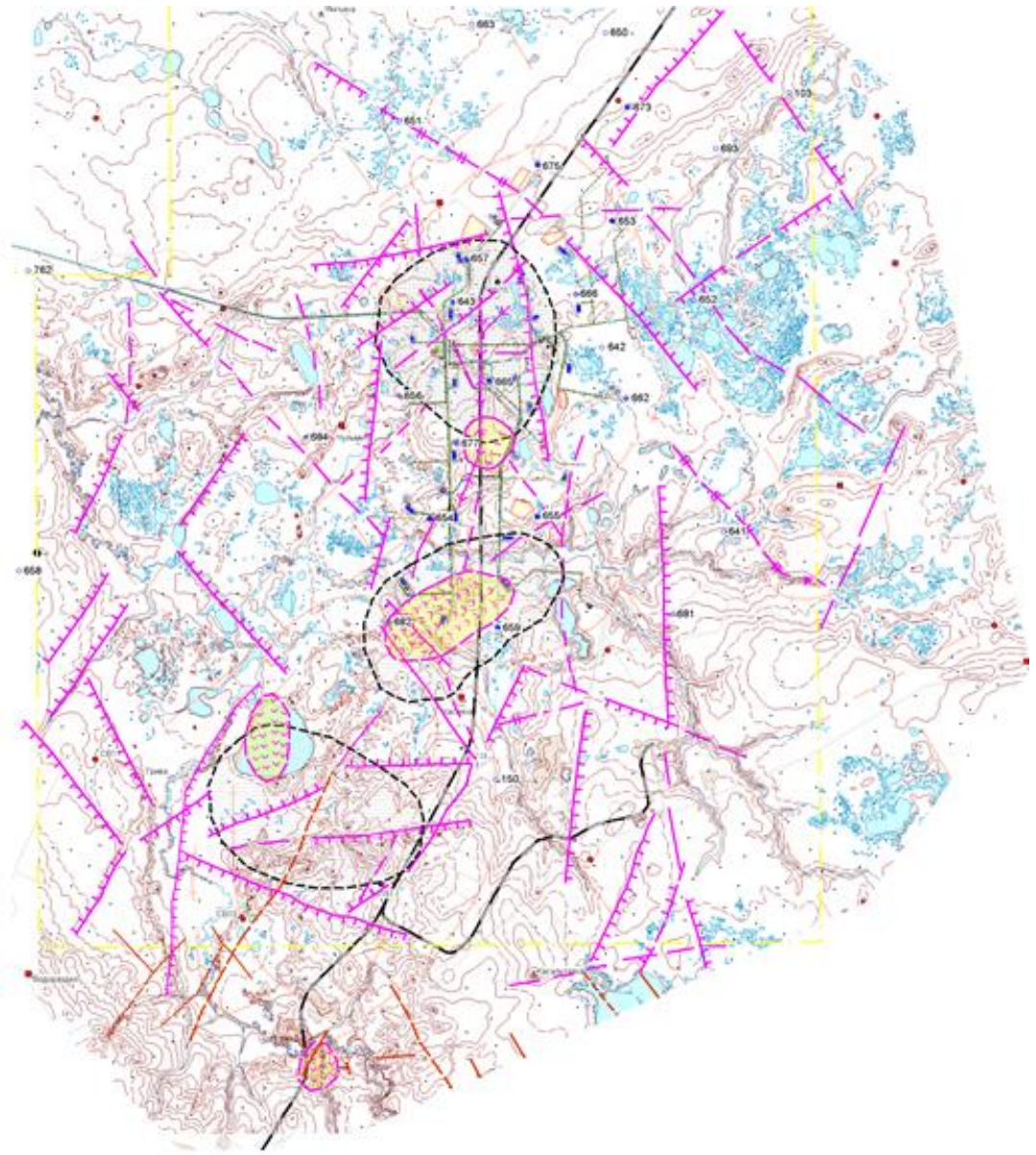


Рисунок 19 – Линеаменты форм рельефа Спорышевского ГДП



Условные обозначения:











- | | |
|---|--|
|  | а) Зоны трещиноватости дробления : |
|  | б) а) - площадные (сизовые) |
|  | б) - линейные |
|  | а) Дисъюнктивы в верхней части разреза: |
|  | б) - трещины с указанием направления понижения плотности |
|  | а) Разломы в фундаменте по результатам сейсморазведки: |
|  | б) - выделенные |
|  | б) - предполагаемые с указанием зоны опускания |
|  | а) Зоны повышенного промышленного риска: |
|  | б) а) - вероятные |
| | б) - предполагаемые |

Рисунок 20 – Геолого-тектоническая структура Спорышевского ГДП по результатам комплексной интерпретации геодезических и геофизических данных

Обработка и уравнивание результатов выполнялось по методике, принятой в первом цикле.

Гравиметрические измерения выполнялись также как и в первом цикле. При этом основное внимание было уделено центральной части территории месторождения, где в первом цикле исследований в поле локальных аномалий были выявлены зоны повышенных значений горизонтального градиента их изменения. Здесь было выполнено сгущение пунктов рядовой гравиметрической сети. В отличие от первого цикла был выбран контрольный гравиметрический базис, на котором перед началом работ выполнялись контрольные измерения. В качестве исходного был принят пункт С10. Уровень поля силы тяжести на нем принят условно-постоянным, так как он не был «связан» с пунктами государственной гравиметрической сети.

При измерениях в рейсах второго и последующих циклов использовался канадский высокоточный автоматизированный гравиметр типа CG–5 Autograv Scintrex. Диапазон измерений этого прибора превышает 8000 мГал, а разрешающая способность составляет $\pm 0,001$ мГал.

Схема гравиметрической сети второго цикла измерений приведена на рисунке 21.

Обработка и уравнивание результатов полевых натурных измерений, разделение аномального гравитационного поля силы тяжести выполнялось также как и в первом цикле.

Вычисленный «региональный» фон получился в целом соответствующим фону первого цикла измерений. Значения локальных аномалий силы тяжести, при наличии незначительных изменений в целом сохранили общие черты в плане, проявляясь небольшими отличиями в изоаномалах [31].

Применение во втором цикле измерений высокоточного автоматизированного гравиметра типа CG–5 Autograv Scintrex позволила существенно повысить точность определения ускорений силы тяжести.

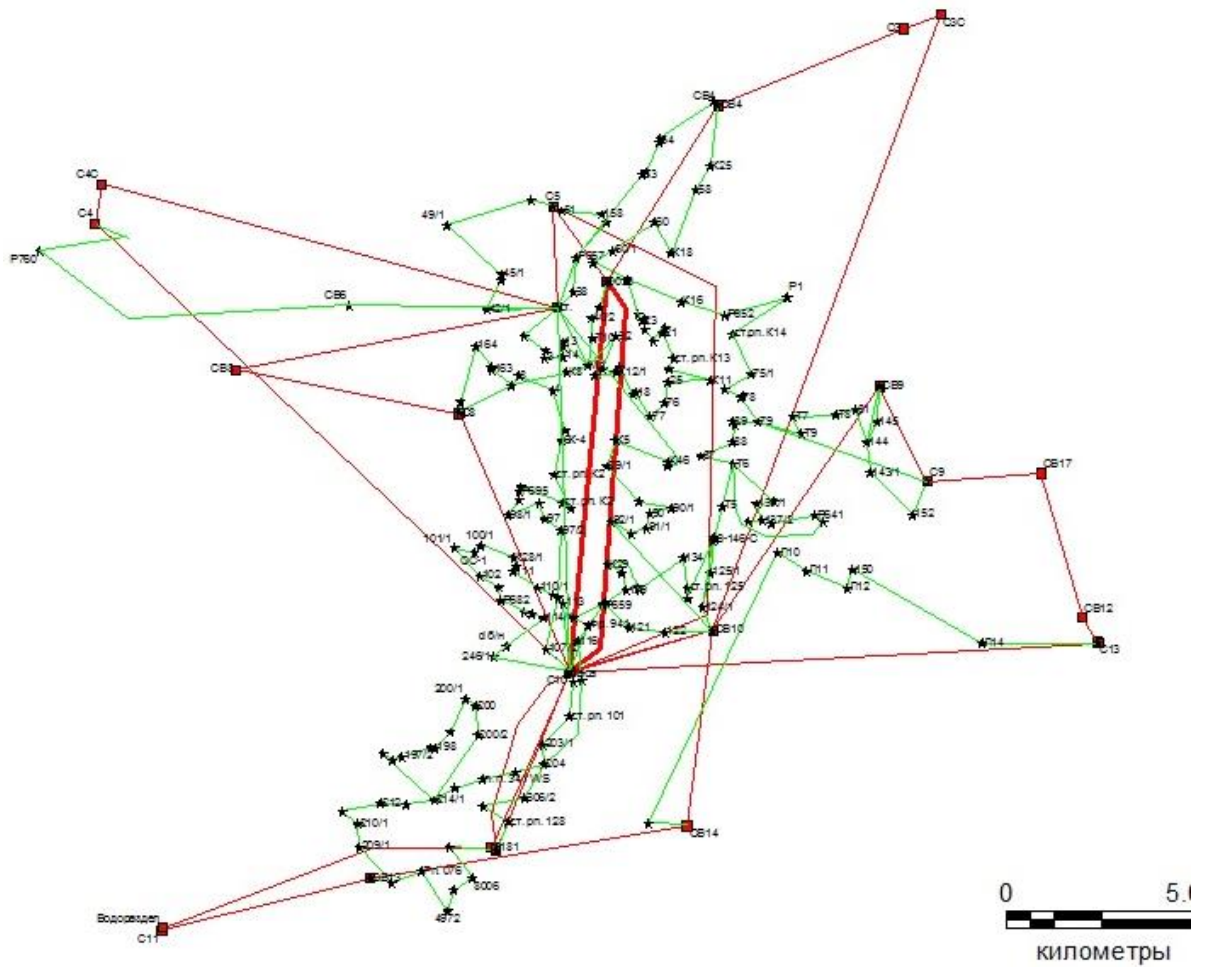


Рисунок 21 – Гравиметрическая сеть второго цикла измерений
Спорышевского ГДП

Средние квадратические ошибки (СКО) определения силы тяжести на ОГП составило $\pm 0,002$ мГал, в точках рядовой сети $\pm 0,005$ мГал, средняя величина СКО гравиметрических измерений составила $\pm 0,006$ мГал. СКО аномальных значений силы тяжести из-за погрешности нивелирования характеризовалось величиной $\pm 0,033$ мГал. Таким образом, общее СКО составила величину $m_{\Delta g} = \pm 0,034$ мГал. С учетом полученной точности, сечения изоаномал на схемах (планах) аномалий силы тяжести в редукции Буге (при $\sigma_0 = 2,00$ г/см³) и локальных аномалий установлено 0,10 мГал, а для разницы полей из первого и второго циклов 0,05 мГал.

Изменения значений аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью $\sigma_0 = 2,00 \text{ г/см}^3$ из двух циклов не противоречили локальными изменениям нормальных высот пунктов, полученных по результатам нивелирования двух циклов.

По результатам высокоточного нивелирования в двух циклах на Спорышевском геодинимическом полигоне была выполнена оценка вертикальных смещений пунктов геодинимической сети в период между первым и вторым циклами натуральных измерений и увязка их с положением разностного аномального поля силы тяжести [31].

Анализ полученного поля значений ΔH , выявил процесс относительного поднятия южной части локализованной территории ГДП, с расположенным на ней городом Ноябрьск, и локальной зоны в её северной части (район ДНС1, ДНС2, УПСВ, скв. 656, 665, 675). Поднятие поверхности на указанных участках характеризуется изменениями до 15 мм.

Поверхность центральной части территории полигона относительно стабильна. На периферийной части северо-запада и северо-востока территории ГДП (скв. 651, 673, 652, 693) фиксировалось опускание поверхности. Вертикальные смещения поверхности на территории Спорышевского месторождения в целом подтвердили результаты комплексной интерпретации данных нивелирования и гравиметрии первого цикла наблюдений.

Таким образом, результаты двух циклов геодинимических исследований показали следующее:

- на Спорышевском месторождении вертикальное движение земной поверхности за период между первым и вторым циклами измерений характеризовались величиной порядка $\pm (13 - 15)$ мм. В основном они были приурочены к территориям интенсивного техногенного воздействия;

- выявленные участки вертикальных движений земной поверхности в целом соответствовали положению в плане зонам повышенного промышленного и геодинимического рисков, выявленных в первом цикле измерений;

– локальные поля изменений высот и изменений силы тяжести на территории месторождения свидетельствовали о сложном тектоническом строении доюрского фундамента и осадочного чехла.

Таким образом методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики показала свою состоятельность. По результатам выполненных геодинимических исследований было рекомендовано следующее:

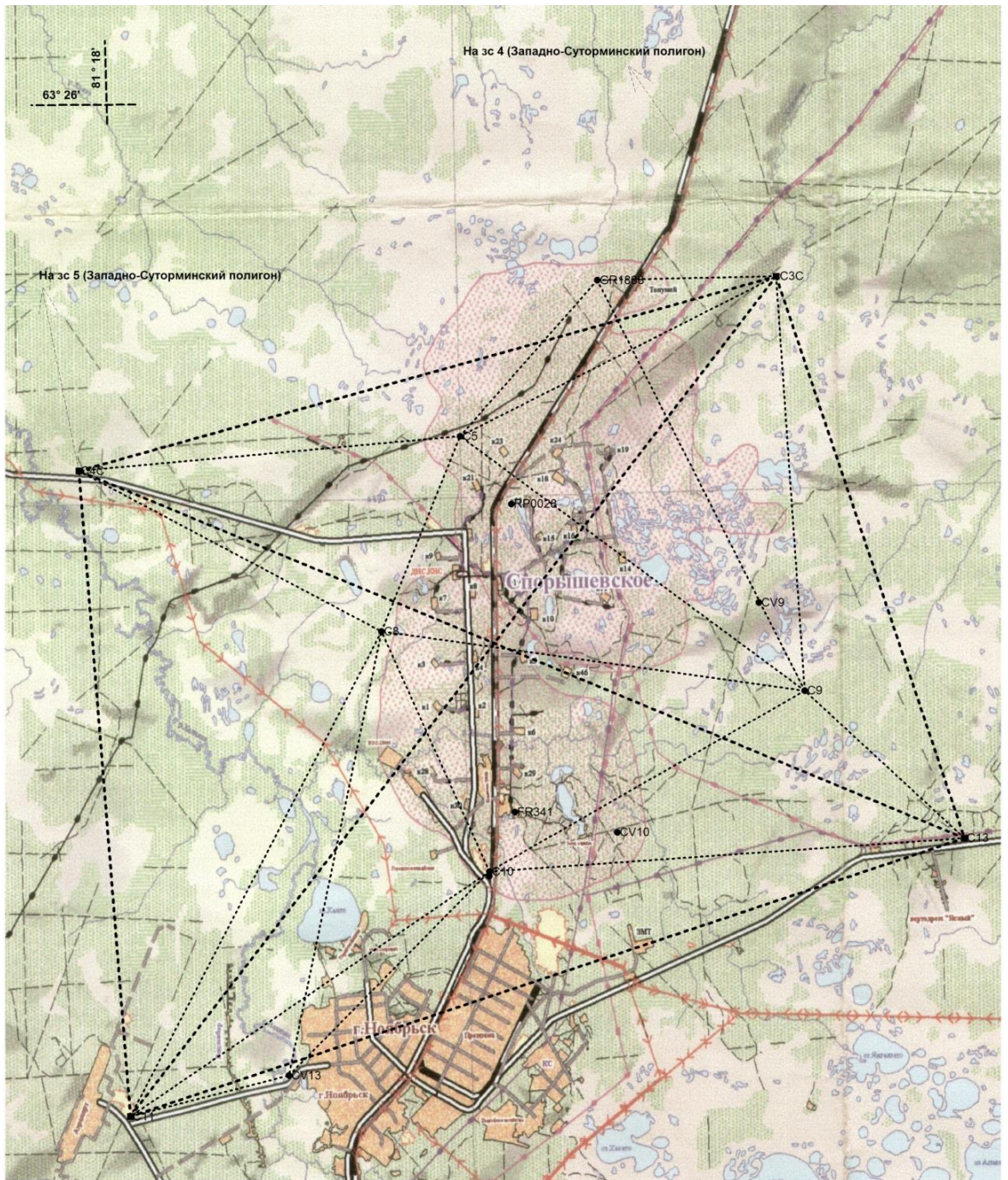
– для обеспечения систематического мониторинга проявления геодинимических процессов в положении земной поверхности, последующие циклы геодезическо-гравиметрических натурных измерений требуется производить ежегодно;

– при эксплуатации сложных технических систем инфраструктуры месторождения, проектировании и строительстве новых систем, крупных объектов необходимо учитывать выявленные аномальные относительные изменения высот земной поверхности;

– геодинимический мониторинг в следующих циклах наблюдений необходимо сосредоточить на расчётных профилях вдоль и вкост выявленных локальных участков вертикального смещения земной поверхности и изменения значений $\Delta\delta_{\text{Буге}}$ [7, 38].

Третий цикл наблюдений выполнялся по расчётным профилям, плановое положение которых было уточнено по результатам двух предыдущих циклов. В связи с этим была выполнена оптимизация опорной плановой сети, которая к этому времени приобрела конфигурацию, представленную на рисунке 22. При этом полностью была сохранена конфигурация каркасной сети с исходным пунктом С3.

Обработка и уравнивание результатов измерений спутниковых координатных определений на пунктах опорной плановой и рядовой сетей третьего цикла выполнялись по методике, принятой в первом цикле исследований.



Условные обозначения:

- пункты каркасной сети СГС-1
- пункты заполняющей сети СГС-1
- контрольные пункты СГС-1
- базисные линии каркасной сети
- базисные линии заполняющей сети

М 1:120 000

Рисунок 22 – Плановая опорная спутниковая сеть третьего цикла наблюдений на Спорышевском ГДП.

С целью выявления вертикальных смещений земной поверхности в период между циклами, а также их короткопериодных проявлений в цикле наблюдений нивелирование II класса повышенной точности проводилось по расчётным профилям в два этапа с повторным нивелированием.

Схема высокоточного нивелирования третьего цикла измерений представлена на рисунке 23.

Гравиметрические измерения выполнялись одновременно с нивелированием. Для получения однозначных результатов измерения на пунктах опорной сети выполнялись также, как и во втором цикле. Измерения на пунктах рядовой сети проводились по старым и по вновь заложенным пунктам рядовой сети на расчётных профилях.

Обработка, уравнивание результатов натурных измерений третьего цикла выполнялась как в первом и втором циклах с опорой на один и тот же исходный пункт С 10.

Координаты пунктов каркасной сети были получены спутниковым координированием с погрешностью ± 3 мм в плане и ± 11 мм по высоте, сети сгущения - с погрешностью в плане от ± 3 мм до ± 18 мм и от ± 26 мм до ± 55 мм – по высоте, а точек мобильной сети - с дециметровой точностью. Это позволило произвести сопоставление координатных измерений, выполненных во всех трех циклах

В результате сопоставления были выявлены аномальные изменения координат по долготе и высоте для пункта С4 (30 мм и 50 мм соответственно) и у его контрольного центра С4С (14 мм по широте и 79 мм по высоте) в период между первым и вторым циклами и аномальные смещения по высоте на 113 мм и 137 мм, по широте на 9 мм и минус 27 мм, по долготе на минус 19 мм и 6 мм соответственно между третьим и вторым циклами измерений. Анализ выявленных смещений выявил неудачный выбор мест расположения пунктов (близость коридора коммуникаций, где велись работы).

Для остальных пунктов значения изменений координат не превышали общей погрешности их определения.

Плановые положения четырёх расчётных профилей выбирались на схеме локальных аномалий силы тяжести первого цикла натурных геодезическо-гравиметрических измерений (рисунок 24). Конфигурация профилей выбирались с таким расчётом, чтобы они пересекали зоны повышенных значений аномально-горизонтального градиента силы тяжести, предположительно соответствующих границам раздела блоков горных пород с различными значениями плотности, а также границы зон перехода относительных поднятий и опусканий земной поверхности, выявленных по результатам высокоточного нивелирования в первом и во втором циклах.

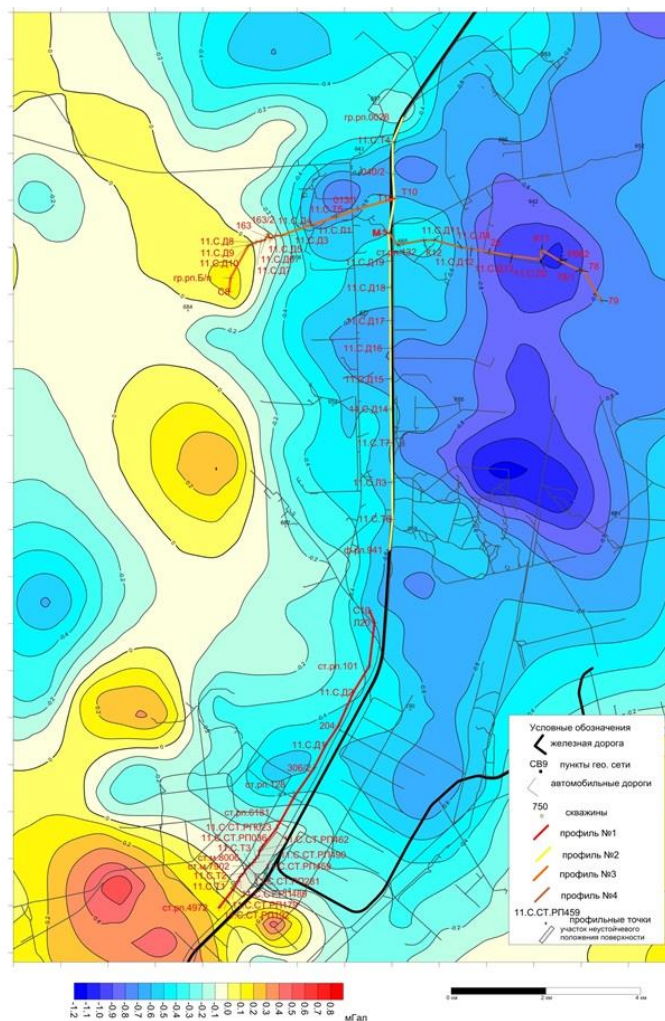


Рисунок 24 –Схема расположения расчетных профилей

Результаты сравнения нивелирных измерений между третьим и вторым циклами измерений, между этапами измерений в третьем цикле, а также сравнения значений локальных аномалий между вторым и первым, третьим и первым

циклами представлены в виде графиков на рисунках 25 а, б; 26 а, б; 27 а, б; 28 а, б.

Профиль № 1 представлен графиками сравнения результатов нивелирования и гравиметрии, выполненных в трех циклах измерений на рисунке 25.

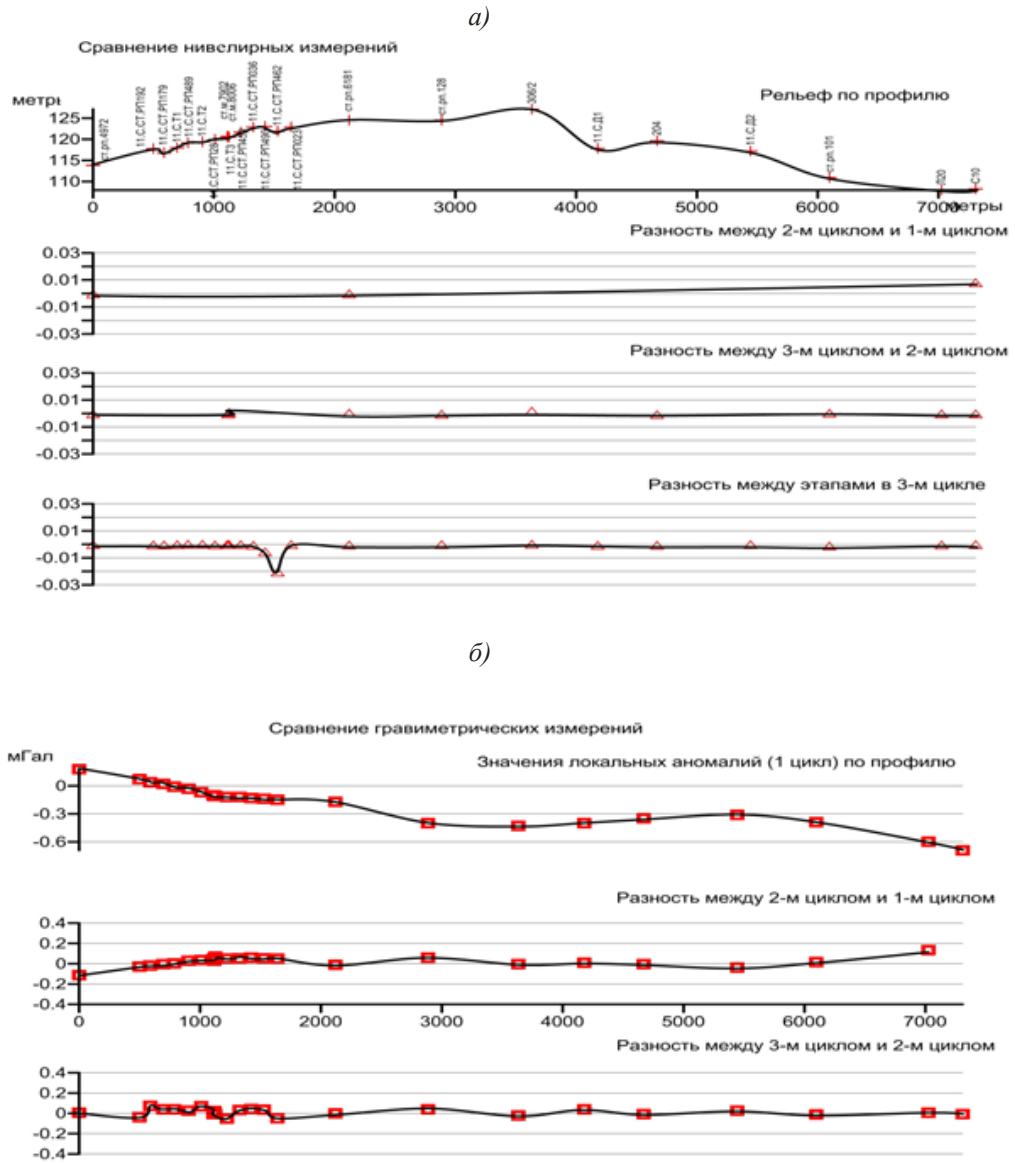


Рисунок 25 – Графики сравнения результатов измерений трех циклов по профилю № 1: а) нивелирования; б) гравиметрии

Анализ этих сравнительных графиков позволил сформулировать следующие выводы по профилю № 1:

– подтверждается факт понижения пунктов геодинимического полигона в южной части профиля в период между первым и вторым циклами на величину до 8 мм. Вместе с тем в период между вторым и третьим циклами такое понижение не фиксируется. Положение поверхности стабильное (рисунок 25, *а*);

– разность аномального гравитационного поля по профилю в пределах удвоенной СКО измерений (в первом цикле использовались отечественные гравиметры типа ГНУ-КС, с точностью измерений порядка $\pm 0,05$ мГал), представленная на рисунке 25, *б*, в целом отражает относительную стабильность геологического разреза по плотности.

Вместе с тем при сгущении шага измерений по профилю в третьем цикле, в интервале от пункта ст. рп. 179 до пункта ст. рп. 462 как по данным гравиметрии, так и нивелирования картируется блок горных пород с неоднородной структурой и, по – видимому, с разнородным по плотности в верхней части разреза составом. Это отражается на графиках разности нивелирных измерений между этапами третьего цикла и разности гравиметрических измерений между третьим и вторым циклами (рисунок 25, *а* и 25, *б*). Нестабильность плотностного состава или неустойчивости поверхности верхней части блока отражается дифференциацией локальной разности силы тяжести, а в его северной краевой части – значительным (до 20 мм) изменением в течение одного месяца отметок высот пунктов: ст. рп. 490, ст. рп. 462. Короткопериодное проявление указанного локального опускания поверхности может свидетельствовать или о регулярном техногенном воздействии на указанный микроблок (вибрации от проходящих гружёных составов по железной дороге, или сезонное воздействие внешней температуры, изменение режима грунтовых вод и др.). В любом случае этот локальный участок необходимо признать как неустойчивый по стабильности положения его дневной поверхности.

Косвенно особенность в степени устойчивости вышеуказанного микроблока геологического разреза отражает и поле локальных аномалий силы тяжести (рисунок 24) – в виде «отростка» от положительной аномалии в северо-восточном направлении к ст. рп. 6181.

Профиль № 2. Графики сравнения результатов измерений в трёх циклах представлены на рисунке 26.

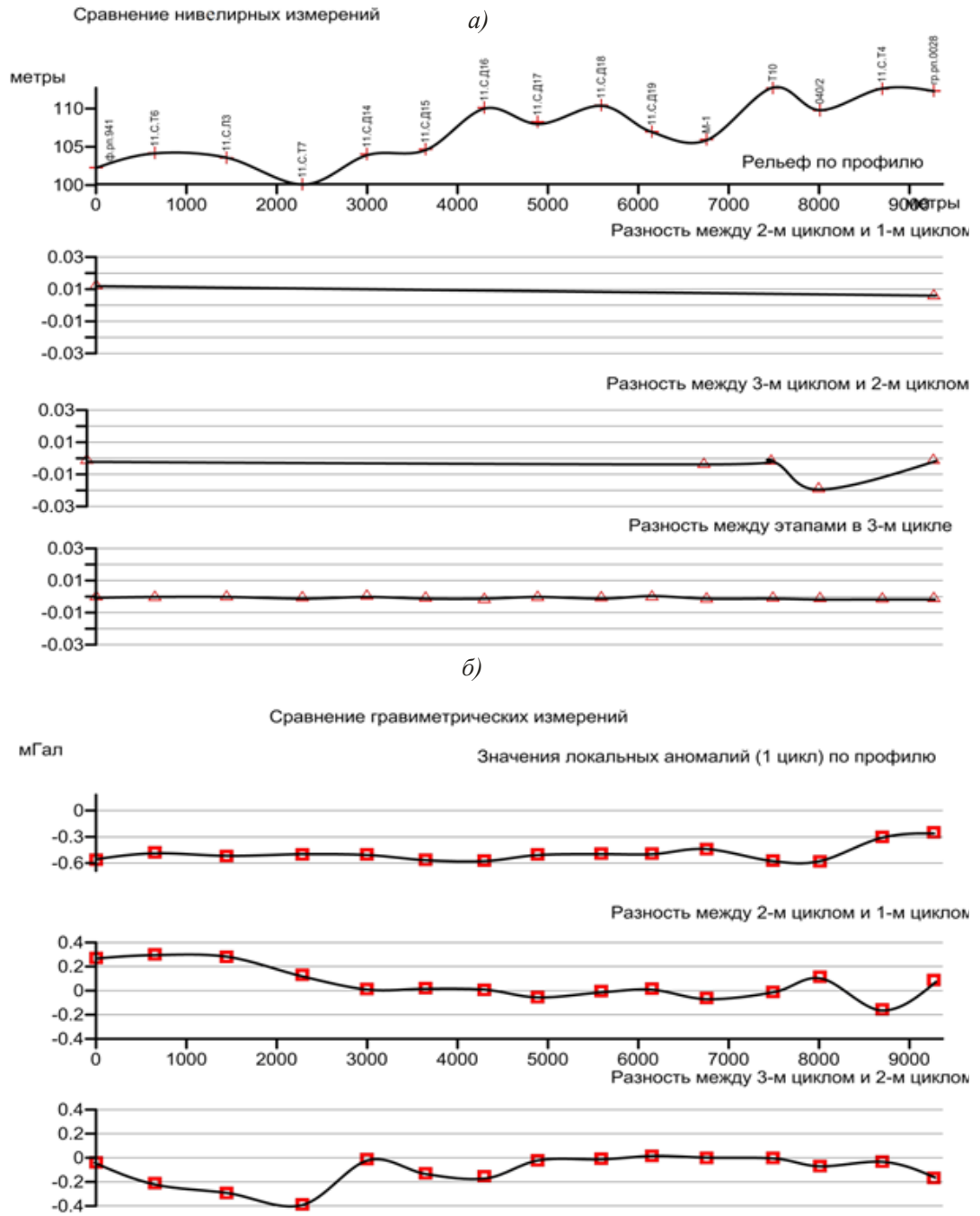


Рисунок 26 – Графики сравнения результатов измерений трех циклов по профилю № 2: а) нивелирования; б) гравиметрии

Анализ и интерпретации результатов по профилю №2, представленных на графиках (рисунок 26), показывают следующее:

– сравнение результатов нивелирования между первым и вторым циклами, представленное на рисунке 26, а, показывает незначительное (порядка 3-4 мм) понижение поверхности в северном направлении;

– сезонное вертикальное смещение поверхности в третьем цикле в период между этапами наблюдений не наблюдается (рисунок 26, а).

Вместе с тем фиксируется (на фоне общего незначительного понижения поверхности в северном направлении) относительное локальное понижение пункта 040/2 в период между вторым и третьим циклами, которое отражается незначительным локальным минимумом силы тяжести, свидетельствующим о некотором разуплотнении горных пород в блоке от пункта 040/2 до гр. рп. 0028. Этот участок соответствует предполагаемой по результатам гравиметрии границе раздела сред (дизъюнктива) с различной плотностью (рисунок 24);

– отчетливо в южной части профиля (между ф. рп. 941 и пунктом СД14) выделяется минимум силы тяжести (до минус 0,40 мГал), несколько в меньшей степени подобный эффект наблюдается в интервале между пунктами СД14 и СД17 (до минус 0,20 мГал) (рисунок 26, б).

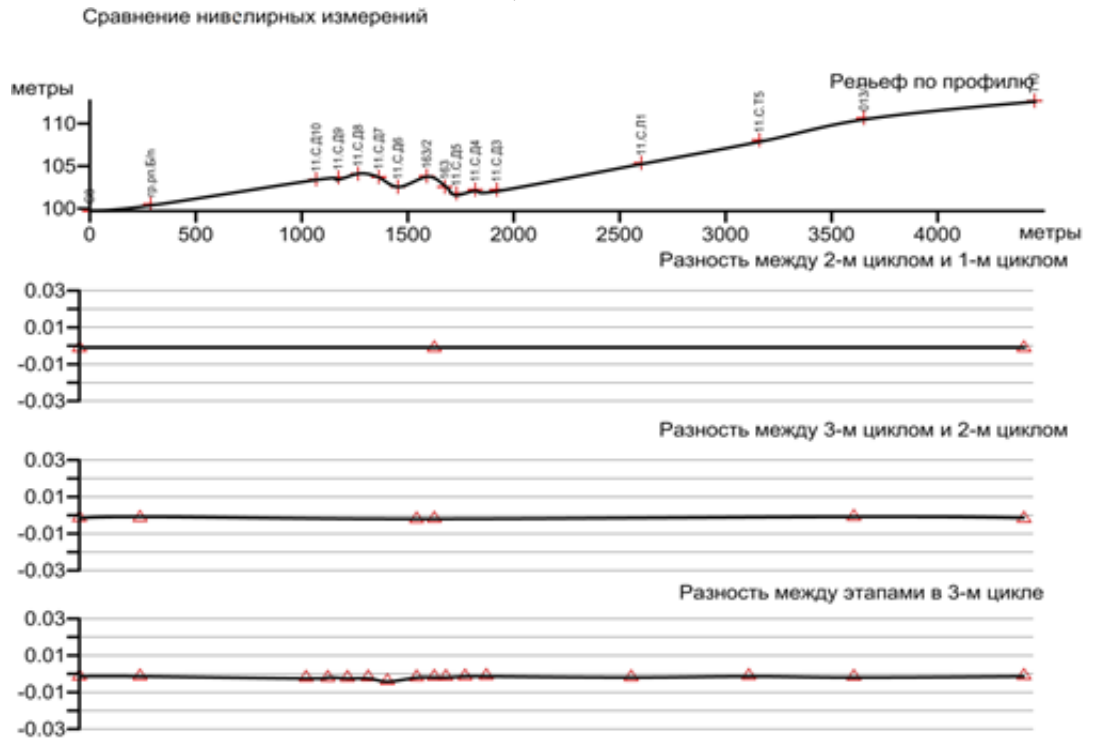
Профиль № 3.

По результатам анализа и интерпретации результатов по третьему профилю (рисунок 27) были сделаны следующие выводы:

– изменения отметок высот пунктов геодинимической сети по данным нивелирования между циклами не отмечаются (рисунок 27, а);

– сравнение результатов нивелирования в период между этапами измерений третьего цикла выявило незначительное плавное «проседание» пунктов в интервале от пункта СД 10 до пункта СД 3 с максимальным отклонением в пункте СД6 (до 3 мм) (рисунок 27, а), связанного, по – видимому, с процессом разуплотнения в верхней части разреза, о чем косвенно свидетельствуют незначительные колебания аномального гравитационного поля (до $\pm 0,07$ мГал) между измерениями второго и третьего циклов (рисунок 27, б).

а)



б)

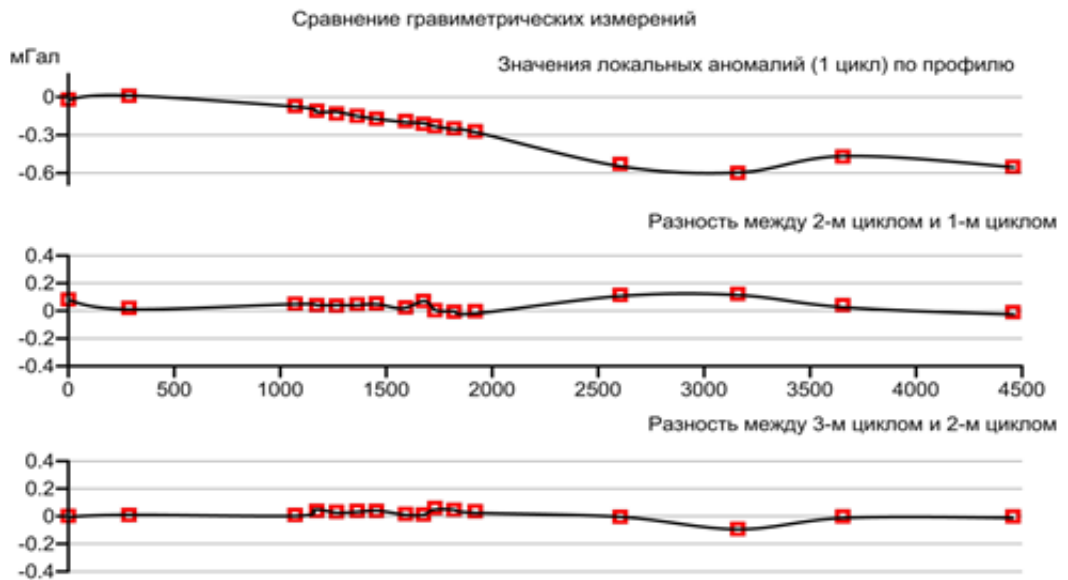


Рисунок 27 – Графики сравнения результатов измерений трех циклов по профилю № 3: а) нивелирования; б) гравиметрии

Выделяемая разность аномалий силы тяжести по результатам сравнения результатов во втором и первом циклах может быть связана, в том числе, с криволинейным изменением нуля-пункта гравиметров ГНУ-КС. Амплитуда разности аномального поля не превышает удвоенной величины погрешности измерений в первом цикле (рисунок 27, б).

Профиль № 4

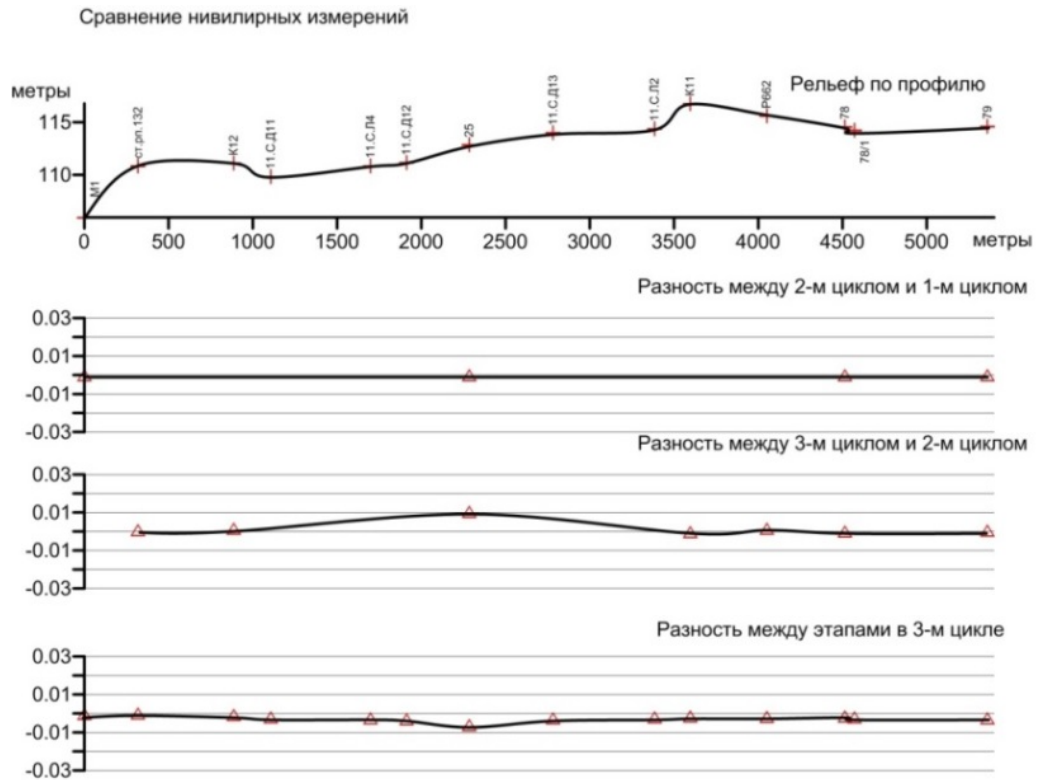
Сравнительные графики трех циклов измерений высокоточного нивелирования и гравиметрии представлены в виде графиков на рисунке 28.

Анализ и интерпретация графиков, представленных на рисунке 28, по четвертому профилю позволили сделать следующие выводы:

– не отмечается изменение положения реперных точек нивелирования второго и первого циклов. Вместе с тем выявляется поднятие пункта № 25 в третьем цикле на 10 мм. относительно его положения во втором цикле. Сезонность, возможно, короткопериодичность этого поднятия (опускания) подтверждается разностью отметок высот, определённых в первом и втором этапах третьего цикла, в котором максимальная разность высот зафиксирована в интервале между пунктами р. п. 132 и п. 78, п. 78/1 величину до 6 мм;

– в пользу короткопериодичности вертикального смещения блока горных пород, связанного с интенсивным извлечением в его продуктивных горизонтах углеводородного сырья и возможного замещения его водными массами, «указывает» колебание аномального гравитационного поля между всеми тремя циклами в пределах $\pm 0,09$ мГал. Это, в свою очередь, свидетельствует о возможности применения гравиметрии для мониторинга режима замещения углеводородного сырья водой с целью оценки миграции закачиваемых водных масс.

а)



б)

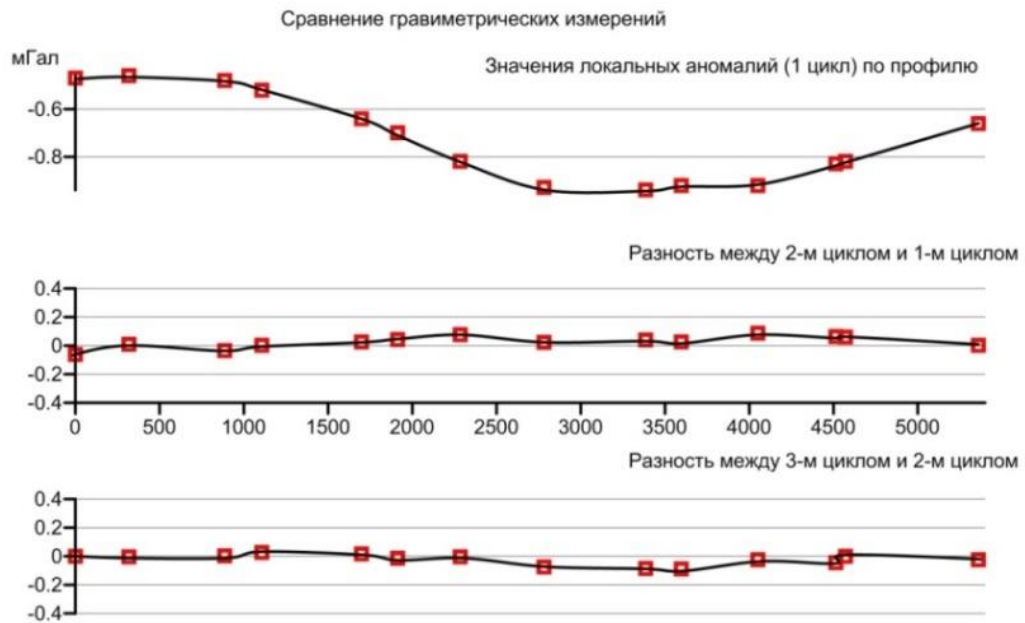


Рисунок 28 – Графики сравнения измерений в трех циклах по профилю

№ 4: а) нивелирования; б) гравиметрии

Таким образом, результаты трёх циклов геодинимических исследований, проведённых на Спорышевском месторождении с применением геодезическо-гравиметрических натурных измерений, показали следующее:

– на участке пересечения улиц Мира и Магистральной города Ноябрьска на фоне относительного стабильного положения поверхности и геологического разреза по плотности, подтверждённой гравиметрией, картируется блок горных пород с неоднородной структурой и, по – видимому, с разнородным по плотности в верхней части разреза составом. Нестабильность плотностного состава или неустойчивости поверхности верхней части блока выражается значительным (до 20 мм) изменением в течение одного месяца отметок высот пунктов: ст. рп. 490, ст. рп. 462, косвенно подтверждающимся полем локальных аномалий силы тяжести первого и второго циклов;

– по результатам комплексной обработки и интерпретации геодезических и гравиметрических данных всех трёх циклов наблюдений на локальном участке между скважинами 654, 655 и 659 отчётливо выделяется минимум силы тяжести (до минус 0,40 мГал), свидетельствующий о значительном разуплотнении геологической среды, предположительно в интервале глубин продуктивных горизонтов. Несколько в меньшей степени подобный эффект наблюдается на локальном участке между скважинами 654, 655 и 677 (до минус 0,20 мГал);

– по результатам повторного по этапам нивелирования в третьем цикле выявлено незначительное плавное «проседание» пунктов на локальном участке, расположенном в 1000 м северо-западнее скважины 656, с максимальным отличием (до 3 мм) по высоте, связанного, по – видимому, с процессом разуплотнения в верхней части разреза, о чем косвенно свидетельствуют незначительные колебания аномального гравитационного поля (до $\pm 0,07$ мГал) между измерениями во втором и третьем циклах;

– на участке между скважинами 665 и 662 отмечены короткопериодные, возможно, сезонные колебания поверхности величиной до 6 мм, подтверждаемые изменением аномального гравитационного поля между всеми тремя циклами в пределах $\pm 0,09$ мГал.

Вместе с тем, выполненное в третьем цикле повторное координирование спутниковым методом по всем опорным пунктам и пунктам сгущения, участвовавших в наблюдениях второго цикла, горизонтальных движений земной поверхности не выявила. В основном величины изменений координат не превышали общей погрешности их определения.

Вертикальные смещения земной поверхности как на территории города Ноябрьск, так и за его пределами на разрабатываемых участках месторождения УВ свидетельствовали о проявлении геодинамических процессов, происходящих в недрах под воздействием техногенных факторов.

Было отмечено, что в целом, на Спорышевском ГДП интенсивность геодинамических процессов незначительна за исключением участка пересечения улиц Мира и Магистральной города Ноябрьска.

Таким образом, впервые примененная в практике методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа, в комплексе с гравиметрией, показала высокую эффективность и надежность полученных результатов, позволяющая выявлять признаки геодинамического и промышленного рисков в более короткие сроки по сравнению с другими методами. Этим было обусловлено ее применение и на других ГДП.

4.2 Практические результаты мониторинга техногенной геодинамики на Вынгапуровском месторождении

Предварительное изучение особенностей геологического строения крупного Вынгапуровского месторождения, выполненного в СГУГиТ до начала создания геодинамического полигона, показало следующее.

На Вынгапуровском месторождении в пределах границы горного отвода, располагаются Северо-Вынгапуровское, Лимбаяхинское и собственно Вынгапуровское месторождения. Последнее по административному положению разделяется на северную, расположенную на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), и южную, расположенную на территории Ханы-Мансийского автономного округа (ХМАО), части. К началу геодинамических исследований на

месторождении было известно, что основное направление предполагаемых и выявленных дизъюнктивных нарушений (по данным бурения, сейсморазведки, линеаментного и морфометрического анализа) – северо-западное и северо-восточное (диагональные дизъюнктивы). Реже выделяются и субширотные, и дугообразные. Все это говорило о сложной картине произошедших и возможно происходящих геодинамических процессов как в фундаменте, так и в осадочной, в том числе, продуктивной толще, проявления которых могли отразиться на статистике аварий и отказов в работе оборудования месторождения. Наибольшее число аварийных случаев и нарушений на объектах инфраструктуры было отмечено на северо-западной части Вынгапуровского месторождения.

Общее представление об особенностях тектонического строения Вынгапуровского месторождения было получено в результате изучения имеющихся в наличии материалов сейсморазведки, линеаментного анализа форм рельефа. С учетом этих сведений, а также статистических сведений об отказах работы оборудования было выполнено проектирование ГДП.

Всего за 2010–2011 гг. было выполнено два цикла измерений, причём второй цикл состоял из двух подциклов (этапов), в каждом из которых выполнялся весь объем наблюдений по координированию, нивелированию и гравиметрии. Результаты измерений в первом цикле и по двум этапам второго цикла служили исходными данными для выполнения анализа и сопоставления данных и интерпретации результатов геодезическо-гравиметрических измерений.

Задача первого цикла наблюдений состояла в уточнении геолого-тектонического строения месторождения, для разработки программы мониторинга техногенной геодинамики на ГДП во втором и в последующих циклах.

Задачей второго цикла измерений являлось выявление геодинамических процессов по результатам сопоставления повторных измерений между циклами и этапами второго цикла, а также выполнение анализа геодинамического состояния месторождения.

Геодинамическая сеть на Вынгапуровском месторождении создавалась с соблюдением методики и принципов, применявшихся на Спорышевском ГДП, с

учётom особенностей геолого-тектонического строения и конфигурации месторождения.

На рисунке 29 приведена схема опорной каркасной плановой сети.

Погрешность планового и высотного определения координат исходного пункта ВК7 после обработки по программе Trimble Geomatics Office version 1.63, по внутренней сходимости характеризовались погрешностью ± 8 мм в плане и ± 35 мм по высоте.

Координаты пунктов каркасной сети относительно исходного пункта характеризовались величиной погрешности планового положения ± 7 мм и ± 12 мм - по геодезическим высотам.

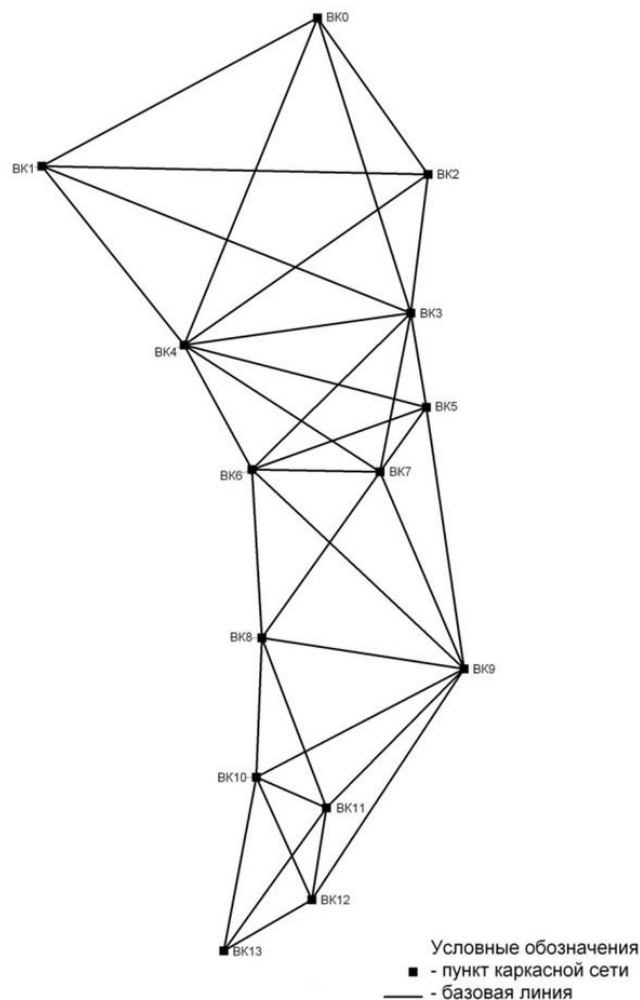


Рисунок 29 – Схема опорной каркасной спутниковой сети

Координаты пунктов мобильной сети относительно пунктов опорной сети характеризовались величиной погрешности в плановом положении ± 100 мм и

± 50 мм – по геодезическим высотам.

Нивелирование II класса по пунктам каркасной сети, сети сгущения и части пунктов мобильной сети, расположенных на линиях нивелирования проводилось, системой замкнутых полигонов с опорой на один исходный пункт, в качестве которого был принят центр пункта триангуляции 2 класса «Исток реки Трляха».

СКО на 1 км хода II класса составила величину ± 8 мм, что не превышало ее допустимого значения.

Нивелирование IV класса выполнялась для передачи нормальных высот от пунктов нивелирования II класса на пункты опорной гравиметрической сети, не включенных в линии нивелирования II класса, а также для определения разности геодезических и нормальных высот (аномалий высот).

Схема высотной основы ГДП, созданной нивелированием II и IV классов приведена на рисунке 30.

В ряде случаев передача высот на пункты рядовой сети геометрическим нивелированием вызывала затруднение. Этому способствовала отсутствие проходимости на больших по площади заболоченных участках, сложные природно-климатические условия, слабо развитая дорожная сеть. Результаты выполненных экспериментальных работ на Спорышевском и Западно-Суторминском ГДП по определению нормальных высот пунктов ГДП спутниковыми методом [25], позволили принять решение о практической апробации спутникового метода на Вынгапуровском ГДП.

Выполнение необходимых подготовительных работ позволило построить схему аномалий (ζ) высот [25], с использованием которой и данных спутниковых определений на пунктах рядовой сети были получены нормальные высоты пунктов рядовой сети, со СКО ± 44 мм при допустимой по проекту ± 48 мм [35].

При этом из 139 пунктов, принятых в обработку, у 16 пунктов (11,5 %) погрешность определения высот была недопустимой. Была выполнена отбраковка пунктов с грубым определением геодезических высот. Оставшиеся пункты были включены в обработку.

Анализ результатов выполненного спутникового нивелирования показал, на

достаточно великую вероятность ошибочного получения высоты пункта из спутниковых наблюдений от одной базовой станции.

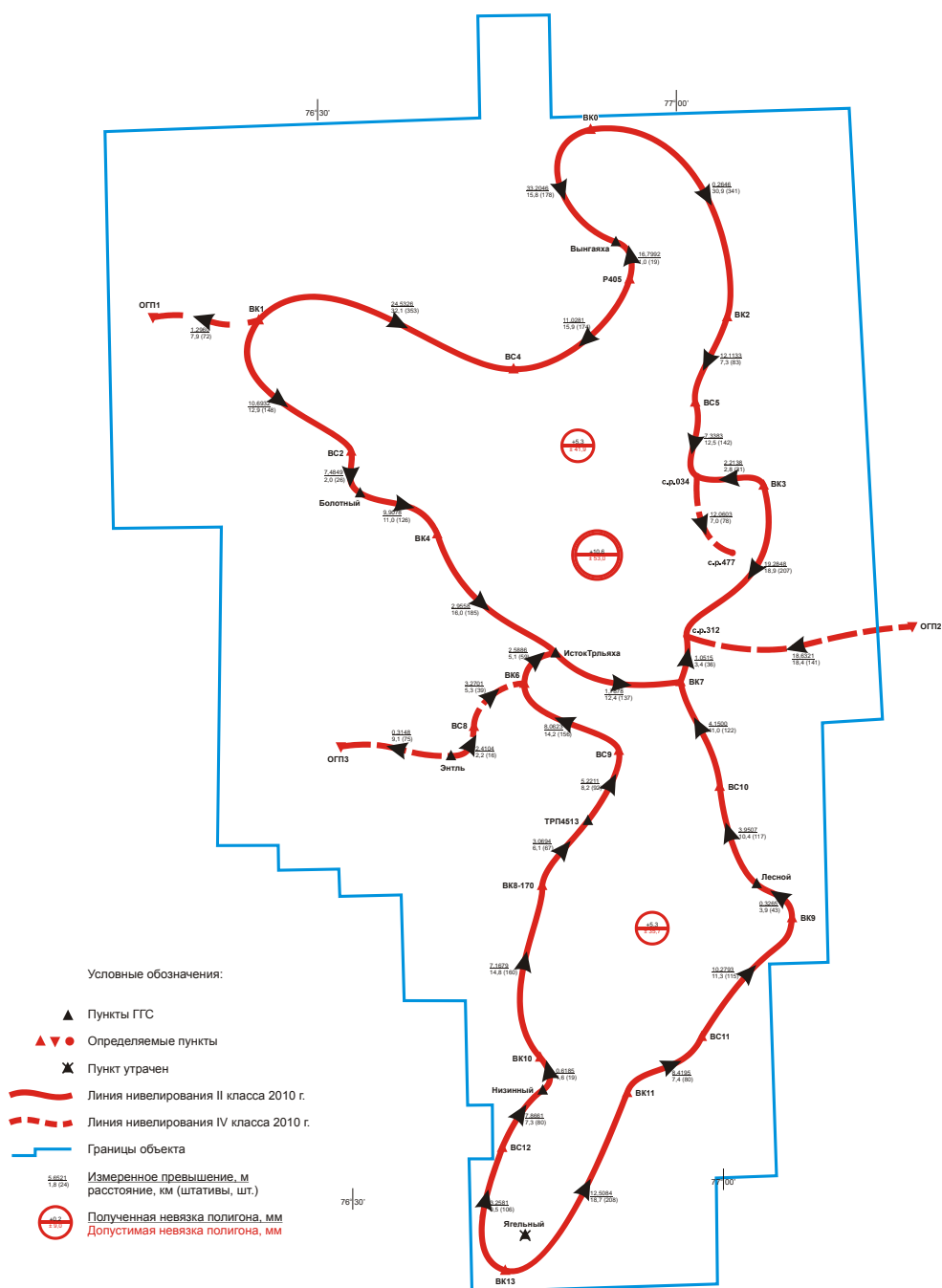


Рисунок 30 – Схема нивелирования II и IV классов в первом цикле измерений на Вынгапуровском ГДП

Практическая апробация метода спутникового нивелирования с использованием схемы аномалий (ζ) высот подтвердила возможность обеспечения гравиметрической съемки высотными данными с необходимой точностью.

Высокая точность измеренных значений приращений силы тяжести в опор-

ной и рядовой гравиметрической сети на Вынгапуровском ГДП обеспечивалось за счёт применения петлевой системы рейсов с перекрытием в узловых пунктах и повторных (при необходимости) рейсов измерений в противоположном направлении. В качестве исходного был принят пункт ВК7.

Использование вышеуказанной методики натуральных измерений, применение современной автоматизированной гравиметрической аппаратуры позволило определить значения аномалий силы тяжести с общей СКО порядка $m_{\Delta g} = \pm 0,025$ мГал. Для наглядности представления сечение изоаномал на отчётных схемах (планах) аномалий силы тяжести в редукции Буге было принято равным 0,5 мГал, регионального фона 1,0 мГал. Для локальных аномалий оно составило величину 0,20 мГал.

Разделение поля аномалий силы тяжести, на региональный фон и поле локальных аномалий силы тяжести для последующей интерпретации с целью уточнения сейсмо-тектонической обстановки на территории ГДП осуществлялось так же как и на Спорышевском ГДП.

Вместе с тем, учитывая значительные различия в площадях месторождений, включенных в состав ГДП, разделение аномального гравитационного поля силы тяжести в первом цикле измерений на локальную ($\Delta g_{лок}$) и региональную ($\Delta g_{рег}$) составляющие осуществлялось в четырёх вариантах. При этом численные параметры квадратной палетки компьютерного осреднения ($2l \times 2l$), соответствующие радиусу круговой палетки R , указанного в скобках, составляли: $l_1 = 2$ км ($R = 2,513$ км); $l_2 = 4$ км ($R = 4,513$ км); $l_3 = 6$ км ($R = 6,770$ км); $l_4 = 8$ км ($R = 9,027$ км).

Была создана исходная цифровая модель аномального поля с шагом (1 x 1) км. В полученном аномальном поле силы тяжести в редукции Буге и его региональном фоне (рисунок 31) отчётливо отражался гравитационный эффект от глубоко залегающего объекта, имеющего пониженную плотность по отношению к вмещающим массам [35].

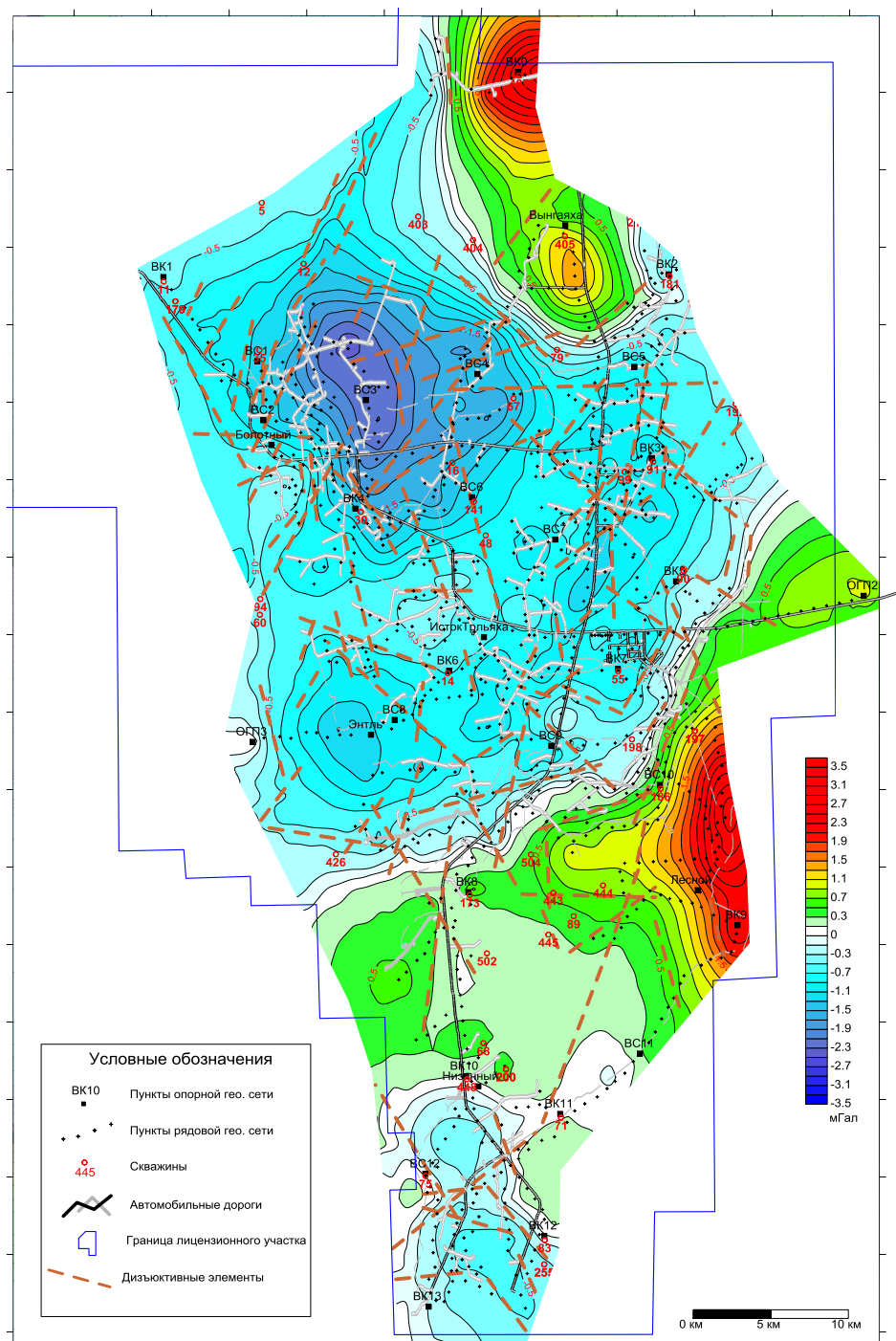


Рисунок 31 – Схема локальных аномалий силы тяжести $\Delta g_{\text{лок}}$ ($\sigma_0 = 2,00 \text{ г/см}^3$, $l = 8,0 \text{ км}$) и особенностей тектонического строения Вынгапуровского месторождения

В процессе создания схемы локальных аномалий, независимо от размера (d) параметра осреднения, была выявлена закономерность в ее проявлении, которая давала возможность уже на начальном этапе геодинимических наблюдений на ГДП сделать ряд весьма важных выводов [35];

– как и на Спорышевском месторождении зоны отрицательных значений

локальных аномалий практически однозначно соответствовали в плановом положении залежам УВ. При этом отрицательные аномалии, приуроченные к залежам газа, имеют наибольшую величину, отличались от «нефтяных» в 1,6 - 2,0 раза;

– большая степень изрезанности поля отрицательных аномалий силы тяжести указывает на наличие большей дифференциации микроблоков верхней части геологического разреза, а также на большое число дизъюнктивных нарушений.

Результаты качественной интерпретации позволили закартировать многочисленные дизъюнктивные нарушения, которые позволили выбрать плановые положения расчетных профилей следующих циклов измерений, на которых, предполагалось организовать мониторинг движений земной поверхности во втором и последующих циклах геодинамических исследований.

Второй цикл измерений на Выгапуровском месторождении выполнялся в период с мая по декабрь 2011 г.

Основным во втором цикле являлось выполнение измерений по расчетным профилям (рисунки 32, 33) со сгущением точек на отдельных участках, приуроченным к зонам повышенного значения горизонтального градиента изменений силы тяжести, предположительно связанными с дизъюнктивными нарушениями разреза, выявленными по результатам гравиметрии в первом цикле наблюдений. При этом для выявления горизонтальных движений поверхности земной поверхности, во втором цикле по всем опорным пунктам и пунктам сгущения, участвовавших в наблюдениях первого цикла, было проведено повторное координирование.

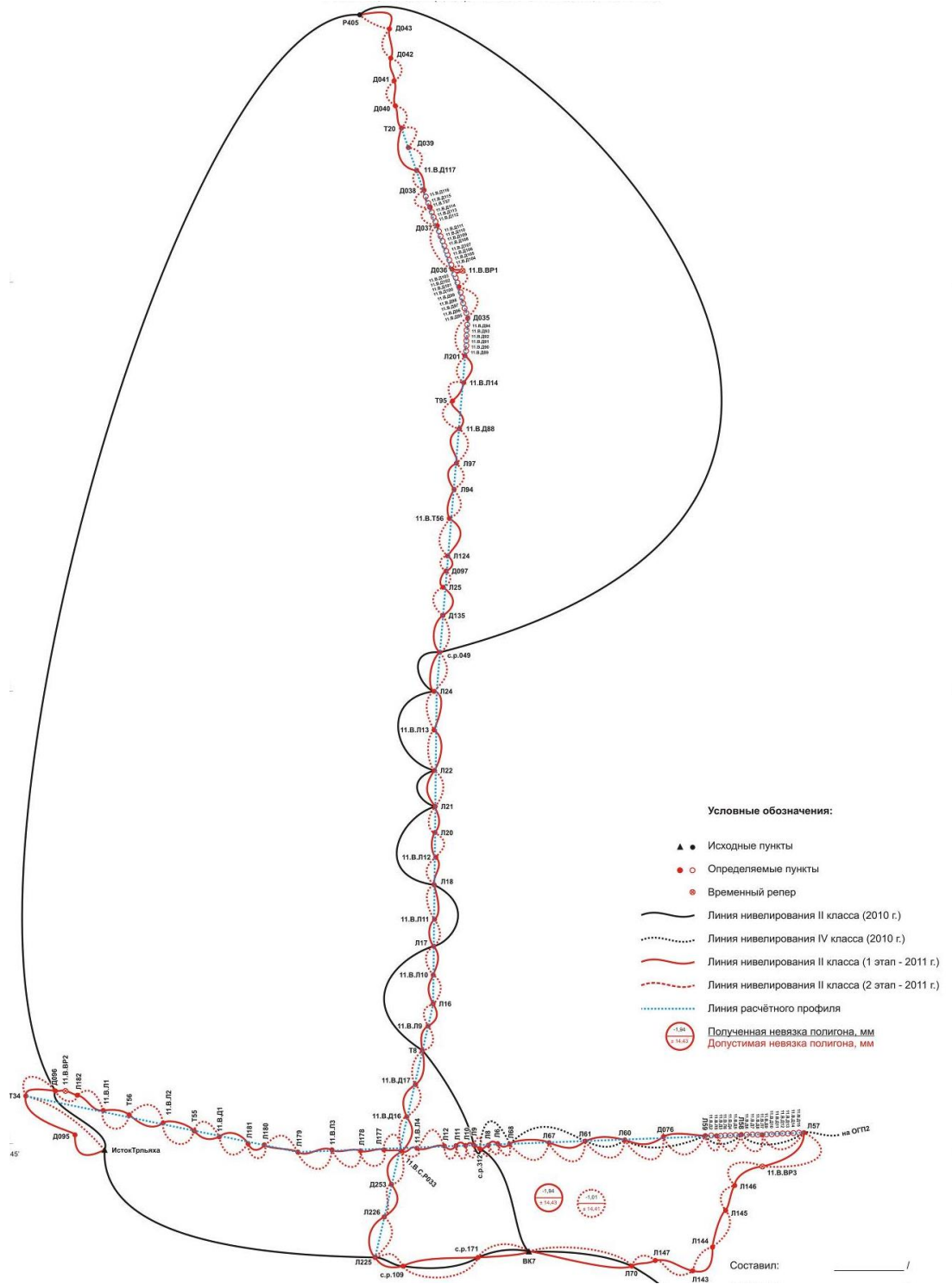


Рисунок 32 – Схема нивелирования II класса второго цикла натуральных измерений по расчётным профилям северной части Вынгапууровского ГДП

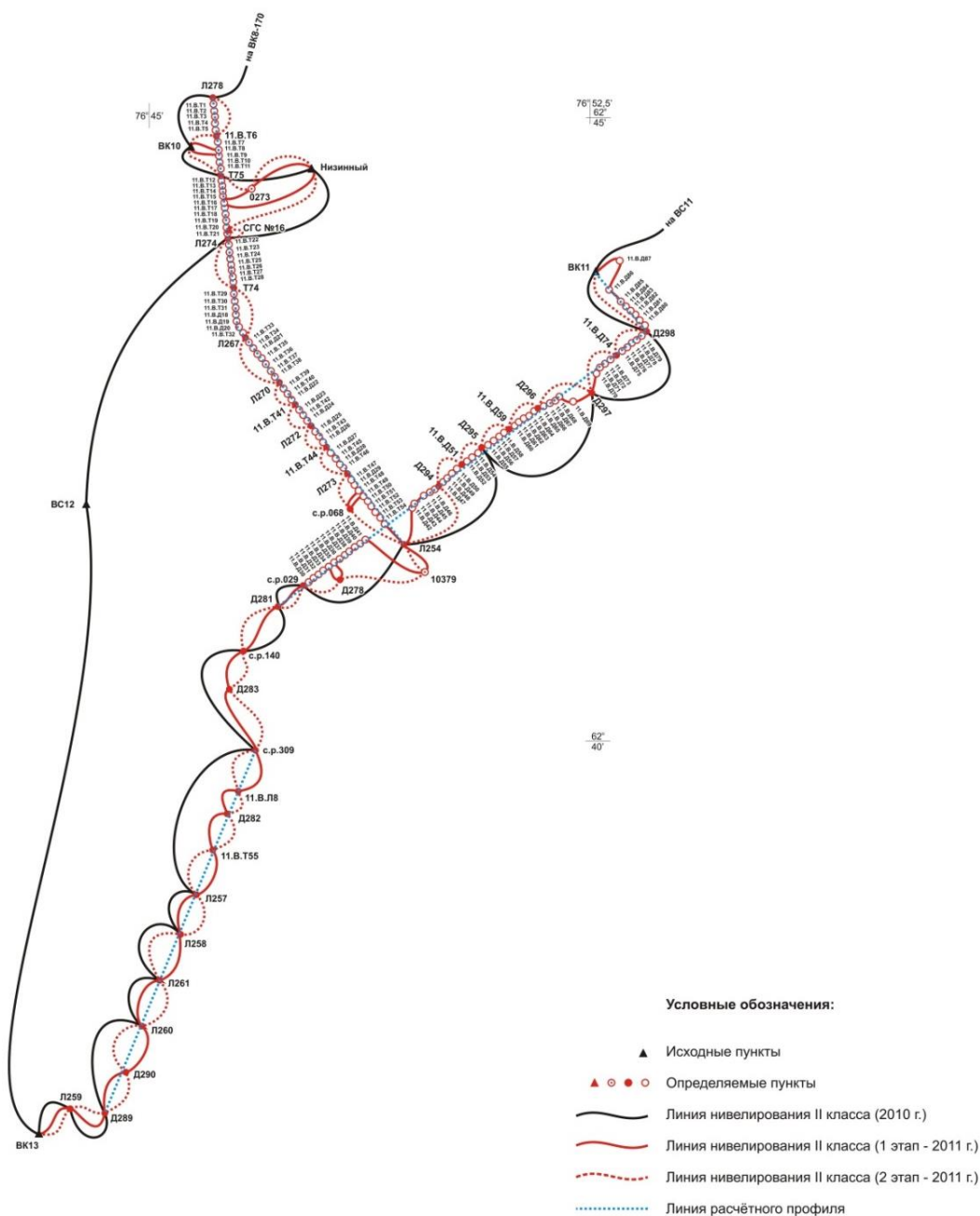


Рисунок 33 – Схема нивелирования II класса второго цикла натурных измерений по расчётным профилям южной части Вынгапуровского ГДП

Для выявления короткопериодных вертикальных движений было выполнено высокоточное нивелирование по пунктам расчётных профилей дважды с интервалом между первым и вторым этапами наблюдений примерно один-два месяца. В нивелирование обязательно включались все пункты (реперы) первого цикла наблюдений, высоты которых были определены из нивелирования II класса. Гра-

виметрия по опорным гравиметрическим пунктам во втором цикле наблюдений была проведена по программе выполнения работ первого цикла. При этом измерения выполнялись и на вновь заложенных пунктах (реперах) расчётных профилей и рядовых (мобильных) пунктах, с известными значениями силы тяжести, определёнными в первом цикле. Расстояния между пунктами по расчётным профилям были не более 500 м, а на участках, где предполагалось наличие в разрезе тектонических нарушений, шаг составлял в среднем 100 м. Сто девяносто пунктов мобильной сети, заложенных для сгущения на расчётных профилях, «связывались» одиночными базовыми линиями с ближайшими пунктами каркасной сети (при длине базовой линии не более 10 км).

Гравиметрические измерения на пунктах опорной и рядовой сети выполнялись одновременно с нивелированием по методике и программе принятой в первом цикле натурных измерений с включением всех пунктов, заложенных на расчётных профилях.

Обработка и уравнивание результатов спутниковых координатных определений, нивелирования и гравиметрии выполнялись с сохранением всех параметров, принятых в первом цикле. Были получены необходимые данные с погрешностями, позволяющими выполнить сопоставление результатов всего комплекса натурных измерений.

Разделение аномалий силы тяжести с целью использования их региональных и локальных значений на геодинамическом полигоне была выполнена также как и в первом цикле. При этом «региональный» фон, полученный в первом цикле, считался неизменным.

Положение расчётных профилей, по которым в 2011 г. проводились геодезические и гравиметрические измерения, представлено в генерализованном виде на рисунке 34 на фоне локальных аномалий силы тяжести, полученных в первом цикле в 2010 г.

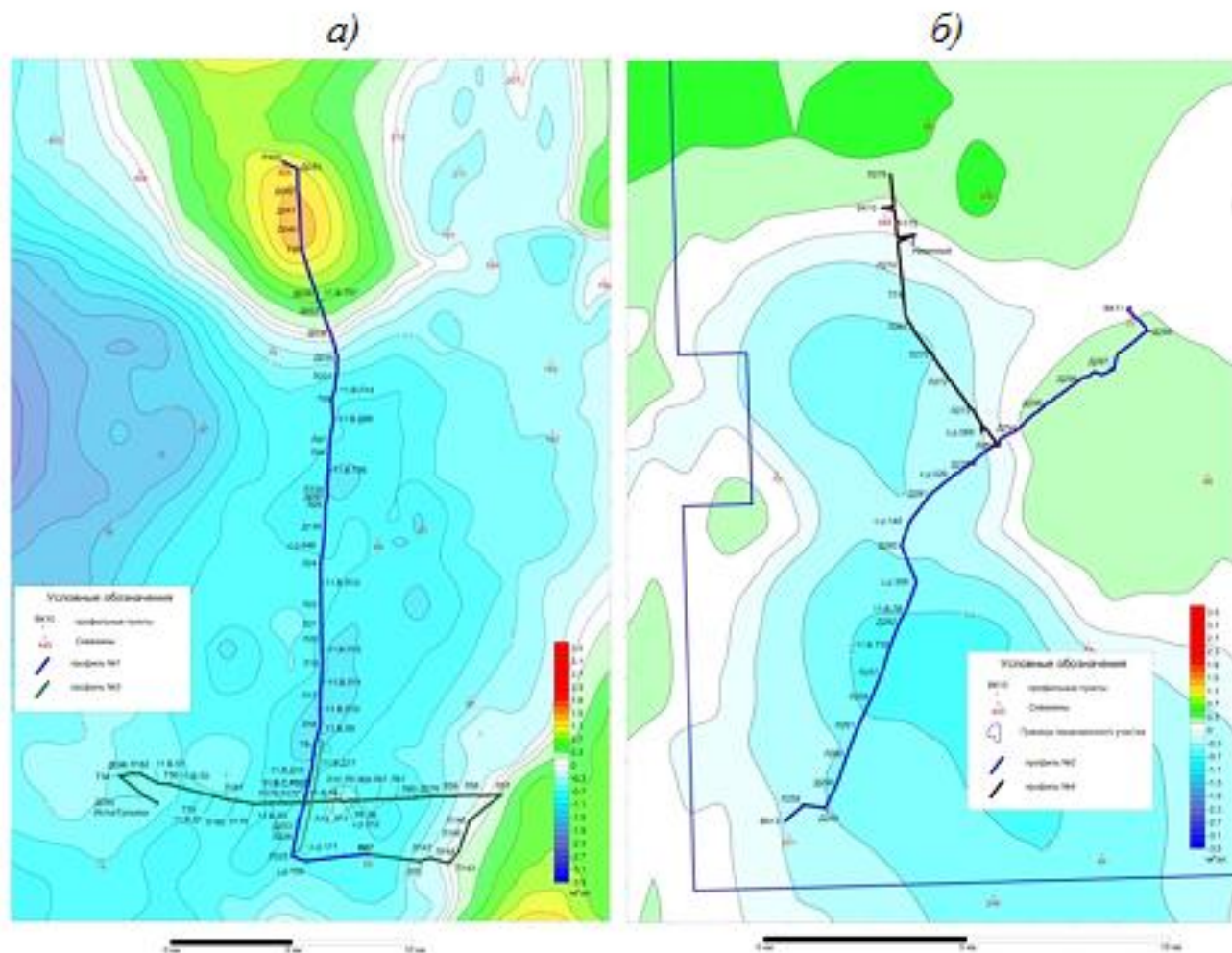


Рисунок 34 – Расположение расчетных профилей локальных аномалий силы тяжести: *а)* – профиль № 1; *б)* – профиль № 4

Расчётные профили представляли собой относительно спрямлённые линии. Отдельные изгибы их были связаны с необходимостью удобства передвижения, а также обеспечения выхода на опорные пункты, как например, п.тр. Низинный, Исток реки Трляха, ВК7, Р403, ВК11, ВК13. На результативных графиках (рисунки 35, 37) значительные углы разворота направления профилей отмечены треугольным значком со стрелкой.

По третьему и четвёртому расчётным профилям (рисунки 35 и 36 соответственно) как между циклами, так и между этапами второго цикла, существенных изменений высот пунктов и значений силы тяжести отмечено не было. Имелись вариации, которые лежали в пределах удвоенных значений средних квадратических погрешностей натуральных измерений. Это свидетельствовало о стабильном

состоянии земной поверхности, где были проложены расчётные профили, и сохранении постоянства дифференциации плотности горных пород по вертикальному разрезу.

По второму расчётному профилю (рисунок 37) существенных изменений положения пунктов по высоте между этапами (в течение периода наблюдений) не наблюдалось. Некоторое понижение земной поверхности (в пределах ± 2 мм) фиксировались в начале второй половины профиля, что, по-видимому, было связано с сезонным изменением верхней части грунта, так как в гравитационных аномалиях они не нашли отражения.

Вместе с тем отчётливо отражается разница высот пунктов в первом и втором циклах, которая, изменяясь монотонно (за исключением пунктов Л259 и Л260 в южной части профиля), уменьшается от (минус 19 мм) до (минус 12 мм) с юга на север. Систематическое отличие (в меньшую сторону) высот пунктов второго цикла относительно первого цикла однозначно интерпретировать не представлялось возможным. С несколько большей вероятностью можно было предположить, что за время между циклами ощутимо изменилось положение по высоте одного из опорных реперов, что обусловило равномерное распределение невязки в нивелирном ходе с одним знаком. Если учесть, что «приподнятыми» оказались северные концы второго и четвертого профилей, то более вероятным могло оказаться опускание центра пункта ВК13. По-видимому, на этом участке был неустойчивый грунт. Косвенно это подтверждалось результатами нивелирования в интервале между пунктами Л259 и Л260, а так же отсутствием дифференциации аномального гравитационного поля, так как в случае ошибок в определении высот порядка 30 мм наблюдались бы локальные отклонения в силе тяжести порядка 0,08 - 0,09 мГал. А это не было зафиксировано гравиметрией.

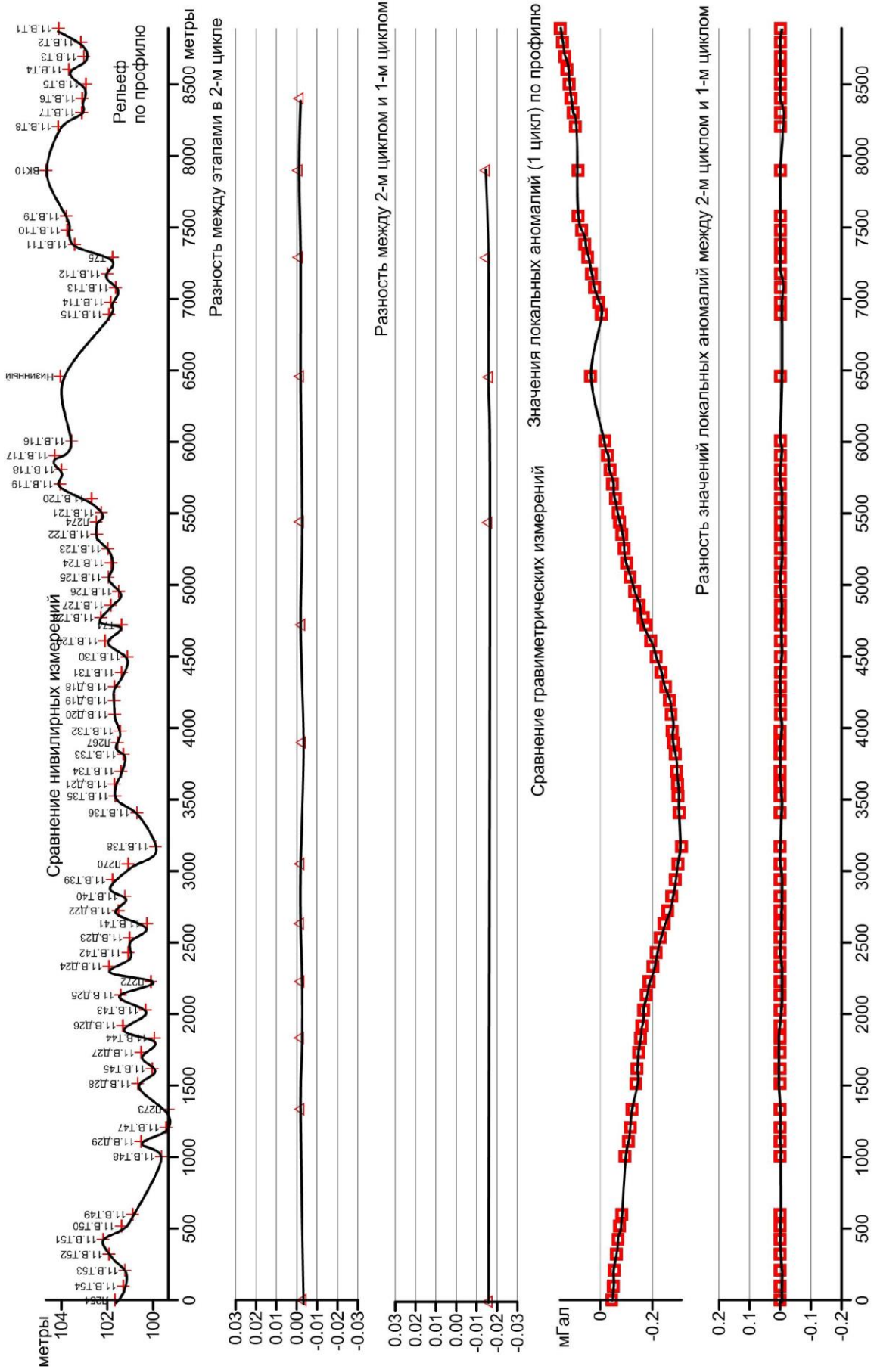


Рисунок 36 - Результаты сравнения наблюдений в первом и втором циклах по профилю №4

Наиболее значимые результаты, как по нивелированию, так и по гравиметрии были получены для первого расчётного профиля (рисунок 38). Этот профиль с юга на север пересекает зону пониженных значений локальных аномалий силы тяжести, приуроченных в плане к толще продуктивных горизонтов с залежами углеводородного сырья, с выходом в северной части в зону положительной гравитационной аномалии, отражающей гравитационный эффект блока горных пород повышенной плотности (рисунки 38 и 39). В интервале от пункта ВЛ14 до пункта Д038 в первом цикле измерений были закартированы дизъюнктивные нарушения северо-восточного и северо-западного простирания с пересечением предположительно в районе участка, расположенного западнее пунктов Д035 и Д036 на расстоянии 0,7 - 0,9 км. Разность аномального гравитационного поля по этому расчётному профилю отразила существенное перемещение водных масс в геологическом разрезе с его крайней северной части, в район вышеуказанного участка дизъюнктивных нарушений, создавая сугубо локальный максимум величиной 0,23 мГал (пункт ВЛ14).

Сравнительные данные по профилю № 1, представленные на рисунке 38, отображают как вертикальные смещения земной поверхности, так и локальные изменения аномального гравитационного поля.

Особый интерес представляло то, что зафиксированное вертикальное смещение дневной поверхности произошло вследствие перераспределения водных масс в геологическом разрезе, которое потребовало необходимость выполнения количественной интерпретации и причины их возникновения.

Для объяснения причин выявленных вертикальных движений земной поверхности и разности аномального гравитационного поля по профилю № 1 была выполнена количественная интерпретация геодезическо-гравиметрических данных первого и второго циклов измерений. Результаты количественной интерпретации и объяснение причин вариаций аномального гравитационного поля и вертикальных смещений земной поверхности опубликованы [37], результаты которой излагаются далее.

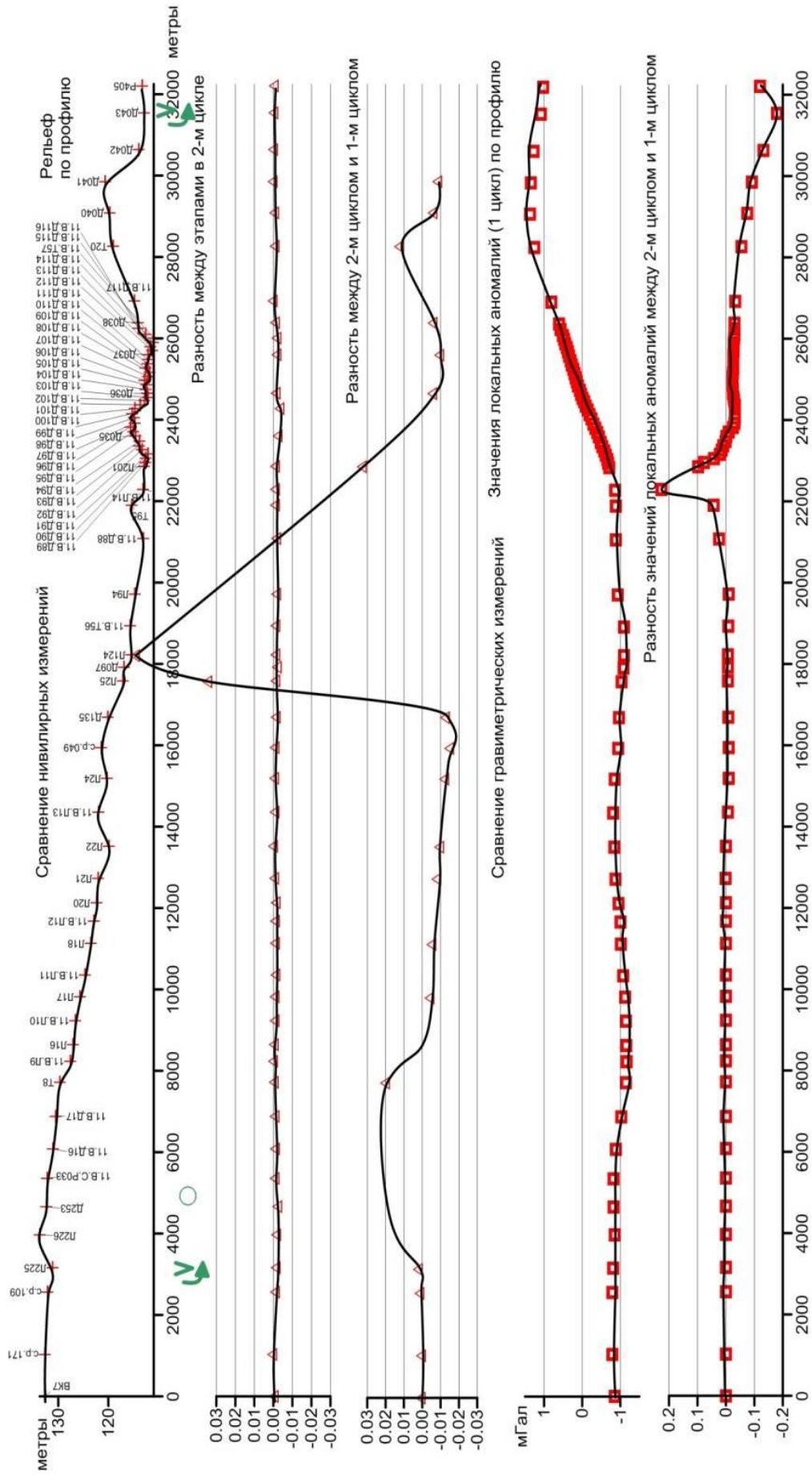


Рисунок 38 – Результаты сравнения наблюдений в первом и втором циклах по профилю № 1

На рисунке 39 б, на этом профиле отметки высот колеблются от 110 до 132 м. По профилю, (рисунок 39 а) зафиксированы отрицательные значения (0,10 мГал) локальных аномалий силы тяжести. На рисунке 39 г представлена разность аномального гравитационного поля между первым и вторым циклами, которая вызвана перемещением предположительно водными массами, и отмечается положительной локальной аномалией величиной 0,23 мГал и отрицательной локальной аномалией минус 0,18 мГал, вертикальные смещения земной поверхности отмечены на рисунке 39 в.

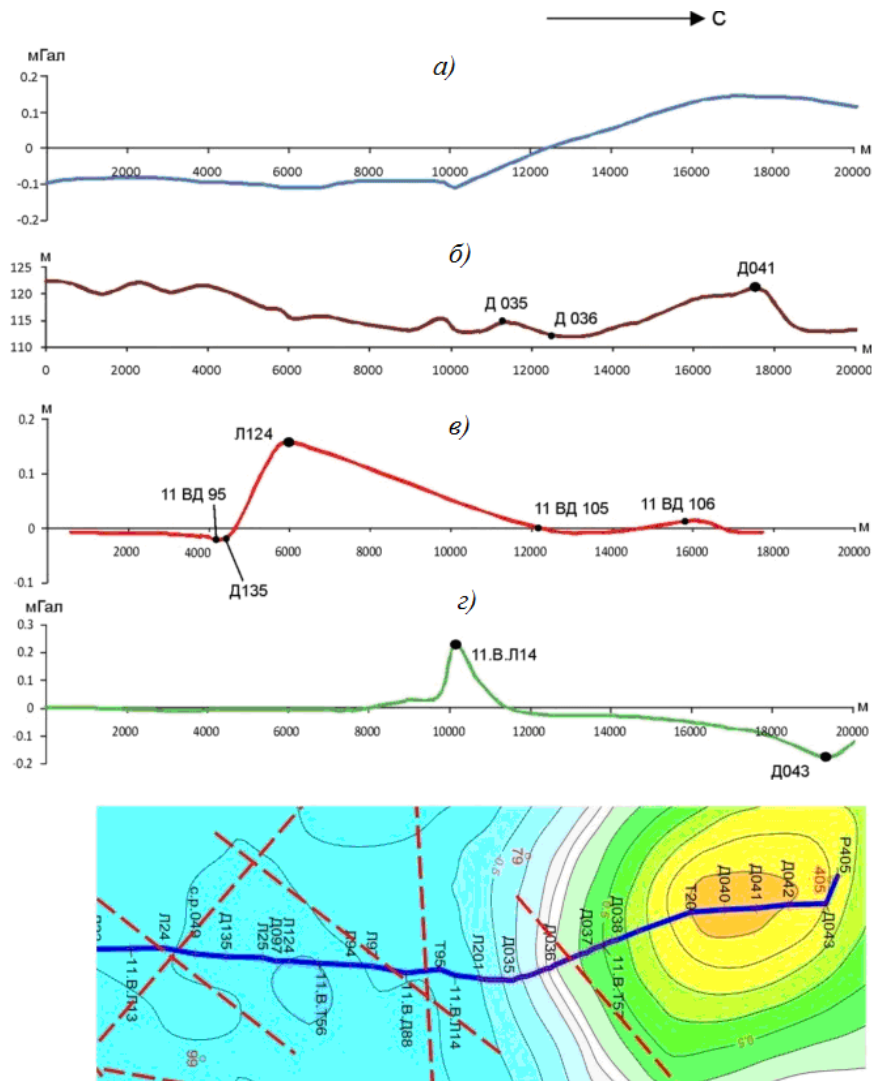


Рисунок 39 – Графики: а) локального поля силы тяжести; б) рельефа местности; в) разности значений высот пунктов; г) аномального гравитационного поля между первым и вторым циклами измерений и фрагмент схемы локальных аномалий силы тяжести $\Delta g_{\text{лок}}$ ($\sigma_0 = 2,00 \text{ г/см}^3$, $l = 8,0 \text{ км}$)

С целью объяснения причин изменения аномального гравитационного поля и вертикальных смещений земной поверхности была решена обратная задача гравиметрии. В первом приближении водные массы были представлены в виде объема шара. Расчеты, выполнялись с использованием известных формул с учетом численных параметров кривых локальных аномалий силы тяжести для значений плотности воды ($\sigma_B = 1,0 \text{ г/см}^3 = 1,0 \text{ т/м}^3$) и плотности пород осадочной толщи ($\sigma = 2,0 \text{ г/см}^3 = 2,0 \text{ т/м}^3$).

Известно [14, 46], что аномальный гравитационный эффект шаровой массы определяется уравнением

$$\Delta g_{\text{ш}}(x, H) = f \cdot M_{\text{ш}} \cdot \frac{H}{r^3}, \quad (7)$$

где $M_{\text{ш}} = V_{\text{ш}} \cdot \sigma = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \sigma$ – масса шара;

σ – плотность шаровой массы;

$$f = 6,67 \cdot 10^3 \cdot \frac{\text{мГал} \cdot \text{м}^2}{\text{т}};$$

R – радиус шара;

$r = \sqrt{H^2 + x^2}$ – расстояние от результирующей точки на расчетном профиле до центра шара;

$H_{\text{ш}}$ – глубина центра шара относительно результирующего уровня;

x – расстояние на расчетном профиле результирующей точки относительно точки, в которой гравитационный эффект шара максимальный по величине (соответствующей в плане центру шара).

В рассматриваемом случае определение неизвестных ($H_{\text{ш}}$ и $M_{\text{ш}}$) может быть выполнено с использованием параметров аномалии в точках максимального по абсолютной величине значения $\Delta g(x=0)$ и его половинного значения

$$\Delta g \left(x_{\frac{1}{2}} = a \right) = \frac{1}{2} \Delta g(x=0).$$

Из выражения (7) следует, что

$$\frac{2}{(\sqrt{a^2 + H_{\text{ш}}^2})^3} = \frac{1}{H_{\text{ш}}^3}. \quad (8)$$

Расчеты, выполненные для отрицательной аномалии дали следующие результаты: масса шара $M_{\text{ш}} \cong 12845000$ т., а радиус шара $R_{\text{ш}} = 0,313$ км.

Вместе с тем, было очевидно, что резервуар, из которого производился забор водных масс, это – водоносный пласт субгоризонтального простирания на глубине меньшей, чем предельная, определенная для шаровой емкости, с более широкими горизонтальными размерами.

Определение параметров такого пласта было выполнено, исходя из следующих соображений:

– в плане пласт соответствует горизонтальному круговому диску. Площадь поверхности диска по размерам соответствует горизонтальному квадратному пластику такой же толщины. Расстояние от центра диска до стороны, ограничивающей квадратный пласт, составляет величину, соответствующую значению $x_{\frac{1}{2}} = a$.

В этом случае соблюдается условие:

$$\Delta g \left(x_{\frac{1}{2}} = a \right) = \frac{1}{2} \Delta g (x = 0);$$

– масса пласта соответствует массе шара, а величина радиуса диска составляет

$$\rho = \frac{2a}{\sqrt{\pi}}$$

Вместе с тем, величина притяжения диска в точке с $x=0$ определяется по известной формуле [14, 46]

$$\Delta g(x = 0) = 2\pi f \sigma \left[\Delta H - \sqrt{H_2^2 - \rho^2} + \sqrt{H_1^2 + \rho^2} \right], \quad (9)$$

где $\Delta H = H_2 - H_1$;

H_2 – глубина нижней границы диска;

H_1 – глубина верхней границы диска.

Учитывая, что в этом случае $H_1 < \rho > H_2$, а объем диска (как и масса) равен объему (и массе) шара, когда

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \cong \pi \rho^2 \cdot \Delta H \quad (10)$$

получаем, что водные массы были извлечены из пласта субгоризонтального простираения мощностью $\Delta H = 0,0114 \text{ км} = 11,4 \text{ м}$, расположенного на глубине 14195 м.

Такие же расчеты для положительной аномалии силы тяжести дают следующие результаты: $R_{ш} = 0,57 \text{ км}$, $M_{ш} \cong 11,2 \cdot 10^6 \text{ т}$, $V_{ш} \cong 11,2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Обводненная зона, представляется в виде субвертикальной полуплоскости пересекающая профиль, с параметрами: с шириной примерно 20 м, расположенное по глубине от 80 до 2420 м. Расхождение в объемах водных масс, созданных отрицательным и положительным аномалиями, составляет 8,7 %. Становится ясным, что только около 90 % водных масс было закачено в систему поддержания пластового давления, а остальная часть мигрировала по тектоническим нарушениям в верхние горизонты, и повлияла на устойчивость верхней части разреза [37].

Практические результаты геодезическо-гравиметрического метода и технологии мониторинга техногенной геодинамики на Спорышевском и Вынгапуровском ГДП, показали высокую эффективность комплексного геодезическо-гравиметрического метода по выявлению и оценке техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа как по степени достоверности получаемых сведений, так и по срокам их получения по сравнению с традиционно применяемыми и нормативно предписываемыми методами геодинамических исследований.

При этом полученные результаты позволяют выполнить, при необходимости, количественную оценку деформаций с объяснением причин, создающих эти процессы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационных исследований выполнена разработка методики и обоснована рациональная технология геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа Западной Сибири.

При этом решены следующие задачи:

– выполнен аналитический анализ и обзор современного состояния изучения техногенной геодинамики на ТГДП, позволивший выявить проблемы в ведении геодинамического мониторинга, применении геодезических методов измерений на ГДП, последовательности обработки и выполнения интерпретации результатов измерений;

– обосновано применение гравиметрии как самостоятельного метода, так и в комплексе с высокоточным нивелированием изучения техногенных геодинамических процессов, обеспечивающей высокое качество интерпретации результатов измерений;

– разработана методика и технология выявления тектонических нарушений по данным гравиметрии и геодезии, позволяющая локализовать площадь месторождения по признакам геодинамического риска для организации на них мониторинга техногенной геодинамики;

– разработан принцип построения «жесткой» геодинамической сети и порядка ведения натурных измерений для получения достоверных и оперативных сведений о геодинамическом состоянии месторождения, позволяющих минимизировать количество необходимых циклов измерений и минимизировать погрешность получаемых результатов измерений;

– разработана рациональная методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа и технологическое решение ее реализации, обеспечивающая оперативность, достоверность сведений о геодинамическом состоянии изучаемой территории для принятия управленческих решений.

Таким образом, поставленные цели выполнены, вытекающие из нее задачи решены.

Методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа прошла апробацию на следующих ГДП, созданных на месторождениях нефти и газа: ОАО «Газпромнефть» - Спорышевском, Вынгапуровском, Западно-Суторминском; ООО «Газпром нефть Новый Порт» - Новопортовском; ООО «Новосибирскнефтегаз» - Верх-Тарском.

На основании результатов диссертационных исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации:

- используемые в настоящее время методы изучения техногенной геодинамики направлены, прежде всего, на выявление обширных просадок территорий. При всех их достоинствах они не отвечают требованиям времени по оперативности, своевременности, достоверности и полноте получаемых сведений;

- высокоточное нивелирование на большинстве месторождений выполняется разомкнутыми ходами без учёта специфики местных условий, тогда как применение нивелирования для целей выявления геодинамики, в том числе техногенной, требует неформального подхода;

- становится все более очевидным, что применяемые до последнего времени подходы к изучению геодинамических процессов перестали соответствовать возросшим требованиям времени как по срокам, так и по достоверности измерительной информации. Актуальной становилась задача разработки иного, свободного от недостатков предшествующих, методов изучения геодинамики как по принципу создания геодинамических сетей, так и по обработке и последующей интерпретации получаемых результатов;

- опыт применения гравиметрии при геолого-поисковых работах, при строительстве и эксплуатации крупных инженерных сооружений подтвердил возможность и необходимость прямого применения гравиметрии как самостоятельного метода в комплексе с геодезическими методами при мониторинге техногенной геодинамики;

– изложенная методика и технологическое решение ее практического применения на Спорышевском и Вынгапуровском ГДП показали высокую эффективность как по степени достоверности получаемых сведений, так и по срокам их получения по сравнению с традиционно применяемыми и нормативно предписываемыми методами;

– технологическое решение, направленное на предварительное уточнение местоположений участков опасных деформаций земной поверхности, с последующим ведением мониторинга на этих локализованных зонах, а не по всей территории месторождения, позволяет оценить геодинамическое состояние в более короткие сроки;

– в первом цикле измерений геодезическое обеспечение высокоточной гравиметрической съёмки территории ГДП, направленное на уточнение геолого-тектонического состояния, осуществляется путём развития рядовой сети, опирающейся на разреженную сеть пунктов опорной геодинамической сети, которая, в случае необходимости, сгущается до необходимой плотности в локализованных участках;

– нивелирование и гравиметрические измерения по опорным пунктам необходимо выполнять по высокопроизводительной и качественной петлевой системе замкнутых рейсов (ходов) с одним исходным пунктом;

– необходимость специального оформления опорных гравиметрических пунктов (с закладкой бетонных плит для установки гравиметров и их маркирования) отпадает в связи с тем, что гравиметрические измерения, выполненные на бетонных плитах, могут привести к «разбросу» измеряемых приращений силы тяжести в пределах 500 – 1500 мкГал;

– сопоставление результатов натуральных измерений выполняется относительно исходного (узлового) пункта, на котором координаты (X, Y, H), а также значение силы тяжести считаются (условно) неизменными для всех последующих циклов натуральных измерений;

Рассмотренная методика геодезического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа имеет перспективу своего развития, которая заключается в следующем:

- в возможности применения для мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях с интенсивной добычей твёрдых полезных ископаемых; при строительстве и эксплуатации крупных инженерных сооружений;

- в возможности применения на месторождениях углеводородов рассматриваемой методики для уточнения границ водогазонефтяного контакта одновременно с проведением геодинамических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Абрамов, В. А. Эффективность гравиметрической съемки в выявлении золоторудных месторождений куранахского типа [Текст] / В. А. Абрамов.– Якутск-Иркутск: ВСНИИГГИМС, ЯТГУ, 1975. – 81 с.
- 2 Абрамов, В. А. Геофизические исследования в Якутии [Текст] / В. А. Абрамов. – Якутск: Якутск. ун-т, 1990. – С. 42–48.
- 3 Андреев, Б. А. Геологическое истолкование гравитационных аномалий [Текст] / Б. А. Андреев, И. Г. Клушин.– Л.: Гостоптехиздат, 1962.– 495 с.
- 4 Арутюнов, А. Е., Горно-геологическое обоснование и проектирование геодинамических полигонов на подземных хранилищах газа (на примере Касимовского ПХГ) [Текст] / А. Е. Арутюнов, А. Г. Грунин, А. П. Зубарев и др. // Маркшейдерский вестник. – 2012.– № 4.– С. 43-51.
- 5 Ашихмин, С. Г. Научные основы методов прогноза напряженно-деформированного состояния горных пород [Текст]: автореф. дис. на соиск учен. степ. д-ра техн. наук / С. Г. Ашихмин.– ПГТУ, 2008. – 315 с.
- 6 Блох, Ю. И. Количественная интерпретация гравитационных и магнитных аномалий [Текст] / Ю. И. Блох. – М.: МГГА, 1998. – 88 с.
- 7 Бурый, А. Л. Сейсмоопасный бизнес [Текст] / А. Л. Бурый, Л. Клокова // Компания.– 1998.–№ 13.– 1998.– С. 13-16.
- 8 Бычков, С. Г. Сравнительный анализ эффективности сейсморазведки и структурного бурения [Текст] / С. Г. Бычков, А. Н. Морошкин // Нефть и газ: Вестник ПГТУ. – 1999. – Вып. 2. – С. 42–47.
- 9 Анализ результатов геодинамического мониторинга на Самотлорском месторождении за период с 2002-2012 годы [Текст] : материалы Всерос. конф. / Ю. В. Васильев и др. // Современная геодинамика недр и эколого- промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса.– М.: ТиРу.– 2013.- С. 14-21.
- 10 Гайрабеков, И. Г. Особенности построения геодезических сетей для наблюдения за оседанием земной поверхности в районе добычи нефти и газа

[Электронный ресурс] / И. Г. Гайрабеков // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 1. – Режим доступа: ivdon@ivdon.ru.

11 Сейсмичность юго-востока Татарстана [Текст] / Р. Н. Гатиятуллин и др. // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса: материалы Всерос. конф. – М.: ТиРу, 2013. – С. 32–40.

12 Опыт применения комплекса геодинамических наблюдений на Ашальчинском месторождении сверхвязких нефтей республики Татарстан [Текст] / Р. Н. Гатиятуллин и др. // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса: материалы Всерос. конф. – М.: ТиРу. – 2013. – С. 22–31.

13 ГКИНП (ГНТА)-04-122-03. Инструкция по развитию высокоточной гравиметрической сети России [Текст]. – М.: ЦНИИГАиК, 2004. – 125 с.

14 Гладкий, К. В. Гравиразведка и магниторазведка [Текст] / К. В. Гладкий. – М.: Недра, 1967. – 317 с.

15 Грунин, А. Г. Практические аспекты проектирования геодинамических полигонов на месторождениях углеводородного сырья [Текст] / А. Г. Грунин // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса: материалы Всерос. конф. – М.: ТиРу, 2013. – С. 42–48.

16 Гуляев, Ю. П. Принципы формирования оптимальной точности геодезического обеспечения инженерных работ [Текст] / Ю. П. Гуляев // Современные проблемы геодезии и оптики: Междунар. научно-техн. конф.: тез. докл. – Новосибирск: СГГА. – 1998. – С. 12–13.

17 Дедов, В. П. Микросейсмический сигнал пружинного гравиметра [Текст] / В. М. Дорохин, А. И. Каленицкий, Б. П. Филимонов // Измерительная техника. – 2007. – № 3. – С. 48–51.

18 Долгаль, А. С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности [Текст] / А. С. Долгаль. – Абакан: Фирма-МАРТ, 2002. – 188 с.

- 19 Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов [Текст]. – М.: ЦНИИГАиК, 2004.– 226 с.
- 20 Инструкция по гравиразведке [Текст].– М.: Недра, 1980.– 79 с.
- 21 Каленицкий, А. И. Методические рекомендации по учету влияния рельефа местности в гравиразведке [Текст]: практ. руководство МинГео СССР / А. И. Каленицкий, В. П. Смирнов.– Новосибирск: СНИИГГиМС, 1981.
- 22 Каленицкий, А. И. Перспективы и задачи использования GPS-технологий в геодезическом обеспечении мониторинга природно-технических систем [Текст] / А. И. Каленицкий, Ю. П. Гуляев // Сферы применения GPS- технологий: материалы Междунар. конф.– СГГА: Новосибирск, 1996.– С. 35–36.
- 23 Каленицкий, А. И. О структуре и оценке точности опорных гравиметрических сетей крупномасштабных съемок [Текст] / А. И. Каленицкий, И. А. Розенфарб // Вопросы рудной геофизики Сибири: тр. СНИИГГиМСа .–1969.– Вып. 92.– С.111–121.
- 24 Каленицкий, А. И. К проблеме повышения качества редуцирования гравитационного поля для геологической интерпретации [Текст] / А. И. Каленицкий ; СНИИГГиМС.– Новосибирск, 1987.– 28 с.– Деп. в ВИНТИ, № 6404-В-87.
- 25 Каленицкий, А. И. Методика и результаты определения разницы геодезических и нормальных высот на территории Спорышевского и Западно-Суторминского геодинамических полигонов [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким // ГЕО-Сибирь-2008: IV Междунар. науч. конгр.: сб. материалов.– Новосибирск, 22–24 апр. 2008 г. – Новосибирск: СГГА, 2008. – Т. 1, ч. 2. – С. 27–30.
- 26 Каленицкий А. И., Кузьмин В.И. Оценка плотности блоков верхней части земной коры по гравитационным аномалиям [Текст] / А. И. Каленицкий, В. И. Кузьмин // Геология и геофизика. – 1991. – № 10. – С.130–134.
- 27 Каленицкий, А. И. О комплексной интерпретации данных геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким // Вестник СГГА.– 2012.– Вып. 4(20).– С. 3–13.

28 Результаты мониторинга смещений земной поверхности и деформаций зданий и сооружений в г.Новый Уренгой по данным TerraSAR-X [Текст] / Ю. И. Кантемиров, Ю. В. Баранов, В. В. Билянский // Геоматика.– 2010.– № 1.– С. 73–79.

29 Кашников, Ю. А. Определение оседаний земной поверхности при разработке газоконденсатных месторождений по результатам интерферометрической обработки радарных съемок [Текст] / Ю. А. Кашников, А. А. Кривенко // Маркшейдерский вестник. – 2009.– № 3.– С. 44 – 49.

30 Каленицкий, А. И. Технология прикладной высокоточной гравиметрии [Текст]: дис. на соиск учен.степ. д-ра техн. наук в форме науч. докл. по двум специальностям : 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», 25.00.32 – «Геодезия» / Каленицкий Анатолий Иванович. – Новосибирск, 1994.– 72 с.

31 Результаты комплексных геодезическо-гравиметрических наблюдений на геодинамическом полигоне Спорышевского месторождения УВ [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л.Ким, В. А. Середович, М. Д. Козориз // ГЕО-Сибирь-2011: пленар. заседание: сб. материалов VII Междунар. науч. конгр., 19-29 апр. 2011 г. – Новосибирск: СГГА, 2011.– С.62–71.

32 Каленицкий, А. И. Некоторые результаты геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях углеводородов Западной Сибири [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким, В. А. Середович // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012: VIII Междунар. науч. конгр.: пленар. заседание : сб. материалов, 10–20 апр. 2012 г. – Новосибирск: СГГА, 2012. – С. 228–235.

33 Каленицкий, А. И. Комплексное геодезическо-гравиметрическое изучение техногенной геодинамики на месторождениях полезных ископаемых [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким, В. А. Середович // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса [Текст] : материалы Всерос. конф. – М.: ТиРу, 2013. – С. 75–82.

34 Каленицкий, А. И. К вопросу создания геодинамических полигонов на месторождениях нефти и газа [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким, В. А. Середович // Итерэкспо ГЕО-Сибирь-2014 : X Междунар. науч. конгр., 8-18 апр. 2014 г.; Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов в 2 т. – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 2. – С. 59–69.

35 Каленицкий, А. И. Результаты первого цикла натуральных геодезическо-гравиметрических измерений на Вынгапуровском геодинамическом полигоне [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким // Геодезия и картография. – 2011. – № 8. – С. 30–35.

36 Каленицкий, А. И. Результаты применения гравиметрии и высокоточного нивелирования при локализации участков повышенного геодинамического риска на месторождениях углеводородов [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким, М. Д. Козориз, В. А. Середович // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 1 (12). – С. 14–20.

37 Каленицкий, А. И. Современное представление о проведении геодинамических исследований на месторождениях нефти и газа [Текст] / А. И. Каленицкий, Э. Л. Ким, В. А. Середович // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/с. – С. 19–27.

38 Колмогоров, В. Г. Кинематика земной поверхности Западной Сибири по результатам инструментальных методов [Текст] / В. Г. Колмогоров // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38. – № 9. – С. 1538–1548.

39 Кострюкова, Н. К. Динамика приливных деформационных действий в локальных разломах земной коры - в связи с безаварийной эксплуатацией продуктопроводов [Текст] / Н. К. Кострюкова, О. М. Кострюков // Геомеханика в горном деле – 2000 : докл. Интернационал. конф. – Екатеринбург, ИГД УрО РАН, 2000. – С. 295–305.

40 Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия [Текст]. – М.: Роскомэкология, 1992. – 109с.

41 Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород [Текст] / Ю. О. Кузьмин, В. С. Жуков.– М.: МГУ, 2004. – 262 с.

42 Кузьмин, Ю. О. Геодинамические полигоны - эффективный инструмент эколого-промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса [Текст] / Ю. О. Кузьмин // Гео-Сибирь: IV Междунар. науч. конгр., 22-24 апр. 2008 г.: сб. материалов. – Новосибирск: СГГА, 2008.–258 с.

43 Кузьмин, Ю. О. Тектонофизические основы идентификации геодинамической опасности нефтегазовых объектов [Электронный ресурс] / Ю. О. Кузьмин // Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. –URL.– Режим доступа : oilgasjournal.ru/vol_3/kuzmin.pdf.

44 Кузьмин, Ю. О. Актуальные проблемы оценки геодинамической опасности объектов нефтегазового комплекса [Текст] / Ю. О. Кузьмин // Современная геодинамика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса : материалы Всерос. конф. – М.: ТиРу, 2013. – С. 100 – 113.

45 Современные движения земной коры на Камчатке и их связь с сейсмической и вулканической активностью. Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки [Текст] / В. Е. Левин, М. А., Магуськин, В. Ф. Бахтияров и др. // К 25-летию Камчатской опытно методической сейсмологической партии.– Петропавловск-Камчатский: КПД, 2004– С. 113–135.

46 Маловичко, А. К. Гравиразведка [Текст] / А. К. Маловичко, В. И. Костицын. – М.: Недра, 1992. – 357 с.

47 Миронов, В. С. Курс гравиразведки [Текст] / В. С. Миронов.– 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1980. – 543 с.

48 Нестеренко, Ю. М. Влияние добычи углеводородов на геофизические процессы и сейсмичность в нефтегазоносном Южном Предуралье [Электронный ресурс] / Ю. М. Нестеренко, М. Ю. Нестеренко // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН.– 2012.– № 1.– Режим доступа : on-line версия на сайте <http://www.elmag.uran.ru>.

49 Панжин, А. А. Непрерывный мониторинг смещений и деформаций земной поверхности с применением комплексов спутниковой геодезии GPS [Текст] / А. А. Панжин // Геомеханика в горном деле - 2000: материалы интернационал. конф. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН. – 2000. – С. 320–324.

50 Панжин, А. А. Диагностика геомеханического состояния массива горных пород геодезическими методами [Текст] / А. А. Панжин // Геология и геоэкология: исследования молодых, 2002 г. : материалы XIII молодежной конф., посвящ. памяти К.О. Кратца. – Апатиты, 2002. – Т. 2. – С.159–167.

51 Панжин, А. А. GPS-технологии в геодезическом мониторинге НДС техногенного участка [Текст] / А. А. Панжин // Геомеханика в горном деле /ИГД УрО РАН: сб. науч. тр.– Екатеринбург, 1999. – С.68–85.

52 Панжис, А. А. Наблюдение за сдвижением земной поверхности на горных предприятиях с внедрением GPS [Текст] / А. А. Панжис // Известия Уральской государственной горно-геологической академии. Сер. Горное Дело. – Екатеринбург, 2000. – Вып. 11. – С.196–203.

53 Плотникова, И. Н. Геолого-геофизические и геохимические предпосылки перспектив нефтегазоносности кристаллического фундамента Татарстана [Текст] / И. Н. Плотникова. – СПб.: Недра, 2004. – 172 с.

54 Покровский, Н. С. Прогнозирование латеральных изменений скорости по результатам комплексной интерпретации гравиразведки и сейсморазведки [Текст] / Н. С. Покровский // Разведочная геофизика: экспресс информация. ВИЭМС, 1987. – С. 20–26.

55 Современные проблемы спутникового геодезического обеспечения геолого-геофизических исследований / А. А. Пыстин и др. // Геофизика. – 1999. – № 5. – С. 54–58.

56 РД 07 – 603 – 03- 2003. Инструкция по производству маркшейдерских работ [Текст]. – М., 2003.

57 РД 07 – 309 – 99. Положение о порядке выдачи разрешений на застройку площадей залегания полезных ископаемых [Текст]. – М., 1999.

58 РД 07 – 408 – 01- 2001. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр [Текст].– М., 2001.

59 Руководство по геодинамическим наблюдениям и исследованиям для объектов топливно-энергетического комплекса [Текст].– М.,1997.– 123 с.

60 Сашурин, А. Д. Современная геодинамика и техногенные катастрофы [Электронный ресурс] / А. Д. Сашурин. – Режим доступа : http://igd.uran.ru/geomech/artikles/sad_005/index.htm.

61 Сидоров, В. А. Концепция. Геодинамическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России [Текст] / В. А. Сидоров, Ю. О. Кузьмин, В. М. Хитров; Минэнерго РФ.– М.: ИГиРГИ, 2000.– 56 с.

62 Современный толковый словарь [Текст].– М.: Большая Советская Энциклопедия.

63 СП 11 – 104 – 97. Инженерно-строительные изыскания для строительства [Текст].–М., 1998 .

64 Трусов, А. А. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей [Текст] / А. А. Трусов // 29-й Междунар. науч. семинар им. Д. Г. Успенского / ИГ УрО РАН.– Екатеринбург, 2002.– С.302–306.

65 Федянин, А. П. Опыт применения высокоточной гравиразведки при поисках бокситов в районе Енисейского кряжа [Текст] / А. П. Федянин, А. И. Каленицкий, А. Ф. Кривчиков // Вопросы рудной геофизики Сибири: тр. СНИИГГиМСа, 1968.– С. 86–90.

66 Теоретические обоснование геодезическо-гравиметрического мониторинга локальной техногенной геодинамики и деформаций: отчет о НИР / Ю. П. Гуляев, А. И. Каленицкий, Е. А. Васильев, К. В. Вареник; Фонды ВКГ, СГГА.– М.; Новосибирск, 1999.– № ГР 0198.0009389 ВКГ ОКП.

67 Отчет о гравиразведочных работах на Южно-Иусском участке с целью прогноза перспективности структур, подготовленных сейсморазведкой (отчет по договорной теме 08.04.2080д) / А. И. Каленицкий, Р. Э. Меникес, В. П. Дедов,

А. Е. Блюм, А. П. Федянин ; Фонды СибАГП ГУГК СССР, Новосибирск, ТГФ, ПО «Тюменьгеофизика», ПО «Уралнефтегаз». – М.; Новосибирск; Тюмень, 1991.

68 Разработка проектной документации на создание системы наблюдений (геодинамического мониторинга) за Оренбургским НГКМ с учетом анализа накопленных данных измерений вертикальных сдвижений земной поверхности с начала разработки месторождения (договор № 2008/190) : отчет .– ПГТУ, 2009.– 168 с.

69 Предварительный прогноз деформированного состояния горного массива и земной поверхности и разработка рекомендаций по мониторингу деформационных процессов при дальнейшей отработке Уренгойского НГКМ : отчет о НИР. Фонды ООО «Уренгойгазпром». – Новый Уренгой, 2002. – 163с.

70 Ященко, В. Р. Геодезия и извечные тайны движения земной коры [Текст] / В. Р. Ященко, Х. К. Ямбаев // Геопрофи.– 2006.– № 4.– С.61–66.

71 Ketelaar V.B.H. Satellite radar Interferometry. Subsidence monitoring Techniques. Delft University of technology, the Netherlands. 2009. – 241 pp.

72 Kinematic GPS Positioning of Geophysical Surveys: Gravity Survey of Ft. Berthold Indian Reservation, North Dakota / M. Balde, C.L. K.Aiken, J. Hare, W.D. Gosnold, S. Cates // SEG Expanded Abstracts, 1992. P. 585–588.

73 LaFehr T. R. Standardization in gravity reduction / T.R.LaFehr // Geophysics, 1991, v. 56, П.8.-P. 1170-1178.