

На правах рукописи



ВОЛКОВ Никита Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
РЕШЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ЗАДАЧ НА ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ
НЕФТЕГАЗОВЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 25.00.32 – Геодезия

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС) и в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Брынь Михаил Ярославович

Официальные оппоненты:

Мазуров Борис Тимофеевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор

Симонян Владимир Викторович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» кафедра инженерной геодезии, доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 23 апреля 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 февраля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

КУЗИН
Александр Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение интенсивности долговременной добычи углеводородов и усложнение технологических процессов на нефтегазовых объектах при значительном увеличении размеров территорий месторождений отразились в виде проблем, относящимся к маркшейдерско-геодезическим наблюдениям, выполняемым на геодинамических полигонах (ГДП) нефтегазовых месторождений (НГМ). Результаты геодезических наблюдений, выполняемых на созданных ГДП, должны обеспечить решение геомеханических, геодинамических и маркшейдерско-геодезических задач путем отдельного определения пространственно-временных параметров деформаций земной поверхности, горных массивов и коллекторов.

На современном этапе основным методом определения количественных характеристик геомеханических и геодинамических деформационных процессов на ГДП является повторное высокоточное нивелирование, которое обладает наряду с громоздкостью и значительной трудоемкостью, высокой приборной точностью. При этом точность повторного нивелирования зависит от протяженности линий нивелирования и устойчивости опорных и контрольных нивелирных пунктов к воздействиям экзогенных геомеханических процессов природного и техногенного происхождения. Присущие повторному нивелированию недостатки не позволяют эффективно решать поставленные маркшейдерско-геодезические задачи на ГДП НГМ, большинство из которых расположены в труднодоступных районах Западной Сибири и Крайнего Севера на труднопроходимых и неблагоприятных для повторного высокоточного нивелирования значительных по размерам территориях.

Существующий нормативно-детерминистский подход к постановке повторных геодезических наблюдений на техногенных ГДП предусматривает проложение линий повторного нивелирования, пересекающих многократно вдоль и вкрест значительные по размерам территории месторождений. Закрепление линий нивелирования осуществляется типовыми нивелирными пунктами без учета влияния на их устойчивость многочисленных экзогенных факторов. Такая постановка повторного нивелирования на ГДП НГМ не позволяет оценить точность, репрезентативность и релевантность результатов

повторного нивелирования, что исключает возможность обеспечения надежного решения поставленных задач.

Дальнейший прогресс в области геодезических наблюдений на ГДП НГМ за деформационными процессами связан с необходимостью совершенствования их методов, разработкой научно обоснованных теоретических основ постановки повторного высокоточного нивелирования и их практической реализацией. Разрабатываемые методы, в отличие от традиционных, должны основываться на развернутой комплексной программе с четко намеченными целями и вытекающими из них задачами по выработке конкурирующих мер и средств, обеспечивающих контроль требуемого уровня точности, значимости и репрезентативности результатов повторного нивелирования на всех стадиях его постановки.

Все изложенное выше, а также необходимость повышения эффективности получаемых результатов, обусловили актуальность данной работы, связанную с разработкой современных подходов к постановке повторного нивелирования на ГДП НГМ и решении проблемы влияния экзогенных факторов на его результаты.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие и совершенствование геодезических методов изучения деформационных процессов на ГДП внесли отечественные ученые, такие, как Буланже Ю.Д., Волков В.И., Герасименко М.Д., Каленецкий А.И., Кафтан В.И., Колмогоров В.Г., Кузьмин Ю.О., Магуськин М.А., Мазуров Б.Т., Панжин А.А., Панкрушин В.К., Певнев А.К., Шестаков Н.В., Ямбаев Х.К. и др., а также зарубежные ученые: Bluntzer L., Hoggerl N., Holzer T., Viscocil P., Yerkes R. и др.

Результаты выполненных большинством ученых исследований показывают, что основным препятствием на пути повышения эффективности результатов повторных геодезических наблюдений является наличие в них компонентов различной природы, осложняющих их интерпретацию. При этом отсутствуют методы и средства повторных геодезических наблюдений, позволяющие достигнуть требуемой точности и репрезентативности результатов, полученных на ГДП НГМ.

Цель исследований. Совершенствование геодезических методов решения геомеханических и геодинамических задач на подрабатываемых территориях нефтегазовых комплексов на базе постановки повторного нивелирования с учетом пространственно-

временной структуры измеряемых величин деформаций и разработок новых подходов к организации геодезических работ, методов и средств геодезических наблюдений, обеспечивающих выполнение требований к точности, репрезентативности и значимости результатов.

Идея работы – при постановке повторного нивелирования на ГДП НГМ увязывать процесс обоснования проектных решений по длинам линий, периодичности, точности и продолжительности нивелирования с выработкой мер и обоснованием средств, обеспечивающих требуемую точность и репрезентативность результатов повторного нивелирования.

Основные задачи исследований:

1. Анализ существующего опыта изучения геомеханических и геодинамических процессов геодезическими методами на месторождениях углеводородов;

2. Совершенствование методов постановки повторного нивелирования на ГДП месторождений углеводородов;

3. Разработка алгоритма площадного интерполирования скоростей вертикальных смещений земной поверхности, установленных по результатам повторного нивелирования государственной высотной основы;

4. Разработка математических моделей воздействий геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов;

5. Исследование механизма влияния морозного пучения сезонно промерзающих и вечномёрзлых грунтов на устойчивость нивелирных пунктов;

6. Разработка и совершенствование методов исключения воздействия геотемпературного поля и морозного пучения на устойчивость нивелирных пунктов;

7. Разработка методов оценки значимости результатов повторного нивелирования, выполняемых на геодинамических полигонах.

Научная новизна:

1. Разработаны методы повышения точности, значимости и репрезентативности результатов выполняемого на ГДП НГМ повторного нивелирования, основанные на программно-целевом подходе организации повторных геодезических наблюдений;

2. Разработаны и реализованы методы постановки повторных геодезических наблюдений, выполняемых на ГДП НГМ, основанные на анализе соотношения параметров повторного нивелирования;

3. Предложены совершенствования методов геодезических исследований деформационных процессов, учитывающие математические, геомеханические и геодинамические аспекты определяемых на ГДП количественных деформационных показателей, способствующие повышению точности, репрезентативности и практической значимости результатов повторного нивелирования;

4. Разработаны методы оценки значимости результатов повторного нивелирования, позволяющие повысить точность и практическое значение полученных результатов повторных геодезических наблюдений;

5. На основе физико-математического моделирования влияний геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов, построенного на положениях математической физики, разработаны алгоритм оценки и учета влияния температурных деформаций для условий закрытого гидротермического режима. Разработан способ учета, основанный на измерениях интегральной температуры конструктивных элементов нивелирных пунктов;

6. На основе исследования механизма воздействия морозного пучения сезонно промерзающих и многолетнемерзлых грунтов, разработаны методы для расчета конструктивных элементов и глубин закладки устойчивых к морозному пучению нивелирных пунктов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке теоретических основ повторного нивелирования и оценке влияния повсеместно распространенных природных экзогенных факторов на устойчивость нивелирных пунктов, применение которых позволяет создавать научно обоснованную базу для организации геодинамических полигонов на нефтегазовых месторождениях.

Практическая значимость работы заключается в том, что усовершенствованные методы повторного нивелирования и оценки устойчивости нивелирных пунктов дают возможность для разработки технических проектов повторных геодезических наблюдений, обосновывающие оперативное получение количественных характеристик техногенных и геодинамических процессов, протекающих на разрабатываемых ГДП НГМ.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационных исследований использовались: теория ошибок измерений, программно-целевой метод, методы математического

моделирования с использованием элементов математической физики, структурно-генетический анализ и синтез методов реализации результатов измерений, а также экспериментальный метод.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные методы создания локальных и точечных систем повторного высокоточного нивелирования на ГДП НГМ обеспечивают, при значительном сокращении объемов повторного нивелирования, раздельное определение значимых с позиций точности и репрезентативности величин скоростей вертикальных деформаций земной поверхности, коллекторов и залегающих над ними горных массивов.

2. Постановка и решение задач количественного прогнозирования и учета сезонных тепловых деформаций приповерхностных слоев земной коры и закладываемых в них нивелирных пунктов, повышают точность повторного нивелирования.

3. Размещение опорных нивелирных пунктов вне интегрального контура добычи углеводородов по вертикали, исключаящее влияние на их устойчивость процессов, связанных с изучаемым фактором – отработкой залежей углеводородов, совместно с расчётом конструктивных элементов и глубин закладки контрольных нивелирных пунктов, устойчивых к морозному пучению, повышают точность и репрезентативность повторного нивелирования.

Достоверность и обоснованность научных положений и разработок обеспечена обоснованностью применения методов исследования и подтверждением результатов теоретических исследований экспериментальными данными, полученными на геодинамическом полигоне Ямбургского нефтегазового месторождения.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедре «Инженерная геодезия» ФГБОУ ВО ПГУПС, научных конференциях различного уровня, в числе которых: международных конференциях «РИ-2016» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), «Наука настоящего и будущего» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), «Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра» (г. Казань, 2018 г.), на «69-й и 70-й международных научно-технических конференциях молодых ученых» (г. Санкт-Петербург, 2016-2018 гг.), на производственных совещаниях маркшейдеров ОАО «Газпром Нефть»,

на заседаниях научно-технических советов ООО «Научно-Производственное Объединение «Энергогазизыскания».

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 7 научных статьях, из них 5 – в периодических научных изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 1 – в издании, индексированном международной базой Scopus.

Внедрение. Усовершенствованы методы построения систем повторного нивелирования на ГДП НГМ, внедрены в «ООО «НПО «Энергогазизыскания» (акт внедрения № 018/77–3 от 05.09.2018)

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 111 страницах и включает введение, четыре главы, заключение и список использованной литературы из 119 наименований, в числе которых 18 на английском языке, двух приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационных исследований, формулируются цели и задачи этих исследований, их научная новизна, практическая и теоретическая значимость, а также представляются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ опыта изучения деформационных процессов геодезическими методами на ГДП НГМ, нормативно-методических документов, научно-технических литературных источников, раскрывающих современное состояние решения геодинамических и геомеханических задач геодезическими методами. Проведен анализ существующих подходов к постановке и проведению повторного нивелирования на ГДП НГМ. В главе дана характеристика полученных на ГДП за последние десятилетия результатов повторного высокоточного нивелирования, показавших сложно дифференцированный, неоднородный в пространстве и во времени, часто колебательный, короткопериодический характер вертикальных смещений земной поверхности (ВСЗП), которые невозможно объяснить с позиций современной геодинамики и геомеханики. Обоснована необходимость решения проблемы влияния экзогенных процессов на устойчивость нивелирных пунктов наряду с разработкой на уровне теоретических основ постановки ПВН на ГДП НГМ.

Во второй главе разработаны теоретические основы и технологии постановки ПВН в создаваемых на ГДП НГМ системах наблюдений,

сущностью которого является комплексный анализ, постановка целей, выработка мер и обоснование средств, обеспечивающих повышение и контроль точности и репрезентативности результатов повторного нивелирования на всех стадиях его постановки. Представлен новый подход к размещению опорных нивелирных пунктов взамен размещению их за границей горного отвода. Рассмотрены пространственно-временные аспекты постановки повторного нивелирования на ГДП НГМ. Подробно изложены разработанные процессы алгоритмизации повторного высокоточного нивелирования и методы оценки значимости его результатов.

В третьей главе представлены разработанные физико-математические модели воздействий геотемпературного поля на устойчивость НП и способы учета температурных деформаций глубинных НП, основанные на измерении интегральных температур их конструктивных элементов. Приведены результаты исследования механизмов и разработанные на их основе способы исключения воздействий морозного пучения на устойчивость нивелирных пунктов в различных климатических условиях.

В четвертой главе дана характеристика полученных результатов диссертационных исследований и определена область их практической реализации. Приведены результаты экспериментальных исследований, описано внедрение результатов диссертационных исследований в практику наблюдения за деформационными процессами на разрабатываемом НГМ. Проанализированы результаты практической реализации и дана оценка их значимости.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанные методы создания локальных и точечных систем повторного высокоточного нивелирования на ГДП НГМ обеспечивают, при значительном сокращении объемов повторного нивелирования, отдельное определение значимых с позиций точности и репрезентативности величин скоростей вертикальных деформаций земной поверхности, коллекторов и залегающих над ними горных массивов.

Подход к постановке повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ остается неизменным на протяжении последних ста лет по причине отсутствия в геодезии научно-обоснованного подхода к проектированию повторного высокоточного нивелирования, который радикально отличается от проектирования государственного нивелирования I и II классов, необоснованно принимающегося за основу.

Для проектирования повторного высокоточного нивелирования был разработан математический аппарат, синтезирующий его параметры с позиций программно-целевого метода.

Так, средняя квадратическая ошибка (СКО) определения скорости v вертикальных сдвижений земной поверхности регламентируется неравенством:

$$v = \frac{\Delta H}{T} > \varepsilon m_v = 4m_v \text{ или } m_v < 0,25v, \quad (1)$$

где ΔH - изменение высоты нивелирного пункта за интервал времени T между циклами повторного высокоточного нивелирования; εm_v - произведение, характеризующее доверительный интервал $(-t_\beta m_v; t_\beta m_v)$, ширина которого при $\beta = 0,955$ и $t_\beta = 2$, принимаемых при проведении геодезических работ на ГДП НГМ, равна $2t_\beta m_v = 4m_v$.

Предельная СКО m_v имеет аналитическую зависимость от СКО нивелирования на 1 км хода M (регламентируется Инструкцией по нивелированию I, II, III и IV классов, далее «Инструкцией»), длины нивелирного хода L (км) и периодичности T (год):

$$m_{v, \text{пред}} = \frac{1}{T} M \sqrt{2L}. \quad (2)$$

С учетом (1) и (2), получена формула для предрасчета требуемой точности нивелирования в циклах с учетом прогнозного значения определяемой скорости $v_{\text{прогн}}$:

$$M = \frac{m_{v, \text{пред}} T}{\sqrt{2L}} < T \frac{v_{\text{прогн}}}{4\sqrt{2L}} = \frac{T v_{\text{прогн}}}{\sqrt{32L}}. \quad (3)$$

В таблице 1 приведены значения допустимых СКО нивелирования M (мм/км), выполняемого повторно через $T = 1$ год и $T = 0,5$ года.

Значения допустимых СКО нивелирования в циклах (таблица 1) значительно меньше установленных «Инструкцией» значений СКО для нивелирования I и II классов соответственно ($M \leq 0,8$ мм/км; $M \leq 2$ мм/км), что подлежит учету при проектировании ПВН.

При геодезическом контроле за непрерывно протекающими деформационными процессами на ГДП НГМ устанавливается, исходя из (2), лимит времени Δ_τ на продолжительность нивелирования в циклах:

$$v_{\text{прогн}} \Delta_\tau < M \sqrt{2L} \text{ или } \Delta_\tau < \frac{M \sqrt{2L}}{v_{\text{прогн}}}, \quad (4)$$

соблюдение условий (4) позволяет исключить накопление ошибок, вызванных смещением костылей и нивелирных пунктов.

Периодичность повторного нивелирования с учетом аналитического выражения (1) и (2) устанавливается согласно неравенству:

$$T > \frac{M\sqrt{2L}}{v_{\text{прогн}}/4} = \frac{4M\sqrt{2L}}{v_{\text{прогн}}} = \frac{4m_{\text{ст}}\sqrt{2n}}{v_{\text{прогн}}}, \quad (5)$$

где $m_{\text{ст}}$ - СКО определения превышения на станции, n – количество станций.

Для установления прогнозной региональной составляющей скорости $v_{\text{прогн}}$ СВДЗК на район заложения ГДП НГМ разработан алгоритм интерполирования имеющихся для государственной нивелирной сети значений скоростей с оценкой точности площадного интерполирования.

Из выражения (3), регламентирующего точность повторного нивелирования, следует, что при установленных значениях $v_{\text{прогн}}$ и периодичности T , длины линий регламентируются неравенством:

$$L_{\text{доп}} \leq \frac{v_{\text{прогн}}^2 T^2}{32M^2}, \quad (6)$$

синтезирующее пространственные, точностные и временные параметры ПВН, которые увязываются с прогнозными величинами измеряемых скоростей.

Так, скорости вертикальных смещений земной поверхности $v_{\text{прогн}} = 5$ мм/год на ГДП НГМ по результатам повторного нивелирования I класса ($M = 0,8$ мм/км) и II класса ($M = 2$ мм/км) определяются с вероятностью $\beta = 0,955$ при длинах линий нивелирования:

$$\text{I класс: } L_{\text{доп}} \leq \frac{25 \cdot 1}{32 \cdot 0,64} = 1,22 \text{ км; II класс: } L_{\text{доп}} \leq \frac{25 \cdot 1}{32 \cdot 4} = 0,20 \text{ км,}$$

что противоречит «Инструкции» в части рекомендаций по длинам линий повторного нивелирования 40 км (I класс) и 20 км (II класс) и их секций 3-4 км.

Из аналитического выражения (6) следует, что на стадии проектирования и по полученным в циклах СКО измерений можно определить значимость установленных скоростей:

$$v_{\text{зн}} \geq \frac{M\sqrt{32L}}{T} \text{ и } v_{\text{зн}} \geq \frac{\sqrt{32L(\eta_i^2 + \eta_j^2)}}{T}, \quad (7)$$

где $\eta_i^2 = \frac{1}{4n} \left[\frac{d^2}{r} \right]$ - случайные СКО, полученные в i -ом цикле наблюдений; $d = h_{\text{пр}} - h_{\text{обр}}$ - разность превышений полученных в n секциях в прямых и обратных ходах; r - длины секций.

В таблице 2 приведены величины значимых скоростей вертикальных смещений земной поверхности, которые учитываются при проектировании повторного нивелирования I и II классов.

Из анализа таблицы 2 вытекает, что если следовать рекомендациям «Инструкции» по постановке повторного нивелирования на ГДП НГМ Западной Сибири ($v_{\text{прогн}} = 5$ мм/год), то значимые величины скоростей вертикальных смещений земной поверхности могут быть получены по результатам повторного нивелирования I и II классов, выполняемого с периодичностью более 6 и 10 лет соответственно.

Приведенные результаты исследований показывают, что при вычислении по результатам повторного нивелирования скоростей вертикальных смещений земной поверхности следует оценивать их значимость по формулам (7).

2. Постановка и решение задач количественного прогнозирования и учета сезонных тепловых деформаций приповерхностных слоев земной коры и закладываемых в них нивелирных пунктов, повышают точность повторного нивелирования.

Общеизвестная зависимость точности результатов повторного нивелирования от ошибок за нарушение устойчивости нивелирных пунктов составляет основу нерешенной фундаментальной проблемы влияния экзогенных факторов на результаты повторного нивелирования. Основу проблемы составляет исключение из установленных геодезическими методами смещений нивелирных пунктов составляющих, не имеющих отношения к изучаемым деформационным процессам.

Точность определения вертикальных смещений ΔH определяется ошибками нивелирования $m_{\text{нив}}$ и ошибками, обусловленными нарушениями устойчивости опорных $m_{\text{исх}}$ и контрольных $m_{\text{контр}}$ нивелирных пунктов. При этом должно соблюдаться условие:

$$m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{контр}}^2 \leq m_{\text{нив}}^2. \quad (8)$$

Применяя принцип равного влияния источников ошибок повторного нивелирования $m_{\text{исх}} = m_{\text{контр}} = m_{\text{дест}}$, с учетом формул (5) и (7) получено аналитическое выражение для предельно допустимых ошибок, обусловленных дестабилизацией нивелирных пунктов на ГДП:

$$m_{\text{дест}} \leq \frac{v_{\text{прогн}} T}{\sqrt{32}}. \quad (9)$$

На ГДП Западной Сибири, для которых характерна $v_{\text{прогн}} = 5$ мм/год, с учетом формулы (9), могут быть установлены сдвиги земной поверхности при соблюдении условия устойчивости: $m_{\text{дест}} \leq 0,9$ мм.

Выполненная в диссертации систематизация экзогенных факторов выявила 15 экзогенных геомеханических процессов, нарушающих устойчивость НП в виде их вертикальных смещений: просадок от 1 дц/год до 1 м/год, выпучивания со скоростью до 25 см/год и колебательное изменение высот с амплитудой 12 мм/год и более.

Одним из повсеместно распространенных, малоизученных экзогенных факторов, влияющих на устойчивость нивелирных пунктов является переменное на протяжении года, неоднородное по параметрам геотемпературное поле. Такое поле вызывает сложнодифференцированные температурные деформации нивелирных пунктов и горных пород, составляющих их основания.

Сезонные колебания температуры достигают глубин 12-25 м, а порождаемые ими деформации пород распространяются значительно глубже, что подтверждается геофизическими данными.

Температура на земной поверхности изменяется по закону

$$t(\tau, 0) = \Delta t_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau\right),$$

где ΔT и Δt_0 - период и амплитуда колебаний

температуры t на земной поверхности; τ - время; z - глубина закладки

нивелирного пункта; $K = \sqrt{\frac{\pi}{a\Delta T}}$ - коэффициент затухания колебаний

температуры; a - температуропроводность залегающей породы.

Для учета вертикальных смещений марок (δH_t) грунтовых, глубинных и скальных нивелирных пунктов, порождаемых

температурными деформациями нивелирных пунктов и горных пород (ΔH_t), составляющих их основания, получены рабочие формулы:

$$\delta H_t = \Delta t_0 \sqrt{\frac{a\Delta T}{2\pi}} \cdot \left[(\alpha_{ст} - \alpha_{гп}) e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{a\Delta T}}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - z\sqrt{\frac{\pi}{a\Delta T}} - \frac{\pi}{4}\right) - \alpha_{ст} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\Delta T} \tau - \frac{\pi}{4}\right) \right]; \quad (10)$$

$$\Delta H_t = \alpha \Delta t_0 \sqrt{\frac{a\Delta T}{2\pi}} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2\pi}{\Delta T} \tau\right) \right], \quad (11)$$

где $\alpha_{ст}$ и $\alpha_{гп}$ - коэффициенты теплового линейного расширения стали и горных пород.

В природе теплофизические параметры изменяются в пределах: a (m^2/c) от 10^{-5} до 10^{-7} и α ($1/^\circ C$) от 10^{-4} до 10^{-6} , что при закрытом гидротермическом режиме, согласно (10) и (11), приводит к вертикальным смещениям грунтовых (глубинных) нивелирных пунктов $\delta H_t = (0,5 \div 4,1)$ мм и скальных марок $\Delta H_t = (0,4 \div 39)$ мм, что подтверждается результатами экспериментальных наблюдений на Криворожском, Донбасском, Баскунчакском, Лишовском и других ГДП.

Для учета температурных деформаций нивелирных пунктов δH_t , закладываемых в условиях открытого и закрытого гидротермических режимов разработан способ учета, основанный на измерении интегральной температуры нивелирных пунктов:

$$\delta H_t = \alpha_{ст} \cdot \int_0^z t(\tau, z) dz. \quad (12)$$

При этом используется температурный датчик сопротивления (медный провод), разнесенный по всей длине нивелирного пункта. Измеренные сопротивления медного провода, наклеенного на реперную трубу, позволяют получать интегральную температуру и ее изменения в разных циклах на основе изменений сопротивления, а, следовательно, и вертикальные смещения нивелирного пункта, а именно:

$$\Delta H_t = \alpha_{ст} z (t_{u,i} - t_{u,i-1}), \quad (13)$$

где $t_{u,i}$ - значение интегральной температуры реперной трубы длиной z' в i -ом цикле повторного нивелирования, измеренное при помощи формул (12) и (13).

3. Размещение опорных нивелирных пунктов вне интегрального контура добычи углеводородов по вертикали, исключаящее влияние на их устойчивость процессов, связанных с изучаемым фактором – обработкой залежей углеводородов, совместно с расчётом конструктивных элементов и глубин закладки контрольных нивелирных пунктов, устойчивых к морозному пучению, повышают точность и репрезентативность повторного нивелирования.

Сезонное промерзание грунтов, залегающих над грунтовыми водами, приводит к их пучению и выпучиванию типовых грунтовых нивелирных пунктов со скоростью до 250 мм/год. В диссертации разработаны методы для расчета конструктивных элементов и глубин закладок, широко используемых на ГДП грунтовых нивелирных пунктов Тип 162, устойчивых к морозному пучению.

Устойчивость грунтовых нивелирных пунктов Тип 162 в условиях сезонного промерзания грунтов и воздействий сил морозного пучения $P_{\text{п}}$ обеспечивается соблюдением условия: $P_{\text{уд}} \geq P_{\text{п}} \times K_{\text{н}}$, где $P_{\text{уд}}$ - удерживающая сила, а $K_{\text{н}}$ - коэффициент надежности (СП 24.13330.2011). Удерживающая сила состоит из реактивной силы R , силы сопротивления грунтов сдвигу $F_{\text{тр}}$, веса нивелирного пункта $G_{\text{рп}}$ веса слоя грунта над якорем $G_{\text{гр}}$:

$$P_{\text{п}} \leq \frac{P_{\text{уд}}}{K_{\text{н}}} = \frac{1}{K_{\text{н}}} (R + F_{\text{тр}} + G_{\text{рп}} + G_{\text{гр}}) \quad (14)$$

Для нивелирного пункта Тип 162 (рис. 1) соблюдается условие устойчивости к морозному пучению (14), при глубине закладки z и параметрах конструктивных элементов (радиусы якоря $r_{\text{як}}$ и реперной трубы $r_{\text{тр}}$), назначенных на основе теоретических расчетов, учитывающих соотношение сил $P_{\text{п}}$ и $P_{\text{уд}}$ по полученному в соответствии с (14) аналитическому выражению:

$$2,4\pi P_{\text{уп}} r_{\text{тр}} f \leq \frac{\pi P_{\text{уп}}}{f} \left[r_{\text{як}}^2 \left(\frac{r_{\text{як}}}{3} - r_{\text{тр}} \right) + (f - r_{\text{як}})(r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2) - \frac{r_{\text{тр}}^3}{3} - \frac{r_{\text{тр}}^2 f}{2} \right] + \pi(r_{\text{як}}^2 - r_{\text{тр}}^2)\gamma + G_{\text{рп}} + 2\pi r_{\text{тр}} f_i R_i, \quad (15)$$

где $P_{\text{уп}}$ - удельная сила морозного пучения (СП 24.13330.2011), γ - плотность грунта, f_i - толщина грунта между якорем и границей его промерзания (рис. 1); R_i - расчетное сопротивление грунта сдвигу по боковой поверхности реперной трубы (СП 24.13330.2011).

Из решения кубического неравенства (15) определяются параметры конструктивных элементов и глубина их закладки для нивелирного пункта Тип 162. Пример расчета показан для двух нивелирных пунктов (НП №1 и НП №2).

Условия закладки НП №1: $f = 1,2$ м (глубина промерзания), $P_{\text{уп}} = 11$ Н/см², $R_i = 0,147$ Н/см², $\gamma = 2750$ кг/м³ (сильно пучинистая глина), $\gamma_{\text{бетон}} = 2400$ кг/м³, $\gamma_{\text{ст}} = 8000$ кг/м³, $z_{\text{инстр}} = 2350$ мм, $r_{\text{инст,як}} = 240$ мм, $r_{\text{инст,тр}} = 30$ мм.

Расчеты по предложенной автором формуле (15) показали, что для НП №1 Тип 162, глубина закладки должна составлять $z_{\text{расч}} = 3300$ мм. В данных инженерно-геологических и климатических условиях НП Тип 162, является неустойчивым к морозному пучению.

Условия закладки НП №2: $f = 1,2$ м, $P_{\text{уп}} = 7$ Н/см², $R_i = 0,079$ Н/см², $\gamma = 2700$ кг/м³ (суглинок). Для НП, заложенного в суглинках, нормативная глубина $z_{\text{инстр}} = 2350$ мм равнялась расчетной величине $z_{\text{расч}} = 2300$ мм, что обеспечивает устойчивость НП №2 к воздействиям морозного пучения.

Исследования показали, что устойчивость трубчатых НП (Тип 150 и др.) в условиях вечной мерзлоты обеспечивается соблюдением условия:

$$P_{\text{п}} < P_{\text{см}}, \quad (16)$$

где $P_{\text{п}} = 2P_{\text{уп}}\pi f$ и $P_{\text{уп}}$ - касательная и удельная сила морозного пучения, выталкивающая НП; f - глубина промерзания; $P_{\text{см}} = 2P_{\text{усм}}\pi r z' P_{\text{см}}$ и

$P_{\text{усм}}$ - удерживающая и удельная сила смерзания нивелирного пункта с вечномерзлым грунтом (рис. 2); z' - заглубление НП в вечномерзлый грунт; r - радиус реперной трубы.

В соответствии с (16) получены формулы для определения величины заглубления НП в вечномерзлый грунт и глубины закладки НП с учетом коэффициента запаса 1,4 (СП 24.13330.2011):

$$z' \geq 1,4f \frac{P_{\text{уп}}}{P_{\text{усм}}} \text{ и } z \geq f \left(1 + 1,4 \frac{P_{\text{уп}}}{P_{\text{усм}}} \right). \quad (17)$$

Экспериментально подтверждено, что НП Тип 150, рекомендуемые «Инструкцией» ($z' = 2-3$ м) для вечномерзлых грунтов в условиях ЯНАО подвергаются выпучиванию, а НП Тип 150 при заглублении $z' \geq 4$ м, рассчитанному согласно (17), устойчивы к морозному пучению. Таким образом, нормативное заглубление нивелирных пунктов в вечномерзлые грунты не обеспечивает их устойчивость.

Полученные в диссертации результаты исследований применены при создании геодезических наблюдательных систем, обработке и интерпретации результатов трехкратного повторного нивелирования на одном из крупнейших в мире НГМ - Ямбургском НГКМ, расположенного на площади 8200 км² в зоне Западносибирской тундры. На территории Ямбургского НГКМ для решения геомеханических и геодинамических задач создана сеть, состоящая из 17 контрольных площадок (КП), 2 профильных линий (ПЛ) и 4 геодинамических профилей (ГП). Каждая из наблюдательных систем закреплена опорными и контрольными нивелирными пунктами. Опорные нивелирные пункты размещены вне интегрального контура добычи газа по вертикали. Для контроля смещений земной поверхности на 17 КП на удалении 100 м от опорного нивелирного пункта заложены на глубину z не менее 2-х контрольных грунтовых нивелирных пунктов Тип 150. Контроль за вертикальными смещениями земной поверхности и деформациями пластовых коллекторов осуществляется на 2 профильных линиях – линиях повторного нивелирования I класса, разбитых на секции 0,3 - 0,5 км, закрепленных опорными, контрольными грунтовыми нивелирными пунктами и реперами-скважинами, забой основания которых расположен соответственно под и над коллекторами. Контроль современной геодинамики осуществляется на 4 геодинамических

профилях, разбитых на секции по 0,5 км, закрепляемых грунтовыми контрольными нивелирными пунктами Тип 150 и на концах реперами-скважинами попарно с грунтовыми опорными нивелирными пунктами.

ГП пересекают зоны глубинных разломов и динамически напряженные зоны (рис. 3) Прогнозные значения СВДЗК приняты равными скорости 5 мм/год и 10 мм/год. Точность нивелирования в циклах, периодичность ПВН и требования к устойчивости нивелирных пунктов установлены согласно выражениям (3), (5), (6) и (9).

В 2015-2017 гг. в наблюдательных сетях выполнено 3 цикла нивелирования I класса ($T = 1 \text{ год} \pm 0,04 \text{ года}$), характеризуемого точностью: на контрольных площадках $m_{\text{ст}} \leq 0,1 \text{ мм}$, на профильных линиях $M \leq 0,18 \text{ мм/км}$ и на геодинамических профилях $M \leq 0,55 \text{ мм/км}$.

Расхождения $v_{\text{зн}}$ (таблица 3) полученных по нормативной точности $M_{\text{норм}}$ нивелирования и точности нивелирования в i и j циклах ($M_{ij}^2 = \eta_i^2 + \eta_j^2$) показывают, что уровень значимости полученных скоростей следует назначать по результатам оценки ПВН в циклах.

По результатам повторного нивелирования I класса, выполненного на контрольных площадках и профильных линиях в двух циклах составлена схема (рис. 4) вертикальных смещений земной поверхности (оседаний), приуроченных к контурам разрабатываемых неокомских и сеноманских залежей. В двух циклах, выполненных через промежуток времени $T = 2$ года. Результаты повторного нивелирования, выполненного через промежуток времени $T = 1$ год позволили установить лишь 12% значимых величин скоростей $v_{\text{зн}}$ вертикальных смещений земной поверхности.

Внедрение результатов диссертационных исследований на Ямбургском ГДП подтвердили возможность достижения точности ПВН, необходимой для получения репрезентативных и значимых результатов повторного нивелирования на ГДП НГМ. При этом от внедрения научно-технических разработок диссертанта на стадии проектирования и оборудования Ямбургского ГДП, а также проведения полевых геодезических работ в трех циклах повторных наблюдений достигнута суммарная экономическая эффективность в размере 46084 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационных исследований:

1. Проведенный анализ современного состояния геодезических методов изучения геодинамических и техногенных геомеханических

процессов позволил установить тот факт, что существующий нормативно-детерминистический подход к установке повторных геодезических наблюдений на ГДП НГМ, их методика и содержание требуют пересмотра. Установлено, что главной научной задачей геодезических исследований на ГДП, наряду с обеспечением достаточной точности результатов повторных наблюдений, является разделение суммарных смещений геодезических пунктов, зафиксированных в результатах наблюдений, на разные генетические составляющие с оценкой их релевантности и репрезентативности.

2. Разработаны теоретические основы постановки повторного нивелирования на ГДП НГМ, позволяющие научно обоснованно подходить к назначению требований к таким структурным элементам повторного нивелирования, как длины линий нивелирования, выбор мест закладки исходных, исходных и контрольных нивелирных пунктов и способ их закрепления, периодичность повторного нивелирования и его продолжительность в циклах, значимость результатов повторного нивелирования и устойчивость нивелирных пунктов к побочным геомеханическим процессам, не имеющим отношения к изучаемым.

3. Выполнено физико-математическое моделирование влияний приповерхностного геотемпературного поля на устойчивость нивелирных пунктов, на основе которых разработан алгоритм для прогноза и учета дестабилизации нивелирных знаков, обусловленных тепловыми деформациями их конструктивных элементов и горных пород, составляющих основания нивелирных пунктов.

4. Разработан способ учета тепловых деформаций глубинных нивелирных пунктов по результатам измерения значений интегральной температуры их конструктивных элементов.

5. Представлены результаты исследования механизма воздействия морозного пучения на нивелирные пункты в условиях сезонного промерзания грунтов и вечной мерзлоты, на основе которых разработан алгоритм расчета конструктивных элементов и глубин закладки нивелирных устойчивых к морозному пучению.

6. Разработан алгоритм для аналитического интерполирования скоростей современных вертикальных движений земной коры, применительно к месту закладки исходных нивелирных пунктов ГДП.

7. Разработки, предложения и выполненные в диссертации исследования позволили создать научно обоснованную базу для

организации геодинамического полигона на крупнейшем в мире Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении.

Диссертационное исследование может получить продолжение при разработке технологии изучения сдвижений земной поверхности с применением метода дифференциальной радиолокационной интерферометрии.

Публикации по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК:

1. **Волков, Н.В.** О размещении, выборе конструкций и глубины заложений нивелирных пунктов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений / **Н.В. Волков** // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2017. – №5. – С.54-59.
2. **Волков, Н.В.** Оценка влияния геотемпературного поля на результаты повторного нивелирования / **Н.В. Волков** // Маркшейдерский вестник. – 2017. – №1. – С.29-32.
3. Волков, В.И. Условия эффективного применения геодезических методов на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, **Н.В. Волков** // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №2. – С.21-25.
4. Волков, В.И. Новый подход к применению маркшейдерско-геодезических наблюдений для контроля техногенных последствий разработки нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, **Н.В. Волков**, О.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2018. – №3. – С.45-50.
5. Волков, В.И. Применение повторных геодезических наблюдений для контроля техногенных последствий разработки нефтегазовых месторождений на основе программно-целевого подхода / В.И. Волков, **Н.В. Волков**, О.В. Волков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2018. – №4. – С. 375-382.

В издании, индексированном в международной базе Scopus:

6. Volkov, V.I. Use of the program and goal-oriented approach to observe the vertical displacements of the earth's surface in Russia / V.I. Volkov, **N.V. Volkov** // E3S Web of Conferences. TPACEE-2019.-2019. - №91(07023). -7p.

В прочих изданиях:

7. Волков, В.И. О Геодинамических аспектах использования государственной высотной основы при градостроительном и промышленном освоении территорий / В.И. Волков, **Н.В. Волков** // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №4. – С.239-242.

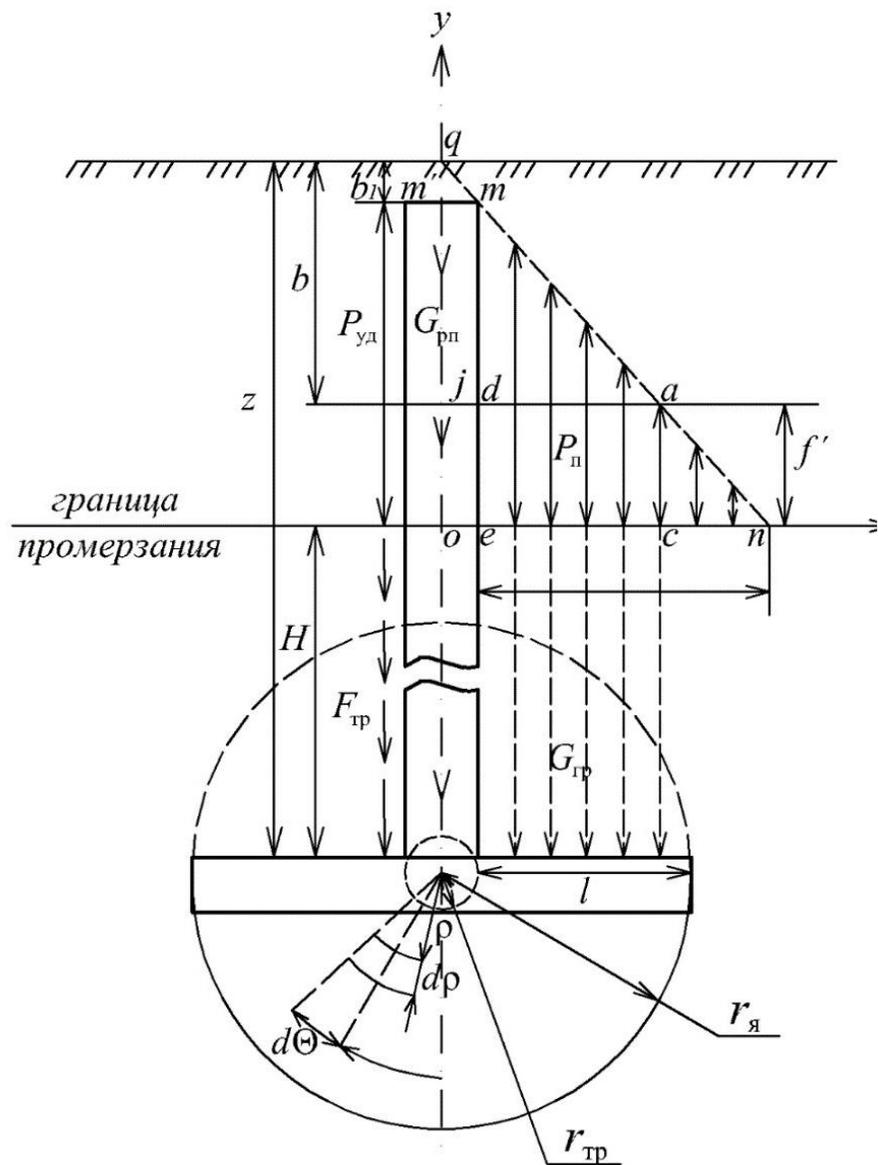


Рисунок 1 - Схема к расчету глубины закладки и конструктивных элементов нивелирного пункта Тип 162

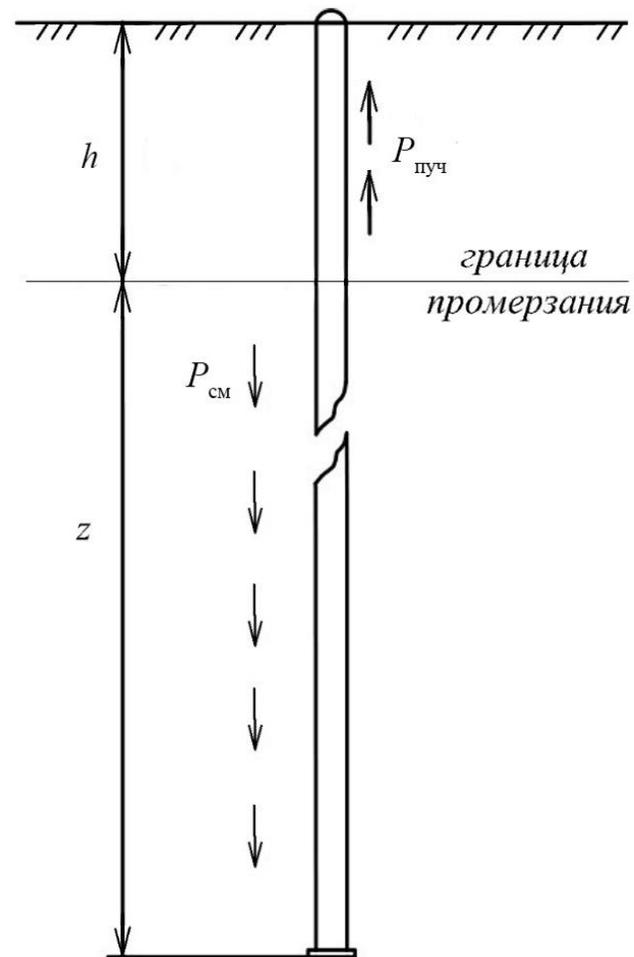


Рисунок 2 - Схема к расчету глубины закладки и конструктивных элементов нивелирного пункта Тип 150

Таблица 1 – Значения допустимых СКО нивелирования M (мм/км)

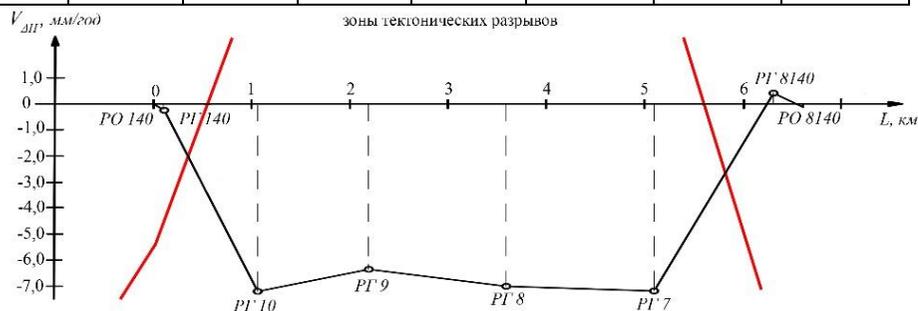
Упрогн, мм/год	Длина линии нивелирования L , км						
	0,5	1	3	6	10	20	40
Периодичность нивелирования 1 год							
5	1,3	0,9	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1
10	2,6	1,8	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2
Периодичность нивелирования 0,5 года							
5	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1
10	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	0,2	0,1

Таблица 2 – Прогнозные величины значимых скоростей вертикальных смещений земной поверхности (мм/год)

Класс нивелирования	Величины значимых скоростей $v_{\text{зн}}$, мм/год			
	Периодичность повторного нивелирования T , год			
	1 год	2 года	3 года	5 лет
I ($M = 0,8$ мм/км; $L = 40$ км)	29	14,6	9,8	5,9
II ($M = 2$ мм/км; $L = 20$ км)	52	26	17,3	10,4

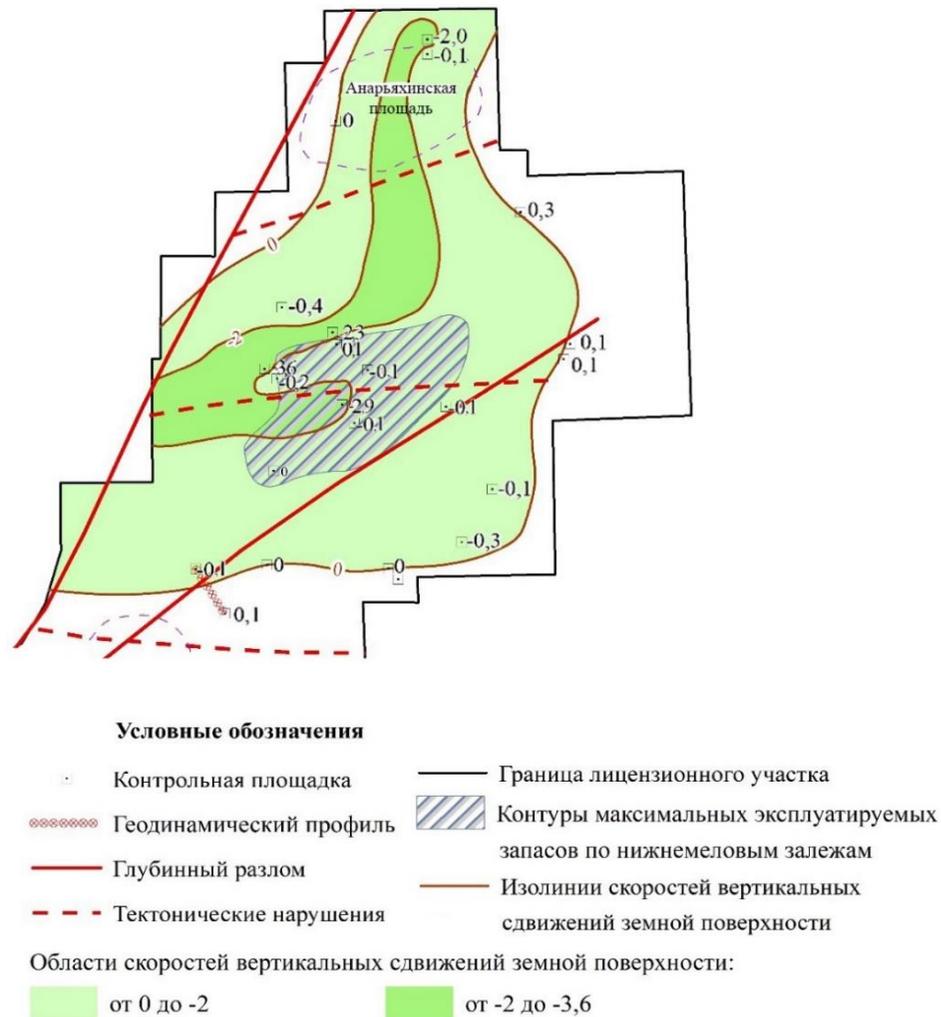
Таблица 3 – Величины значимых скоростей (мм/год) прогнозируемых (числитель) и полученных экспериментально (знаменатель)

Т, год	КП	ПЛ (длина, км)		ГП (длина, км)			
		1 шт.	1,4 км	2,4 км	2,5 км	5,8 км	6,4 км
1	0,6/0,6	5,4/1,2	7,1/1,6	7,3/5,0	11,1/7,7	11,6/8,1	12,0/8,3
2	0,3/0,3	2,7/0,6	3,5/0,8	3,6/2,5	5,5/3,8	5,8/4,0	6,0/4,2



○ Скорости вертикальных смещений контрольных нивелирных пунктов

Рисунок 3 – График скоростей вертикальных смещений нивелирных пунктов ГП 17 за период 2015-2017 гг.



Условные обозначения

- Контрольная площадка
 - Граница лицензионного участка
 - Геодинамический профиль
 - ▨ Контуры максимальных эксплуатируемых запасов по нижнемеловым залежам
 - Глубинный разлом
 - Изолинии скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности
 - - - - - Тектонические нарушения
- Области скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности:
- от 0 до -2
 - от -2 до -3,6

Рисунок 4 - Схема скоростей вертикальных сдвижений земной поверхности на Ямбургском ГДП за период 2015-2017 гг.